

Особенности практической реализации

формирующих двухполюсников мощных генераторов импульсов

Данная работа завершает цикл статей, в которых рассмотрены схемные решения генераторов мощных импульсов тока с регулируемыми амплитудно-временными параметрами и приведены их основные расчетные соотношения. В предыдущих работах исследованы электромагнитные процессы в мощных генераторах прямоугольных импульсов тока, в которых в качестве накопительных и формирующих цепей в основном используются однородные искусственные линии (ОИЛ). Приводятся результаты сравнения генераторов прямоугольных импульсов, выполненных как на основе ОИЛ, так и на основе формирующих двухполюсников (ФД) 1-го и 2-го рода при их практической реализации. Поясняется необходимость учета электромагнитного взаимодействия индуктивных элементов и поверхностного эффекта в обмоточных проводниках катушек индуктивностей для трех видов формирующих цепей. Оценивается чувствительность этих цепей к разбросу величин номиналов емкостных элементов.

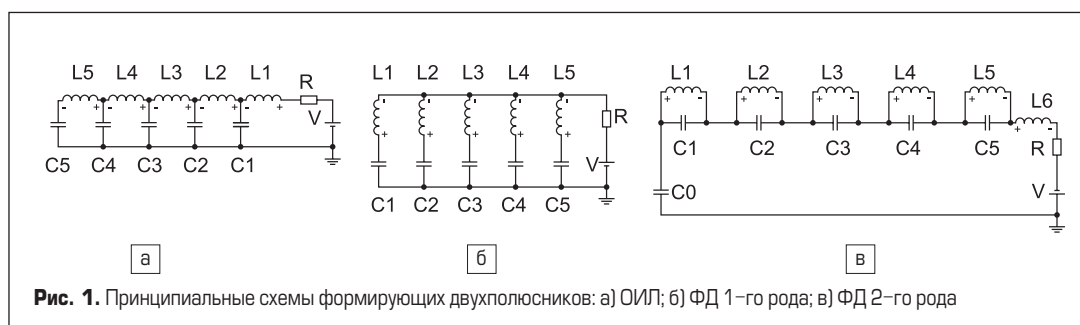
**Виктор Опре, д. т. н.,
профессор**

oprevm@yandex.ru

Сергей Дозоров

Несмотря на ряд преимуществ ОИЛ, из которых в первую очередь следует отметить их цепочечную структуру, равенство друг другу величин номиналов реактивных элементов всех ячеек, возможность представления ОИЛ в виде четырехполюсника и введения в структуру линии вентильных элементов [1–3], при практической реализации таких генераторов возникает ряд трудностей, устранить которые можно только с учетом конкретных конструктивных решений генераторов в целом. В основном недостатки сводятся к существенному искажению форм импульсов тока или напряжения нагрузки по сравнению с эталонными импульсами, полученными в результате синтеза канонических схем формирующих двухполюсников. Подобные проблемы возникают и при изготовлении генераторов прямоугольных импульсов на основе ФД 1-го и 2-го рода. Эти искажения определяются, как правило, магнитной связью между индуктивными элементами ОИЛ, ФД, параметрами паразитных элементов (паразитных индуктивностей и емкостей), определяемыми

контурами нагрузки и конструкцией генераторов, а также добротностью реактивных контуров самих формирующих цепей. Некоторые способы уменьшения влияния паразитных параметров нагрузки на форму импульсов хорошо известны [4], а влияние магнитной связи (взаимной индуктивности) индуктивных элементов изучено недостаточно в силу существенной трудности аналитического расчета электромагнитных процессов в нагруженных ОИЛ и ФД [5, 7]. Современные мощные компьютерные системы схемотехнического моделирования позволяют сравнительно просто решить как задачу анализа электромагнитных процессов в структуре ФД, так и в некоторой степени оценить взаимное влияние их индуктивных элементов. Но при этом авторы все-таки считают необходимым постулировать результаты анализа взаимного влияния индуктивных элементов в виде следующего положения: «Взаимное влияние индуктивных элементов реактивного ФД любого вида приводит к искажению формы переходной характеристики этого двухполюсника (а в конечном итоге



и к зависимости тока нагрузки от времени) по сравнению с эталонной формой, определяемой переходными характеристиками ФД, полученными в результате классического синтеза канонических цепей».

