

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С3458

X-236

1796/2-76

Р.В.Харьюзов, В.А.Швец

10/2-76

9 - 9523

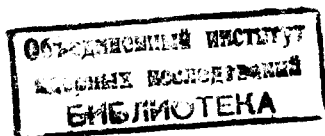
О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛИУ
МАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСОВ

1976

9 - 9523

Р.В.Харьюзов, В.А.Швец

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛИУ
МАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСОВ



Введение

В исследовательском комплексе ИБР-2 с инжектором ЛИУ-30, сооружаемом в ЛНФ ОИЯИ, будет генерироваться мощный поток нейтронов /до 10^{17} нейтр/см²с/. Инжектор - линейный индукционный ускоритель - представляет собой совокупность сложных электрофизических устройств - инжекторной, индукционной и ускоряющей систем. Эти устройства по роду своей работы являются импульсными системами и содержат большое число мощных генераторов /от сотен кВт до сотен МВт/. В состав их входят источники питания, накопители, коммутаторы /в основном импульсные тиратроны/ и т.п. Кроме того, для формирования моноэнергетического пучка электронов в инжекторную часть ускорителя входит ряд устройств, формирующих наносекундные перепады килоамперной амплитуды и микросекундной длительности /например, система монохроматизации электронного пучка/.

Тысяча четыреста ускоряющих элементов /индукторов/ ЛИУ объединены в 102 секции, питаемые от импульсных генераторов. Пятьдесят один импульсный генератор мощностью до 280 МВт каждый должен обеспечивать надежную работу ускорителя непрерывно в течение 120 ч.

В результате расчетов, проведенных на ЭВМ, показано, что работоспособность ускорителя полностью нарушается при выходе из строя от одного до десяти генераторов в зависимости от места их расположения в ускорительном тракте ЛИУ.

Таким образом, тот факт, что при самых неблагоприятных условиях выход из строя одного генератора

может привести к отключению ускорителя, явился стимулом к поискам путей повышения их надежности.

Один из таких путей заключается в возможности применения в ЛИУ-30 весьма надежных магнитных генераторов импульсов /МГИ//1/. Кроме того, в настоящей работе приводятся результаты исследований по формированию наносекундного перепада килоамперной амплитуды микросекундной длительности в МГИ.

Магнитным генератором принято называть формирующую цепочку, составленную из соответствующим образом подобранных и соединенных электрически конденсаторов и дросселей с железными сердечниками. Формирование импульсов в МГИ происходит за счет использования нелинейных магнитных свойств ферромагнитных сердечников.

Основным элементом, общим для всех МГИ, является звено, содержащее конденсатор и дроссель /трансформатор или автотрансформатор/. Схема МГИ обычно состоит из нескольких таких звеньев, соединенных каскадно. Не останавливаясь подробно на физических процессах в звене, которые рассмотрены в /1/, заметим, что в зависимости от величины тока подмагничивания сердечника дросселя возможен симметричный режим работы с двумя насыщениями разной полярности и асимметричный режим с одним насыщением. По схеме питания различают генераторы двух видов. Генераторы первого вида питаются от источника переменного напряжения и не содержат управляемых ключей; генераторы второго вида питаются от источника постоянного напряжения. Так как в схемах, содержащих только реактивные элементы, невозможно преобразовать постоянный ток в импульсный, в них применяются управляемые ключи /триоды или тиристоры/. Возможно также применение тиратрона в качестве ключа, но этот вариант более сложен и обладает недостатками тиратронного генератора с формирующей линией.

Как отмечено в /1/, наибольшее распространение в практике получила схема МГИ, состоящая из четырех звеньев, причем одно из них /названное звеном типа Б/ содержит конденсатор и импульсный трансформатор для

повышения напряжения, остальные звенья /типа А/ состоят из дросселя и конденсатора.

Типовая схема МГИ без ключа во входной части /1 вида/ представлена на рис. 1.

МГИ позволяют получать импульсы самой различной мощности /от сотен ватт до десятков мегаватт/ и длительности /от десятков наносекунд до десятков микросекунд и выше/. Частота следования импульсов может быть от нескольких герц до десятков килогерц. Кроме того, возможна также работа в режиме с внешней синхронизацией /генераторы 2 вида/.

