

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ЛИУ С МАГНИТНОЙ КОМПРЕССИЕЙ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

Ю.П.Вахрушин, А.П.Куприянов, В.Э.Эрмель, Ю.Н.Яковлев

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им.Д.В.Ефремова, Ленинград

В последнее время возрос интерес к системам магнитной компрессии — магнитным генераторам импульсов, позволяющим формировать импульсы мощностью до единиц ТВт. Магнитные генераторы используются в системах импульсного питания линейных индукционных ускорителей /1+3/, в качестве импульсных источников для систем накачки лазеров /4/, в установках термоядерного синтеза /5/. Применение магнитных генераторов в импульсной системе ЛИУ позволяет использовать серийные коммутаторы в оптимальном для их работы микро-секундном диапазоне длительностей и существенно уменьшить их число, так как реально достижимый коэффициент компрессии импульсов тока достигает значений в несколько десятков единиц.

Особенностью расчёта систем магнитной компрессии большой мощности является уменьшение степени компрессии амплитуды импульсов тока по сравнению со сжатием их во времени, определяемое потерями энергии в звеньях сжатия. В этой связи для более полного описания процесса компрессии целесообразно использовать коэффициент сжатия по времени K^t и коэффициент сжатия по току K^I , которые связаны следующим соотношением:

$$K^I = \sqrt{1 - \frac{\Delta E}{E}} \cdot K^t,$$

где ΔE — величина потерь энергии в звене сжатия; E — энергия, запасаемая накопителем звена. Для однородной схемы МГИ, содержащей звенья типа А,

$$K^t = \sqrt{\frac{\Delta B \tau' U k_{\text{Дср}}}{\pi E \mu_0 \mu_{\text{н}} N}},$$

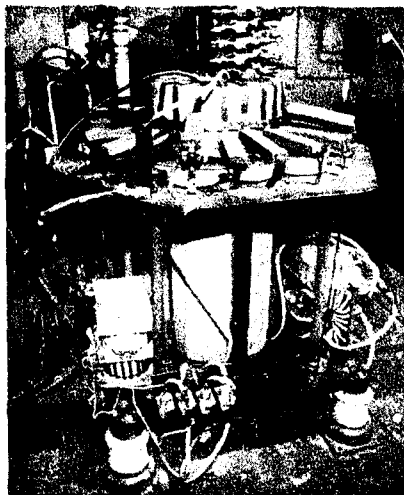
где ΔB — приращение индукции сердечника при перемagnetивании, τ' — время заряда накопителя звена сжатия, U — амплитуда зарядного напряжения звена сжатия, M — характеристическое число, соответствующее числу накопителей в разрядном контуре звена сжатия, $M=1$ для выходного звена сжатия, $M=2$ для промежуточного звена сжатия, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $\mu_{\text{н}}$ — относительная магнитная проницаемость ферромагнетика в насыщенном состоянии, k — коэффициент заполнения сердечника ферромагнитным материалом, $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр сердечника магнитного ключа, N — число веток обмотки магнитного ключа, $\{$ — коэффициент конструктивной паразитной индуктивности звена сжатия:

$$\{ = \frac{L_{\text{к}}}{L''_{\text{МК}}},$$

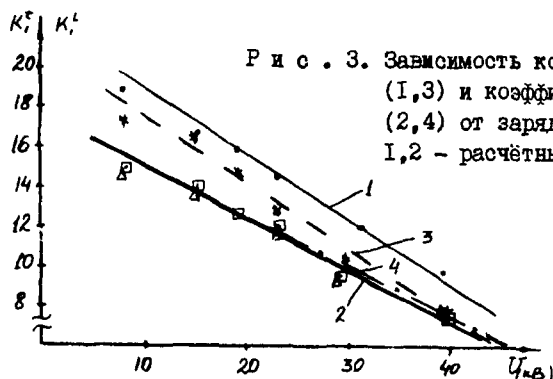
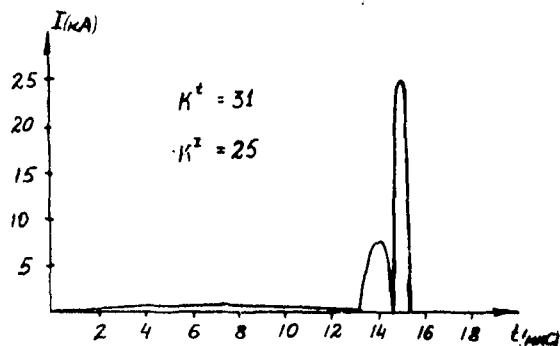
где $L_{\text{к}}$ — суммарная конструктивная индуктивность разрядного контура накопителя звена сжатия при насыщении магнитного ключа, $L''_{\text{МК}}$ — индуктивность насыщения магнитного ключа.