Из этого положения следует вывод, что форма импульсов тока нагрузки реальных генераторов всегда будет отличаться от эталонной формы. В связи с этим возникает необходимость сравнительного анализа электромагнитных процессов в генераторах эквивалентных импульсов, которые могут быть выполнены на основе ОИЛ, ФД 1-го и ФД 2-го рода (рис. 1), с учетом взаимного влияния их индуктивностей. При этом надо помнить, что конечной целью коррекции формы импульсов тока нагрузки является не столько достижение эталонной временной зависимости переходной характеристики, сколько наилучшее приближение формы импульса тока нагрузки к идеальному прямоугольнику. Отсюда вытекает необходимость не только оценки взаимного влияния индуктивностей на форму импульса и выбора вида двухполюсника, у которого это влияние менее выражено, но и поиск конструктивных решений, учитывающих магнитную связь и способных обеспечить приближение формы тока нагрузки к прямоугольной форме. Помимо этого, следует оценить чувствительность каждой из этих трех формирующих цепей к разбросу величин параметров элементов. Причем представляется, что эту оценку достаточно произвести только для конденсаторов, которые являются готовыми изделиями, и коррекция величины их емкости затруднительна, а катушки индуктивности изготавливаются индивидуально, и их номинал может быть выдержан с большей точностью.

Расчетные соотношения, определяющие величины емкостей и индуктивностей ОИЛ и ФД, имеют следующий вид:

- для ОИЛ $C_n = \tau/2, 2n\rho$, $L_n = \tau\rho/2, 2n$;
- для ФД 1-го рода $C_k = 4\tau/(2k - 1)^2\pi^2\rho$, $L_k = \tau\rho/4$;
- для ФД 2-го рода $C_0 = \tau/2\rho$, $C_k = C_0/2 = \tau/4\rho$, $L_k = \tau\rho/k^2\pi^2$.

Здесь L_n и C_n — индуктивность и емкость ячейки ОИЛ, L_k и C_k — индуктивность и емкость k -го контура ФД, C_0 — накопительная емкость ФД 2-го рода, τ — длительность импульса, ρ — волновое сопротивление ОИЛ или ФД, равное сопротивлению нагрузки R в согласованном режиме, n — число ячеек ОИЛ или контуров ФД, k — номер контура ФД.

Особенностью переходной характеристики ФД 2-го рода является то, что в согласованной линейной нагрузке формируется импульс тока, имеющий нулевую длительность фронта и выброс на вершине, в два раза превышающий амплитуду самого импульса. Для устранения этого выброса последовательно с нагрузкой вводится дополнительная индуктивность L_6 (рис. 1), причем в литературе отсутствуют конкретные рекомендации для выбора величины этой индуктивности и предлагается подбирать ее экспериментально. Можно рекомендовать принять величину $L_6 = L_2 + L_3$, и тогда амплитуда первого выброса на плоской части импульса будет практически равна амплитуде первого выброса ОИЛ или ФД 1-го рода.

На рис. 2 приведены нормированные эталонные кривые токов согласованной нагрузки для всех трех формирующих цепей. (ОИЛ — кривая 1, ФД 1 — кривая 2, ФД 2 — кривая 3). Количество ячеек ОИЛ и контуров ФД выбрано одинаковым ($n = 5$). Следует помнить, что увеличение числа контуров у ФД 1-го и 2-го рода мало влияет на длительность импульса, но несколько улучшает его форму. При этом уменьшаются длительности фронта и среза импульса, а амплитуды осцилляций на плоской части импульса остаются неизменными.

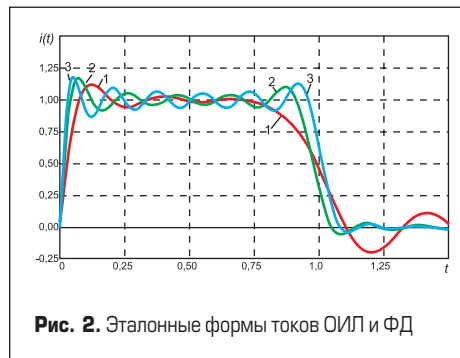


Рис. 2. Эталонные формы токов ОИЛ и ФД

Относительные величины действующих значений токов индуктивных элементов $I_{dk}^* = I_{dk} / I_{\partial n}$ соответственно равны [1]:

- для ОИЛ $I_{dn}^* = \sqrt{(n - k) / n}$,
- для ФД 1-го рода $I_{dk}^* = 2\sqrt{2} / (2k - 1)\pi$, (1)
- для ФД 2-го рода $I_{dk}^* = 1, 225$, (2)

где $I_{\partial n}$ — действующее значение тока нагрузки. Зависимость (1) получена исходя из того, что все последовательные L - C контуры ФД 1-го рода включены параллельно (рис. 1), то есть напряжения контуров одинаковы. В силу этого токи контуров (рис. 3, кривые 2–6) соотносятся обратно пропорционально их волновым сопротивлениям, равным $\rho_k = (2k - 1)\pi\rho/4$ [4].