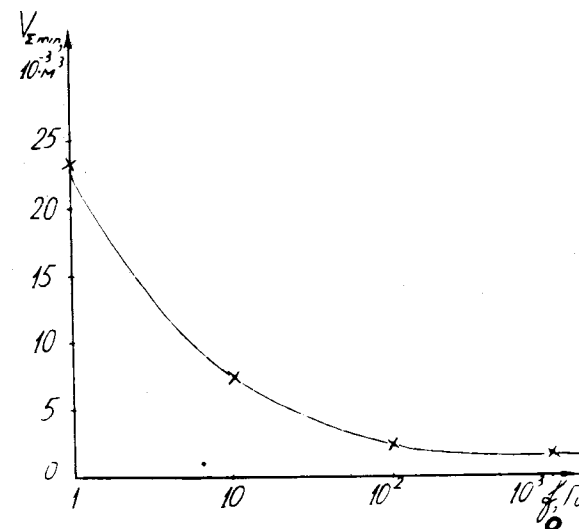
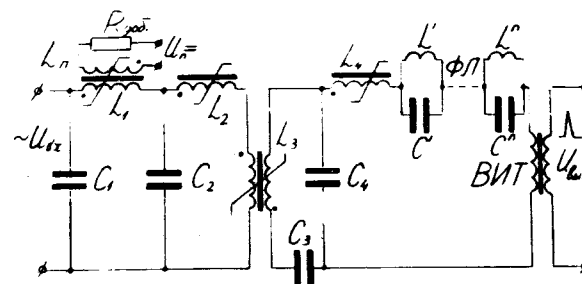


Рис. 1. Схема магнитного генератора импульсов 1 вида и зависимость минимального объема железа $V_{\Sigma \min}$ от частоты f на 1 МВт импульсной мощности.

Действие многозвенного генератора можно пояснить следующим образом: входная часть схемы, включающая в себя зарядный контур и первое звено, определяет энергию импульса и его фазу. Роль остальных звеньев состоит в последовательном сжатии до требуемой выходной длительности образованного в первом звене импульса, а также в повышении амплитуды импульса с помощью звена типа Б до требуемой величины. Последнее звено, кроме того, позволяет с помощью формирующей линии получать в нагрузке импульс заданной формы.

Магнитные генераторы I вида, являясь предпочтительными с точки зрения надежности в связи с отсутствием в их схеме коммутирующих элементов, исследовались как с точки зрения возможности синхронизации с ИБРом и возможной синхронизации в тракте ЛИУ, так и с точки зрения их осуществимости применительно к ЛИУ-30.

Возможность синхронизации МГИ I вида с ИБРом не вызывает сомнения, т.к. любое смещение импульса инжекции относительно заданного момента на ± 5 электрических градусов вызывает лишь пятипроцентное изменение пиковой мощности реактора, в то время как МГИ указанную точность обеспечивает. Задача же синхронизации МГИ I вида друг относительно друга в соответствии с программой ускорения пучка могла бы вызвать затруднения из-за малости необходимых интервалов задержки по отношению к периоду питающей сети. Однако мы не занимались ее решением, т.к. МГИ I вида неприемлемы по другой причине.

Практически непреодолимым барьером оказался объем высококачественного железа, необходимый для реализации МГИ нужной мощности. В порядке иллюстрации оценим объем сердечников на 1 МВт мощности. Рассматривается генератор I вида, составленный из звеньев типа А. Схема питается от источника переменного напряжения частоты f_0 . Минимальный общий объем железа сердечников четырехзвенного МГИ определяется выражением /1/ :

$$V_{\Sigma \min} = 8 \frac{\mu_0 P_{\text{и}} \tau_{\text{и}}}{\sqrt{10\alpha\epsilon^2}} \sqrt[4]{\prod_{k=1}^4 \frac{\mu_{\text{н}k} a_k \gamma_k^2}{(1 + \lambda_{k+1})(\Delta B_k)^2 \beta_k}}, \quad /1/$$