Для проведения уточнённого анализа процесса компрессии разработана программа анализа переходного процесса на ЭЕМ. Реактивные элементы цепи

Р и с . 1. Общий вид опытного макета МИИ.



Р и с . 2. Импульсы тока в звеньях сжатия.



Р и с . 3. Зависимость коэффициента сжатия по времени K^t (1,3) и коэффициента сжатия по току K^I (2,4) от зарядного напряжения U :
1,2 - расчётные, 3,4 - экспериментальные.

аппроксимированы дискретными схемными моделями по методу Адамса-Маултона второго порядка. Магнитные ключи аппроксимированы кусочно-линейными функциями. Анализ системы уравнений равновесия осуществляется в базисе узловых потенциалов.

Исследование процесса компрессии осуществлялось на макете, общий вид которого представлен на рис.1. На разработанном магнитном генераторе импульсов достигнута на активной нагрузке $R = 1 \text{ Ом}$ импульсная мощность 620 МВт при выходном напряжении 25 кВ и длительности импульса 300 нс, на уровне 0,5. Коэффициент сжатия по времени составил 31, коэффициент сжатия по току - 25. На рис.2 представлены импульсы тока в звеньях сжатия. Полученные расчётные характеристики отличаются от экспериментальных на 10-15% по амплитуде токов. На рис.3 представлены расчётные и экспериментальные зависимости коэффициентов сжатия по току и по времени в зависимости от зарядного напряжения.

Особенностью работы МИИ является зависимость времени задержки выходного импульса t_{zag} относительно синхроимпульса запуска начального коммутатора от величины зарядного напряжения и токов размагничивания магнитных ключей.

Приращение времени задержки магнитным ключом Δt_{zag} :

$$\Delta t_{zag} = \frac{A \Delta B N k}{U} - \frac{\tau'}{2}.$$

Экспериментальные значения временной нестабильности выходного импульса: от зарядного напряжения - ξ_U ,

$$\xi_U = \frac{\Delta t_{zag}}{\Delta U},$$

где ΔU - приращение зарядного напряжения, составляет $\xi_U = 0,35$ мкс/кВ и тока размагничивания магнитных ключей - ξ_I

$$\xi_I = \frac{\Delta t_{zag}}{\Delta I},$$

где ΔI - приращение тока размагничивания, составляет $\xi_I = 0,3$ мкс/А для первого звена сжатия, $\xi_I = 0,12$ мкс/А для второго звена сжатия.

Проектирование МИИ большой мощности, позволяющих формировать импульсы тока с параметрами, характерными для систем импульсного питания ЛИУ, связано с разработкой конструкции звеньев сжатия, обеспечивающей низкую остаточную индуктивность. При коммутации больших мощностей паразитные индуктивности элементов звеньев сжатия и элементов их электрического подсоединения становятся соизмеримыми с индуктивностями насыщения магнитных ключей, а для выходного звена - значительно превышают последние и тем самым в основном определяют уровень коммутируемой мощности и значения коэффициентов сжатия МИИ.

Снижение паразитных индуктивностей разрядных контуров звеньев сжатия магнета МИИ достигнуто применением крупногабаритных сердечников для магнитных ключей и аксиально-симметричной компоновкой элементов звена сжатия.

Л и т е р а т у р а

1. Анашкин А.И., Вахрушин Ю.П., Караморин В.М., Хальчицкий Е.Н. Импульсная система наносекундного линейного индукционного ускорителя электронов. В кн.: Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Материалы Всесоюзной конференции (3-5 сентября 1975г.) - Томск: изд.Томского политехн. ин-та, 1975, с.103.
2. Анашкин А.И., Жестков С.Н., Эрмель В.Э. Корректор формы импульса ускоряющего напряжения для линейного индукционного ускорителя ЛИУ-5/5000. - Вопросы атомной науки и техники. Сер.:Линейные ускорители, 1977, вып.1/4/, с.25.
3. Долбилов Г.В., Красных А.К., Разувакин В.Н. Исследование звеньев сжатия и нелинейных схем формирования в модуляторе линейного индукционного ускорителя. - Приборы и техника эксперимента, 1984, №4, с.26.
4. Агеев В.П., Кононов В.И., Поляков Н.П. и др. Использование магнитного генератора импульсного напряжения для возбуждения импульсно-периодического CO₂-лазера. - Письма в ЖТФ, 1979, т.5, вып.12, с.753.
5. "Comet-II" A two-stage, magnetically switched pulsed-power module./ E.h.Nean, T.L.Woolston, K.I.Penn - "IEEE Conf.Rec. 16th Power Modulat. Symp., 1984, New York, N.Y., 1984, 292-294.