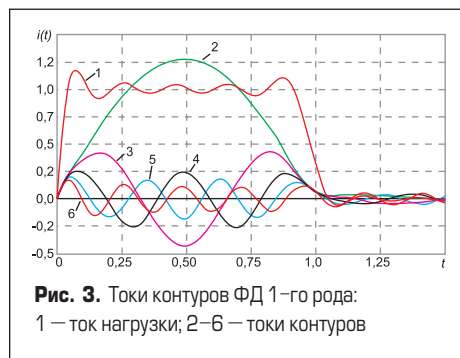


Рис. 3. Токи контуров ФД 1-го рода: 1 — ток нагрузки; 2–6 — токи контуров

Ток нагрузки (кривая 1), принимаемый за базисную величину, в согласованном режиме имеет форму, близкую к прямоугольной, и равен $I_n = U_n/2\rho$, где U_n — напряжение заряда линии. Тогда соотношение амплитуд токов контуров

и тока нагрузки равно $I_{kmax}/I_n = 4/(2 - 1)\pi$. С учетом того, что форма токов контуров близка к синусоидальной, действующее значение этих токов будет $I_d = I_{kmax}/\sqrt{2}$, и относительные величины действующих значений этих токов определяются зависимостью (1).

Напротив, у ФД 2-го рода амплитуды токов индуктивностей всех противорезонансных контуров практически одинаковы, что естественно, так как эти цепи дуальны. На рис. 4 (а и б) приведены временные зависимости напряжений конденсаторов (а) и токов индуктивностей (б) нормированного ФД 2-го рода. Зависимость (2) получена исходя из того, что напряжения противорезонансных контуров (рис. 4а, кривые 2–6) определяются током нагрузки и равны $U_k = U_n\rho_k/2\rho$, а их волновые сопротивления равны $\rho_k = 2\rho/k\pi$. Тогда $U_k = U_n/k\pi$, и амплитуды токов противорезонансных контуров равны $I_k = U_n/2\rho = I_n = const$. Токи индуктивностей контуров имеют постоянную составляющую и равны $i_k(t) \approx I_n \sin\omega_k t + I_n$, где ω_k — собственная частота контура (рис. 4б, кривые 2–6).

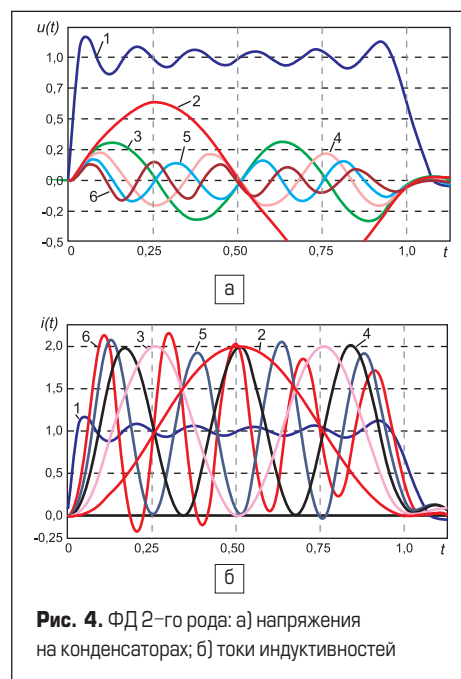


Рис. 4. ФД 2-го рода: а) напряжения на конденсаторах; б) токи индуктивностей

Относительная величина действующих значений этих токов равна:

$$I_{dk}^* = \sqrt{(I_n/\sqrt{2})^2 + I_n^2} = I_n\sqrt{3/2} = 1, 225.$$

На рис. 5 приведены полученные с помощью программного средства MicroCap 7 результаты численного расчета текущих среднеквадратичных отклонений (действующих значений) тока нагрузки (кривая 1) и токов кон-