где $P_{\text{и}}$ - импульсная мощность, Вт, $\tau_{\text{и}}$ - длительность импульса, с, k - номер звена генератора, ϵ - коэффициент заполнения импульсов $/\epsilon = \frac{\tau_{\text{и}}}{T_0} = \tau f_0$; T_0, f_0 -

период, частота следования импульса/, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/М}$, $a = \tau_{\Phi} / \tau_{\text{и}}$ - длительность фронта импульса/, $\mu_{\text{н}k} = \mu_{\text{с}k} - 1 + S_k / A_k$ - коэффициент, зависящий от величины магнитной проницаемости сердечника в насыщении ($\mu_{\text{с}}$) и от отношения площадей сечения обмоток (S) и сечения сердечника $/A$;/ $\lambda_{k+1} = C_k / C_{k+1} / C$ - емкость звена/, ΔB_k - рабочий перепад индукции в сердечнике дросселя, Тл, β_k - коэффициент передачи энергии от "к" звена до нагрузки

$$\left(\beta_k \frac{C_k U_k^2}{2} = P_{\text{и}} \tau_{\text{и}} \right),$$

a_k - коэффициент, равный величине отношения суммарной индуктивности к индуктивности насыщенного дросселя $[L_{k-1} + a_{k-1} L_{\text{н}(k-1)}]$ /индекс "н" указывает на насыщенное состояние сердечника/. Для последнего звена $a_n = 1$, γ_k - коэффициент, зависящий от формы приложенного к дросселю напряжения /см. /3.30/ в /1/ / /здесь $= \frac{\pi}{2}$ /. Для расчета здесь и далее примем:

$$\mu_{\text{н}1} = 3,0; \quad \mu_{\text{н}n} = 7,0; \quad \mu_{\text{н}k} = 6,0 \quad (k \neq 1, n); \quad \tau_{\text{и}} = 0,5 \cdot 10^{-6};$$

$$\beta_1 = 0,4; \quad \beta_2 = 0,5; \quad \beta_3 = 0,63; \quad \beta_4 = 0,8; \quad \tau_{\Phi} = 0,1 \cdot 10^{-6};$$

$$\Delta B_k = 1,5 B_c = 2,3 \text{ Тл} \quad (B_c = 1,5 \text{ Тл}); \quad a = \frac{\tau_{\Phi}}{\tau_{\text{и}}} = 0,2;$$

$$\gamma_k = 1,57; \quad \lambda_{k+1} = 1,0; \quad a_k = 1,0.$$

Подставляя числовые значения в /1/, получим:

$$V_{\Sigma \min} = 23,04 \cdot 10^{-3} \sqrt{T_0} \text{ м}^3 = \frac{23,04 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f_0}} \text{ м}^3.$$

Зависимость объема железа $V_{\Sigma \min}$ от частоты следования импульсов f_0 /т.е. частоты питающей сети/ на 1 МВт мощности представлена на рис. 1.

При рассмотрении генераторов 2 вида имелся в виду вариант с применением в качестве коммутаторов управляемых диодов /тиристоров/, срок службы которых составляет 10^4 ч, т.е. в 10-20 раз больше срока службы тиратронов / $5 \cdot 10^2 - 10^3$ ч/. Возможность внешней синхронизации и заметно меньший объем железа выгодно отличают этот тип генераторов.

Основные недостатки тиристоров - конечное и весьма продолжительное время включения /порядка 10^{-7} с/, а также рабочее напряжение / $U_{\text{раб}} \leq 10^3$ В/. Если первый недостаток в случае ЛИУ приводит к определенному увеличению объема железа МГИ, то второй оказывается трудно преодолимым, поскольку связан с введением в схему МГИ повышающего импульсного трансформатора с коэффициентом трансформации порядка 50-100. В результате макетирования показано, что расчетное повышение напряжения в действительности практически во всех случаях оказывается намного меньшим, причем разница между расчетом и экспериментом возрастает с увеличением коэффициента трансформации. Повышение же напряжения на входе МГИ с одновременным последовательным включением нескольких тиристоров является, на наш взгляд, неоправданным, т.к. связано с неизбежностью тщательного подбора тиристоров и снижением надежности схемы.

Методика разработки входной части генераторов 2 вида несколько сложнее, чем у генераторов 1 вида; остальные звенья работают в тех же режимах. Если

в качестве ключа во входном контуре применен тиристор, то объем железа вычисляется по формуле:

$$V_{\Sigma \min} = \frac{8 \mu_0 P_{\text{и}} \tau_{\text{и}}}{4 \sqrt{10 a \epsilon^2}} \sqrt[4]{\frac{\mu_{\text{нк}} a_{\text{k}} \gamma_{\text{k}}^2}{\prod_{k=1}^4 (1 + \lambda_{k+1}) \Delta B_{\text{k}}^2 \beta_{\text{k}}}} = 23,04 \cdot 10^{-3} \sqrt{T} \text{ м}^3, \quad /3/$$

где T - время, на которое открывается тиристор при подаче запускающего импульса. Оно определяется величинами L_0 и C_0 /рис. 2/ и возможностями тиристора по крутизне нарастания тока.

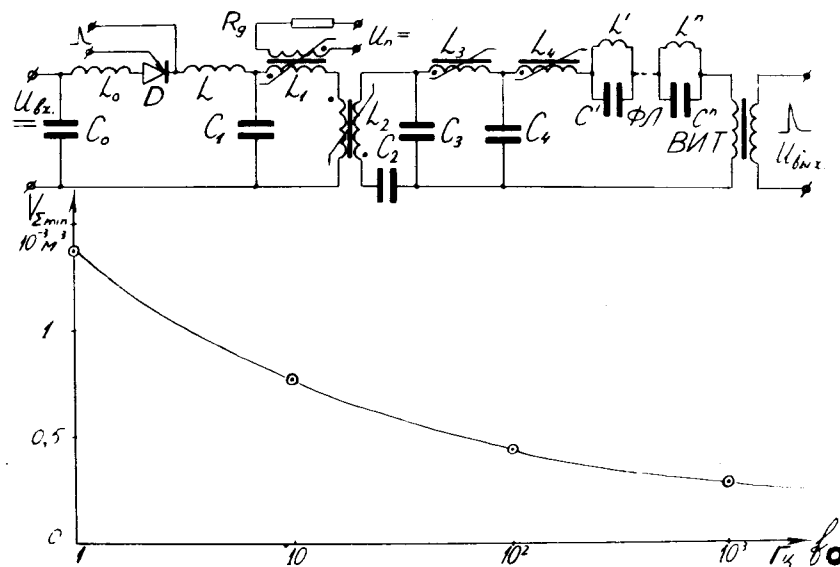


Рис. 2. Схема магнитного генератора импульсов 2 вида и зависимость минимального объема железа $V_{\Sigma \min}$ от частоты f на 1 МВт импульсной мощности.

При применении тиристоров типа ИТЛ можно коммутировать средние токи до 200 А, важно только, чтобы крутизна нарастания тока за первые 5 мкс не превышала 3 А/мкс, в дальнейшем разрешается крутизна 10 А/мкс, по напряжению - 50 В/мкс. Для этого L_0 делается насыщающейся индуктивностью с временем насыщения 5 мкс. Исходя из средней коммутируемой тиристором мощности в 200 кВт /выполнен на металлическом радиаторе с водяным охлаждением/, при 50 Гц и времени работы его 600 мкс /сжатие всех звеньев $\chi_{1,4} = 6$ до выходного импульса с длительностью $\tau_{и} = 0,5$ мкс/, можно коммутировать ток 6 кА, т.е. получать мощность в импульсе $6 \text{ МВт} / U_{\text{max}} U_{\text{вых}} = 1 \text{ кВ}$ без применения звена типа Б/.