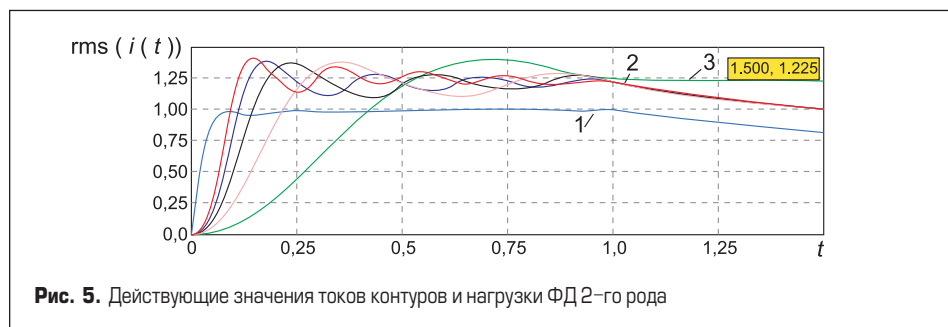


Рис. 5. Действующие значения токов контуров и нагрузки ФД 2-го рода

туров (кривая 2) ФД 2-го рода при интегрировании по времени для одного импульса, а также их отношение (кривая 3)). Как видно на рисунке, начиная с единичного момента времени действующие значения токов контуров равны друг другу, а их отношение совпадает с зависимостью (2) полностью. Следует отметить, что действующее значение тока нагрузки $I_{\partial n}$ вычисляется на отрезке времени, равном длительности импульса. Истинное действующее значение тока нагрузки определяется как $I_{\partial n} = I_{\partial n} \sqrt{Q}$, где $Q = T/\tau$ — скважность импульсов тока нагрузки, T — период частоты следования импульсов ($T = 1/f$). При этом необходимо помнить, что при больших значениях скважности отношение амплитуды импульса к его истинному действующему значению может быть существенным.

В связи с этим выбор сечения обмоточных проводников катушек индуктивностей ОИЛ или ФД следует производить, ориентируясь в первую очередь на добротность реактивных контуров $Q' = \rho_k/r$, а не на допустимую плотность тока, определяемую $I_{\partial n}$.

При проектировании и изготовлении генераторов импульсов возникает необходимость выбора конденсаторов накопительных и формирующих цепей и изготовления катушек индуктивностей. Конденсаторы выбираются по допустимым рабочим напряжениям, максимальным частотам, условиям процесса заряда и разряда с учетом наработки на отказ и т. п. Конденсаторы серийно выпускаются промышленностью, условия их эксплуатации регламентированы изготовителем, и задача проектировщика генераторов — обеспечить их правильный выбор. Напротив, катушки индуктивностей приходится рассчитывать, проектировать и изготавливать индивидуально. В связи с этим решение этой задачи требует учета целого ряда факторов, отрицательные проявления которых могут сказаться уже на этапе пуско-наладочных работ. Для расчета катушек необходимо знать их номинал, действующие значения токов, максимальные напряжения, прикладываемые к катушкам индуктивностей, как в процессе заряда, так и в процессе формирования импульсов тока нагрузки. Величины действующих значений токов и их гармонический состав определяют материал и сечениемоточных проводников катушек, омическое сопротивление катушек и, соответственно, добротность реактивных контуров, тепловые режимы индуктивных элементов и т. п. При генерировании импульсов сравнительно большой длительности (сотни и тысячи микросекунд) и низкой частоты следования (единицы и десятки герц) добротность реактивных контуров может быть определена как $Q' = \rho_k/r$, где ρ_k — волновое сопротивление контура, r — сопротивление катушки индуктивности на постоянном токе. В этих случаях поверхностный эффект обычно не учитывается. При генерировании коротких импульсов (единицы и доли микросекунд), следующих на высокой частоте (единицы и десятки кГц), учет поверхностного эффекта обязателен. Для этого необходимо знать максимальные частоты токов реактивных контуров и выбирать проводники с учетом глупины проникновения этих токов. Глубина проникновения Δ определяется зависимостью $\Delta = 503\sqrt{\rho'/\mu f}$, где ρ' — удельное сопротивление материала проводника, μ — относительная магнитная проницаемость материала проводника, f — частота тока [6].

В ОИЛ токи индуктивностей имеют сложный гармонический состав [1, 5], отдельные гармоники токов ячеек отличаются по амплитуде, и величина глубины проникновения токов в сечение проводников, определяемая поверхностным эффектом, может быть вычислена с учетом максимальной частоты этих гармоник, приблизительно равной $f_{\max} = 1/\pi\sqrt{L_j C_j}$ [10].