Если частота питающего напряжения f_0 Гц /период следования импульсов T_0 мкс/, крутизна нарастания тока тиристора S А/мкс /10 А/мкс/, средний ток через тиристор I_{cp} , А /200 А/, а время работы тиристора T мкс, то все эти величины связаны соотношением:

$$ST^2 f = I_{\text{ф}}, \text{ откуда}$$

$$T = \sqrt{\frac{I_{\text{cp}}}{S \cdot f_0}} = \sqrt{\frac{200 \text{ А} \cdot 10^6 \text{ мкс}}{10 \text{ А/мкс} \cdot f_0}} = 10^3 \cdot 4,48 \frac{1}{\sqrt{f_0}} \text{ мкс} = 10^3 \cdot 4,48 \sqrt{T_0} \text{ мкс}.$$

Тогда из /3/:

$$V_{\Sigma \text{ min}} = 23,04 \cdot 10^{-3} \cdot 0,067 \sqrt[4]{T_0} = 1,385 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{T_0} \text{ м} = \frac{1,385 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[4]{f_0}} \text{ м}^3. \quad /4/$$

Можно построить зависимость объема железа $V_{\Sigma \text{ min}}$ для генератора 2 вида /4/ от частоты следования импульсов / f_0 /рис. 2/. Для генератора мощностью в импульсе 6 МВт на одном тиристоре при частоте следования импульсов 50 Гц и длительностью импульсов 0,5 мкс $V_{\Sigma \text{ min}}$ получается равным $3,3 \text{ м}^3$.

Нами были изготовлены два опытных макета магнитного генератора импульсов 2 вида с тиристорами ИТЛ1-59 и КУ-201Л во входном контуре. При частоте следования импульсов от нескольких герц до единиц килогерц первый генератор имел импульсную мощность $P_{и1} = 18 \text{ кВт}$ /объем железа 16 см^3 /, длительность импульса на уровне 0,5 была равна $\tau_{и} = 0,6$ мкс. Схема его и осциллограммы импульсов по звеньям изображены на рис. 3. Данные схемы:

$U_{\text{вх}} = 100 \text{ В}$, $J_{\text{вх}} = 0,5 \text{ А}$, $L_0 = 170 \text{ мкГн}$, $C_1 = 100 \text{ мкФ}$, $C_2, C_3, C_4 = 0,05 \text{ мкФ}$, D_1 - КУ-201Л, $L_{и1} = 5,7 \text{ мкГн}$, $L_{и2} = 400 \text{ мкГн}$, $L_{и3} = 18 \text{ мкГн}$, $L_{и4} = 0,7 \text{ мкГн}$; $\tau_{и} = 0,6$ мкс; $U_{\text{вых}} = 900 \text{ В}$, $J_{\text{вых}} = 60 \text{ А}$, коэффициент трансформации ИТ $k = 35$.

Сжатие звеньев: $\chi_1 = 6,3$; $\chi_2 = 3$; $\chi_3 = 7$; $\chi_4 = 5$.

Суммарное сжатие генератора $\chi_1 \cdot \chi_2 \cdot \chi_3 \cdot \chi_4 = 400$.

Первые 2 сердечника изготовлены из пермаллоя 50 НП, толщина ленты $\delta = 20 \text{ мкм}$, размеры $50 \times 35 \times 5 \text{ см}^3$ /объемы по $5,3 \text{ см}^3$ /, третий и четвертый - из пермендюра 49КФ-ВМ $\delta = 10 \text{ мк}$ $49 \times 40 \times 10 \text{ мм}^3$ /объемы по $2,7 \text{ см}^3$ /.

Второй МГИ был собран по трехзвенной схеме типа АБА с ключом во входном контуре типа ИТЛ1-59. Работа его предполагалась на частоте 100 Гц и потому для повышения КПД во входном контуре был применен резонансный режим заряда конденсатора C_1 /рис. 4/. Контур $L_0 C_0$ рассчитан на резонансную частоту 100 Гц и катушка индуктивности L_0 имеет в качестве сердечника сталь Э42 с зазором, чтобы избежать насыщения. Осциллограммы импульсов по звеньям приведены на рис. 4. Данные схемы:

$U_{\text{вх}} = 100 \text{ В}$, $J_{\text{вх}} \cdot \text{cp} = 0,5 \text{ А}$, $L_0 = 16,6 \text{ мГн}$, $C_1 = 6 \text{ мкФ}$, $C_2 = 0,3 \text{ мкФ}$, $C_3 = 0,16 \text{ мкФ}$, D_1 - ИТЛ1-59, $L_{и1} = 0,284 \text{ мГн}$, $L_{и2} = 0,91 \text{ мГн}$, $L_{и3} = 0,036 \text{ мГн}$, $\tau_{и1} = 0,6-1,0$ мкс; $U_{\text{вых}} = 1200 \text{ В}$; $J_{\text{вых}} = 20 \text{ А}$, $P_{и} = 24 \text{ кВт}$.