В ФД 1-го рода номиналы индуктивностей также одинаковы, но действующие значения и гармонический состав токов индуктивных элементов определяются номером ячейки и существенно отличаются друг от друга. В ФД 2-го рода одинаковы номиналы конденсаторов ячеек, и гармонический состав токов индуктивных элементов также определяется номером ячейки. В этих случаях при проектировании катушек индуктивностей необходимо учитывать разницу частот отдельных контуров, которая для ФД 1-го рода равна $f_k/f_1 = 2k - 1/2$, для ФД 2-го рода $f_k/f_1 = k$, а величина $f_1 = 1/2\tau$ для ФД 1-го рода и $f_1 = 1/\tau$ для ФД 2-го рода.

Конечная величина добротности по-разному проявляется в искажении формы эталонного импульса у различных формирующих цепей. У ОИЛ при уменьшении добротности увеличивается величина спада плоской части импульса [1], у ФД 1-го рода влияние добротности проявляется аналогично (рис. 6, кривая 2), а у ФД 2-го рода спад плоской части импульса не наблюдается, но несколько уменьшается амплитуда импульса и увеличивается амплитуда осцилляций (рис. 7, кривая 2). Для ОИЛ существует возможность коррекции спа-

да плоской части импульса за счет некоторого равномерного уменьшения волнового сопротивления ячеек вдоль по длине линии в сторону ненагруженных зажимов.

На рис. 8 приведены формы импульсов ОИЛ без потерь (кривая 1), ОИЛ с потерями (кривая 2, добротность равна 20), и с коррекцией спада плоской части (кривая 3). Коррекция осуществлялась за счет того, что номиналы каждой из катушек индуктивностей пятизвенной ОИЛ уменьшались на 10% к концу линии, а номиналы конденсаторов соответственно увеличивались на 10%.

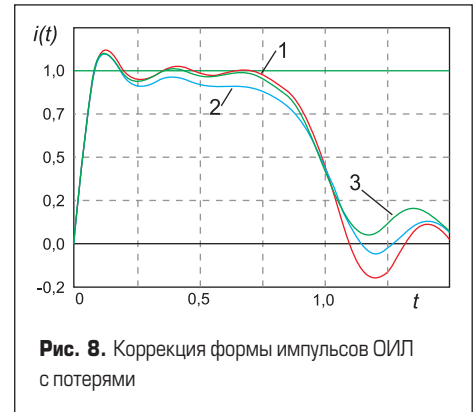


Рис. 8. Коррекция формы импульсов ОИЛ с потерями

При практической реализации генераторов импульсов взаимное влияние индуктивных элементов ФД неизбежно, что приводит к отклонению формы импульсов от эталонной формы. Представляет интерес определить степень этого взаимного влияния для всех трех реактивных формирующих цепей — ОИЛ, ФД 1-го рода и ФД 2-го рода, поскольку их индуктивности отличаются друг от друга не только номиналами, но и геометрическими размерами. Предварительно следует отметить, что взаимное влияние индуктивных элементов в существенной степени определяется конструкцией и размерами самих катушек индуктивностей, которые могут быть выполнены в виде соленоидов, плоских дисковых катушек, однослойных и многослойных катушек и т. п. [8]. При этом геометрические размеры катушек определяются параметрами генератора, массо-габаритные показатели конструкции в целом — массо-габаритными показателями отдельных элементов, а также взаимным расположением индуктивных элементов и расстояниями между ними. Стремление уменьшить размеры генератора обычно приводит к увеличению взаимного влияния индуктивностей. Использование индуктивных элементов с магнитопроводами, у которых взаимное влияние может быть минимальным, в импульсных генераторах нежелательно, так как это приводит к существенному и неоправданному увеличению их массо-габаритных показателей [9]. Катушки индуктивностей ОИЛ обычно изготавливают одинаковыми, несмотря на разницу действующих значений их токов [1], а их взаимное расположение в пространстве существенно влияет на взаимную индуктивность системы.

У ФД 1-го рода номиналы индуктивностей также одинаковы, но действующие значения и гармонический состав токов контуров различны, что предопределяет и различное кон-

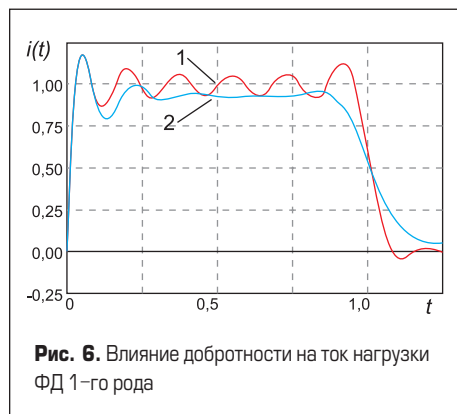


Рис. 6. Влияние добротности на ток нагрузки ФД 1-го рода

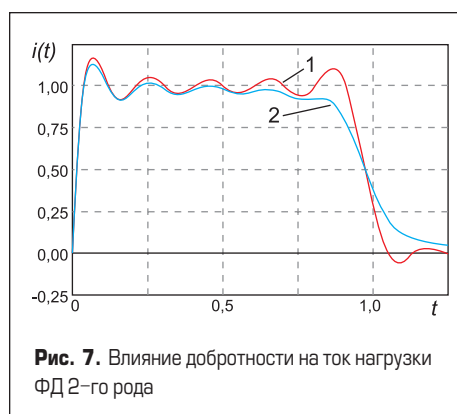


Рис. 7. Влияние добротности на ток нагрузки ФД 2-го рода

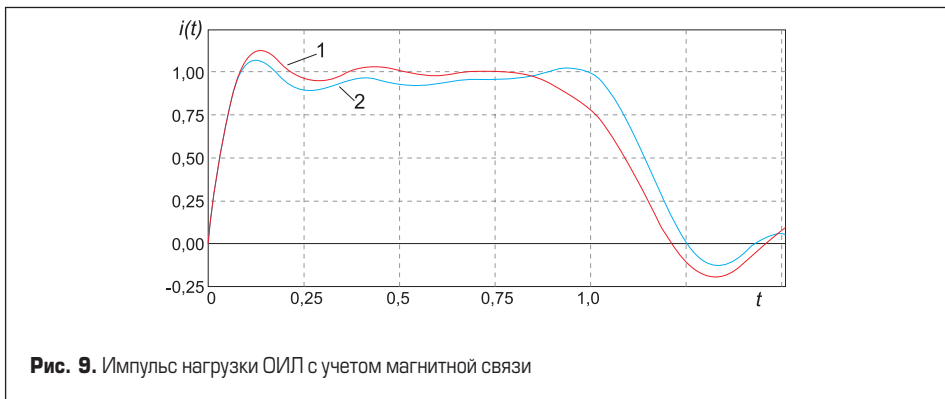


Рис. 9. Импульс нагрузки ОИЛ с учетом магнитной связи

структивное исполнение самих катушек. У ФД 2-го рода индуктивности имеют разные номиналы, соответственно гармонический состав токов этих индуктивностей также различен, но действующие значения этих токов одинаковы, а магнитная связь проявляется поиному, чем у ОИЛ и ФД 1-го рода. В [7] приведен достаточно сложный аналитический расчет параметров ОИЛ с учетом взаимного влияния смежных индуктивных элементов и даны рекомендации по проектированию ОИЛ, у которой индуктивности выполнены в виде единого соленоида с отводами. Но это частный случай, поскольку такое конструктивное решение далеко не оптимально и возможно только для ОИЛ. В данной работе анализ взаимного влияния индуктивностей ОИЛ и ФД 1-го и 2-го рода был произведен с помощью программного средства MicroCap 7, которое позволяет учитывать коэффициенты связи всех катушек индуктивности: каждой катушки со всеми остальными.

На рис. 9, 10 и 11 приведены эталонный импульс (кривая 1) и импульс тока нагрузки (кривая 2) ОИЛ (рис. 9, коэффициент связи между смежными катушками $K_{cb} = 0,1$), ФД 1-го

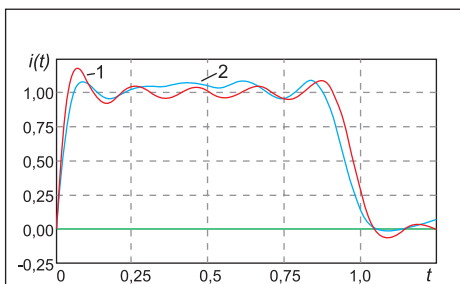


Рис. 10. Импульс нагрузки ФД 1-го рода с учетом магнитной связи

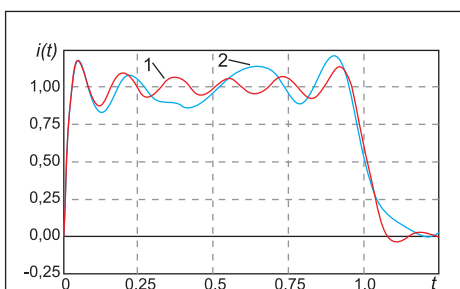


Рис. 11. Импульс нагрузки ФД 2-го рода с учетом магнитной связи

рода (рис. 10) и ФД 2-го рода (рис. 11) (коэффициент связи между смежными катушками $K_{cb} = 0,2$). Следует отметить, что в конструкциях ОИЛ все катушки индуктивностей и расстояния между ними обычно имеют одинаковые геометрические размеры, а сами катушки располагаются на одной оси. В модели ОИЛ коэффициенты связи между не смежными катушками, имеющими номера k и m , уменьшались пропорционально квадрату расстояния между ними, т.е. $K_{cbk} = 0,1/(k-m)^2$.