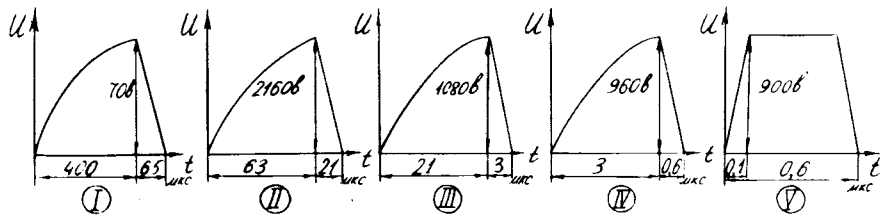
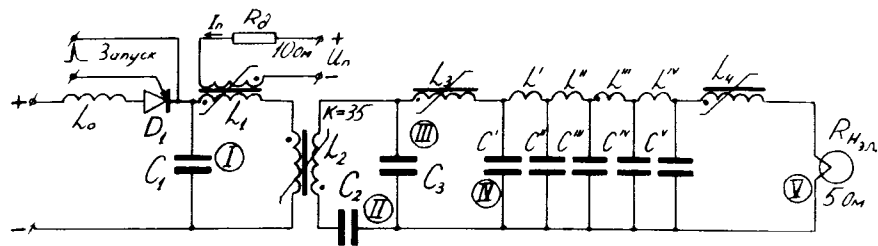


Рис. 3. Принципиальная схема генератора 2 вида на 18 кВт и осциллограммы импульсов по звеньям.

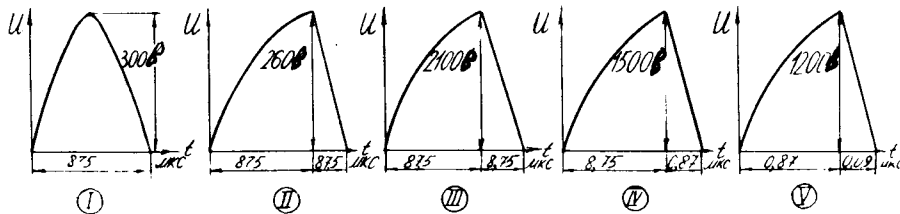
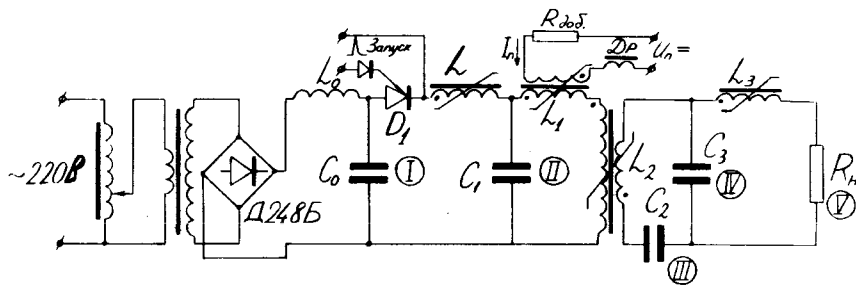


Рис. 4. Принципиальная схема генератора 2 вида на 24 кВт и осциллограммы импульсов по звеньям.

Коэффициент трансформации ИТ $k = 10$.

Сжатие звеньев $\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 10$.

Суммарное сжатие $\prod_{k=1}^3 \chi_k = 1000$.

Все сердечники из пермаллоя 50 НП $\delta = 20$ мм
71x50x20 мм $V_{\Sigma \min} = 120$ см³.

Для уменьшения крутизны начального тока через тиристор в первые 5 мкс при поступлении на его управляющий электрод запускающего импульса от внешнего генератора последовательно с тиристором включалась насыщающаяся катушка L /рис. 4/ с числом витков $w = 72$ на пермалловом торе $\phi 52 \times 30 \times 10$ мм.