Подобный подход к построению модели, учитывающей магнитные связи катушек индуктивностей, оправдан в отношении ОИЛ. Он может быть использован при моделировании процессов в ФД 1-го рода, поскольку в этом случае номиналы катушек также одинаковы и сами катушки могут иметь одинаковые геометрические размеры, если не принимать во внимание разницу величин действующих значений их токов. У ФД 2-го рода номиналы катушек существенно различаются, в связи с чем модель не в полной мере соответствует действительности. Тем не менее, она может быть принята в качестве первого приближения.

Точная оценка влияния магнитных связей индуктивных элементов ФД на форму импульсов тока нагрузки может быть сделана в том случае, когда известны все их геометрические и электрические параметры и расстояния между ними. Тогда возможен аналитический расчет взаимных индуктивностей [8] и определение коэффициентов связи, которые должны быть использованы в модели. Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что конструкция генератора (пространственное расположение катушек) оказывает существенное влияние на форму импульсов, ухудшая ее по сравнению с эталонной формой, и для уменьшения этого влияния следует в первую очередь уменьшить коэффициенты связи между катушками.

Наиболее часто в мощных генераторах импульсов используются плоские (дисковые) катушки индуктивностей [8], намотанные медной шиной. Толщина этой шины определяется с учетом поверхностного эффекта, а ширина (то есть в конечном итоге площадь сечения проводника) вычисляется исходя из действующего значения тока или добротности контуров. Эти катушки имеют форму дисков, и их расположение в пространстве определяет взаимные индуктивности всей системы. Обычно такие катуш-

ки располагаются параллельно друг другу, и магнитная связь при этом может быть существенной.

Из [8] известно, что при ортогональном расположении катушек индуктивностей в пространстве (в системе трех координат) можно получить коэффициент связи, практически равный нулю. При этом импульс в нагрузке будет близок по форме к эталонному импульсу. Такое решение несколько усложняет конструкцию генератора, так как в этом случае трудно унифицировать узлы крепления катушек индуктивностей и минимизировать объем генератора. Поэтому можно рекомендовать проводить предварительный поиск компромиссных конструктивных решений, обеспечивающих приемлемые как массо-габаритные показатели генератора, так и форму импульсов, с помощью численного и физического моделирования, по возможности, наиболее близких к оптимальным.

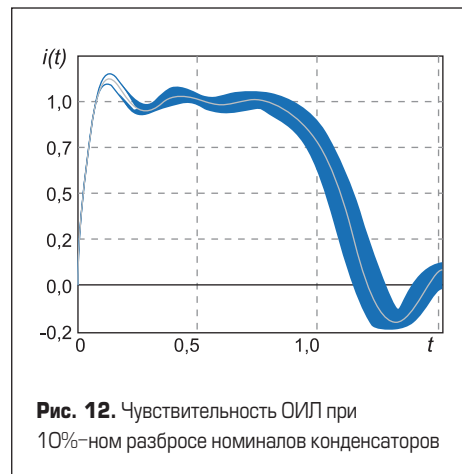


Рис. 12. Чувствительность ОИЛ при 10%-ном разбросе номиналов конденсаторов

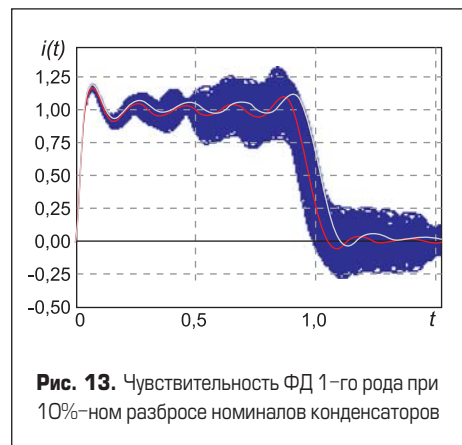


Рис. 13. Чувствительность ФД 1-го рода при 10%-ном разбросе номиналов конденсаторов