Генераторы просты в налаживании и отличаются хорошей стабильностью импульсов во времени. Положение выходного импульса на оси времени регулируется изменением тока подмагничивания первого дросселя.

Рассмотрим теперь проблему получения наносекундного перепада тока в МГИ. По мере уменьшения длительности фронта импульса с одновременным уменьшением длительности импульса до $0,5 \pm 1,0$ мкс значительно возрастают потери энергии сердечников переключающих дросселей, особенно в сердечниках последнего дросселя и выходного импульсного трансформатора /ВИТ/, согласующего выход МГИ с нагрузкой /она обратно пропорциональна времени перемагничивания и прямо пропорциональна объему сердечника/. При очень малой длительности перепада ток намагничивания дросселя становится соизмеримым с величиной среднего тока импульса. Это приводит к искажению формы фронта импульса - появляется пьедестал I_{Δ} длительностью τ_{Π} /рис. 5/.

Так как в насыщенном состоянии дроссель обладает практически постоянной индуктивностью, то при формировании коротких перепадов существенное влияние оказывают паразитные индуктивности и емкости выходного звена, их величины оказываются сравнимыми с параметрами звена и тогда длительность фронта можно оценить по следующей форме:

$$t_{\text{фр}} = t_{\text{д}} + t_{\text{т}} + t_0,$$

/5/

где

$$t_d = \frac{L_{Hn}}{R}, t_T = \frac{L + R^2 C_T}{R}, t_0 = \frac{L_{CX} + R^2 (C_{CX} + C_H)}{R},$$

t_d обусловлено индуктивностью последнего дросселя, t_T определяется параметрами ВИТ, t_0 определяется L_0 и C_0 рассеяния схемы и нагрузки. R - сопротивление нагрузки. L_{Hn} - индуктивность дросселя последнего звена в насыщенном состоянии, L_p - индуктивность рассеяния ВИТ, L_{CX} - паразитная индуктивность схемы и нагрузки, C_T - емкость эквивалентной схемы ВИТ, C_H - емкость нагрузки, C_{CX} - паразитная емкость схемы.

Величина t_0 , определяемая свойствами самой нагрузки, зависит и от коэффициента трансформации выходного ИТ ($K_{ВИТ}$), причем эта зависимость носит такой характер: если L_{CX} и C_{CX} сосредоточены полностью в первичной цепи, то с ростом $K_{ВИТ}$ L_{CX} возрастает, а C_{CX} падает и t_0 меняется от 5 до 50 нс.

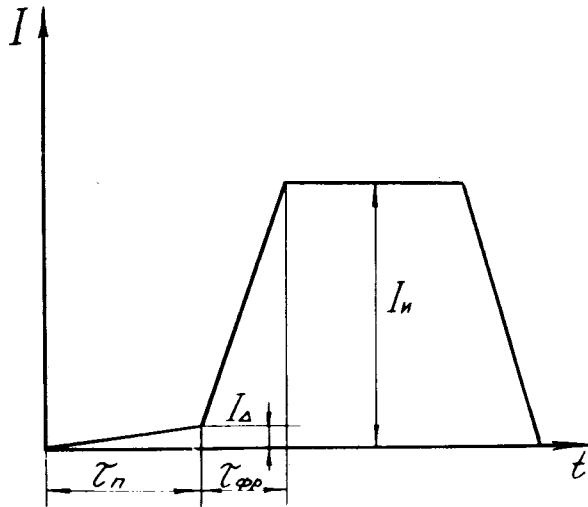


Рис. 5. Импульс тока в МГИ при формировании наносекундного перепада килоамперной амплитуды.

Величина t_T определяется параметрами выходного ИТ, и минимально достижимая величина его - 4-8 нс. Если в схеме МГИ нет выходного ИТ, то $t_T = 0$.