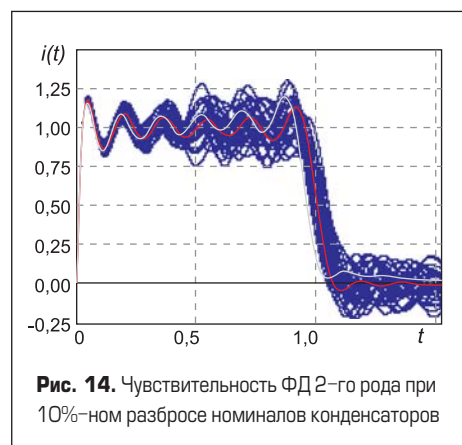


Рис. 14. Чувствительность ФД 2-го рода при 10%-ном разбросе номиналов конденсаторов

Кроме всего перечисленного, необходимо оценить чувствительность трех реактивных формирующих цепей к разбросу величин номиналов комплектующих. Известно, что ОИЛ обладают малой чувствительностью [5], а данные по оценке чувствительности ФД 1-го и 2-го рода в литературе отсутствуют. Для оценки чувствительности трех формирующих цепей был проведен с помощью программного средства MicroCap 7 численный эксперимент. Рассматривался разброс параметров только для конденсаторов, поскольку в серийном производстве эти параметры выдерживаются с точностью $\pm 5\%$ или $\pm 10\%$, а катушки индуктивности могут быть изготовлены достаточно точно. В численном эксперименте был задан разброс 10% от величин номиналов всех конденсаторов пятизвенной ОИЛ (рис. 12), пятиконтурных ФД 1-го рода (рис. 13) и ФД 2-го рода (рис. 14).

Из анализа результатов эксперимента следует, что ОИЛ действительно обладает низкой чувствительностью, поскольку поле разброса импульсов тока не очень велико, а форма всех граничных импульсов близка к эталонной. У ФД 1-го и 2-го рода это поле разброса токов существенно больше, а форма граничных импульсов неприемлема. Отсюда следует, что при изготовлении генераторов на основе ОИЛ можно использовать серийно выпускаемые конденсаторы без коррекции их номиналов с помощью дополнительных емкостей. При

этом обычно удается путем подбора количества ячеек и небольшой коррекции длительности импульса тока нагрузки получить номиналы конденсаторов ячеек ОИЛ, которые равны стандартному ряду номиналов серийно выпускаемых конденсаторов. При использовании в качестве накопительных и формирующих элементов ФД подбор конденсаторов по их номиналам следует производить крайне тщательно и при необходимости корректировать величину их емкости.

В заключение можно дать следующие основные рекомендации:

1. Сечениемоточных проводников катушек индуктивностей необходимо выбирать с учетом поверхностного эффекта и действующего значения их токов исходя, в первую очередь, из требуемой добротности реактивных двухполосников.
2. Следует измерять величины емкостей конденсаторов контуров ФД и корректировать их при необходимости с точностью до 1%.
3. Путем численного и физического моделирования желательно предварительно оценивать взаимное влияние катушек индуктивностей при различных вариантах их расположения в пространстве. Кроме этого, необходимо заметить, что все эти рекомендации также относятся к расчету и изготовлению генераторов импульсов регулируемой длительности и формы на основе ОИЛ с вентилями [2, 3].

Литература

1. Опре В. Генераторы прямоугольных импульсов тока на основе однородных искусственных линий // Силовая электроника. 2008. № 1.
2. Опре В. Генераторы мощных импульсов тока регулируемой длительности // Силовая электроника. 2008. № 2.
3. Опре В. Генерирование мощных импульсов тока регулируемой формы // Силовая электроника. 2008. № 3.
4. Иццоки Я. С., Овчинников Н. И. Импульсные и цифровые устройства. М.: Советское радио, 1972.
5. Евтянов С. И., Редькин Г. Е. Импульсные модуляторы с искусственной линией. М.: Советское радио, 1973.
6. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974.
7. Меерович Л. А., Зеличенко Л. Г. Импульсная техника. М.: Советское радио, 1954.
8. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергия, 1970.
9. Герасев О. А., Герасев С. А., Никитин А. М., Опре В. М. Критерий выбора конструкции формирующих индуктивных элементов импульсных систем питания лазеров // Электротехника. 1988. № 12.
10. Опре В. М. Силовая импульсная техника. СПб.: Литера, 2008.