Величина t_d , определяемая в основном толщиной ленты материала сердечника последнего дросселя, связана с постоянной времени вихревых токов t_B через приращение индукции ΔB . Изменение индукции в сердечнике пропорционально сумме J_H и J_B /ток импульса и вихревые токи//2/:

$$\begin{aligned} \Delta B &= \mu_\Delta H = \mu_\Delta 0,4\pi \frac{w_1}{\ell_{ж}} (J_m + J_B) = \\ &= 0,4\pi \mu_\Delta \frac{w_1}{\ell_{ж}} \frac{U_2 \cdot t}{L_1} \left(1 + \frac{2}{x} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-k^2 x}}{k^2} \right) = \\ &= \frac{U_2 t}{S w_1} \left(1 + \frac{2}{x} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1 + e^{-k^2 x}}{k^2} \right) \cdot 10^8, \end{aligned} \quad /6/$$

где

$$x = \frac{t_H}{t_B},$$

U_2 и U'_2 - действительное и приведенное значения напряжения на вторичной обмотке ИТ, t_B - постоянная времени вихревых токов ($t_B = \frac{\sigma_m \mu_\Delta d^2}{\pi}$), σ_m - проводимость, μ_Δ - импульсная магнитная проницаемость, d - толщина ленты.

Постоянная времени t_B непосредственно связана с составляющей коэффициента переключения S_{w0} /вихревые токи/, кроме этой составляющей в S_w входит еще величина коэффициента переключения S_{wc} , определяемая вязкостью ($S_w = S_{w0} S_{wc}$). Уменьшение толщины ленты уменьшает S_{w0} , но при этом уменьшается коэффициент заполнения сердечника ферромагнитным материалом, что приводит к возрастанию μ_H , т.е. к уменьшению отношения L_0/L_H . Это отношение определяет сжатие звена. Ниже значения 5 мкм S_w практически не зависит от d , т.к. при умень-

шении потерь на вихревые токи возрастают потери на вязкость. Коэффициент же заполнения материала сердечника резко убывает. Таким образом, нецелесообразно применение ленты тоньше 10 мкм, т.к. при этом значении d наступает минимум $t_d = 4$ нс. /2/.

Следовательно, существующие в наше время магнитные материалы позволяют получать в различных схемах МГИ при хорошо выполненной монтажной схеме импульсы с длительностью фронта $t_{фр} = t_d + t_T + t_0 = /4 \div 7/ + /4 \div 8/ + /5 \div 50/ = /13 \div 65/$ нс. Эксперименты по формированию наносекундного перепада в генераторах рис. 3 и 4 показали, что при применении в качестве материала сердечников дросселей высококачественного пермаллоя и пермендюра возможно формирование импульса с фронтом 50-60 нс при амплитуде до 100 А.

Необходимо также подчеркнуть, что большое значение имеет индуктивность конденсаторов предпоследнего и последнего звена, не учитываемая формулами /5/. Для получения перепадов меньше 10^{-8} с необходимы малоиндуктивные конденсаторы, собственная индуктивность которых не более единиц нГ/КВИ, К75-35/. Из магнитных материалов, наиболее отвечающих этим требованиям, - пермаллой 79НМ, причем толщина ленты должна быть 10-15 мкм.

Исследование магнитных генераторов импульсов показало, что они работают устойчиво на нагрузку $R_H = 500 \div 1000$ Ом /при этом значении R_H перепад тока имеет длительность $\approx 10^{-8}$ /5-6/ с/. Уменьшение сопротивления R_H и связанное с этим уменьшение волнового сопротивления выходного каскада до 100 Ом ведет к искажению формы импульса - появляется обратный выброс, по амплитуде сравнимый с основным импульсом.

Кроме того, большая потеря мощности, как уже отмечалось выше, происходит в звене, содержащем импульсный трансформатор /звено типа Б/, в котором увеличивается амплитуда импульса до необходимого значения. Здесь не удастся получить коэффициент передачи больше 0,6-0,65.

В заключение авторы благодарят Ю.А.Метелкина за монтаж и наладку магнитных генераторов импульсов.

Литература

1. Л.А.Меерович и др. *Магнитные генераторы импульсов. Сов. Радио, М., 1969.*
2. Ф.В.Лукин. *Импульсные трансформаторы. Радиотехника, т. 2, вып. 4, 1947.*

Рукопись поступила в издательский отдел
6 февраля 1976 года.