

## 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 микросекундном диапазоне длительностей и существенно уменьшить их число, так как реально достижимый коэффициент компрессии импульсов тока достигает значений 1-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  $\Delta E$  - величина потерь энергии в звене сжатия;  $E$  - энергия, запасаемая накопителем звена. Для однородной схемы МГИ, содержащей звенья типа А,

$$K^t = \sqrt{\frac{M_1 B \zeta' V k D_{cr}}{\mathcal{P} E_{no} \mu_0 \mu_{nr} N^2}},$$

где  $\Delta B$  - приращение индукции сердечника при перемагничивании,  $\zeta'$  - время заряда накопителя звена сжатия,  $V$  - 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,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_{nr}$  - относительная магнитная проницаемость ферромагнетика в насыщенном состоянии,  $k$  - коэффициент заполнения сердечника ферромагнитным материалом,  $D_{cr}$  - средний диаметр сердечника магнитного ключа,  $N$  - число витков обмотки магнитного ключа,  $\{$  - коэффициент конструктивной паразитной индуктивности звена сжатия:

$$\{ = \frac{L_K}{L_{M_K}},$$

где  $L_K$  - суммарная конструктивная индуктивность разрядного контура накопителя звена сжатия при насыщении магнитного ключа,  $L_{M_K}$  - индуктивность насыщения магнитного ключа.

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

Рис. 1. Общий вид опытного макета МИ.

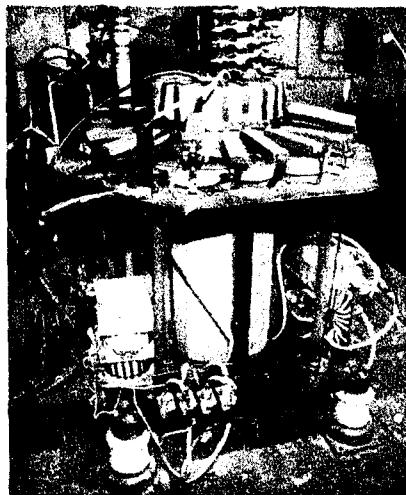
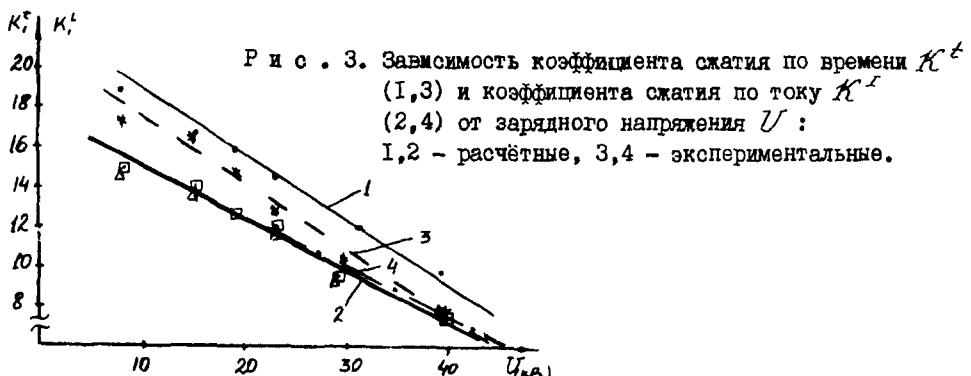
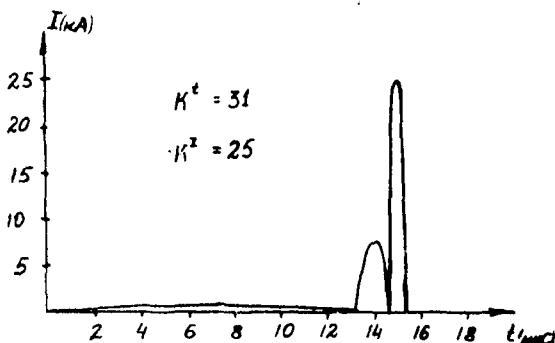


Рис. 2. Импульсы тока в звеньях сжатия.



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  $R=1$  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 МИ является зависимость времени задержки выходного импульса  $t_{zad}$  относительно синхроимпульса запуска начального коммутатора от величины зарядного напряжения и токов размагничивания магнитных ключей.

Приращение времени задержки магнитным ключом  $\Delta t_{zad}$ :

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

Экспериментальные значения временной нестабильности выходного импульса: от зарядного напряжения -  $\xi_U$ ,

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

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

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

где  $\Delta I$  - 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 МИ 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 МИ.

Снижение паразитных индуктивностей разрядных контуров звеньев сжатия макета МИ 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. Анацкий 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 1975 г.) - Томск: изд. Томского политехн. ин-та, 1975, с.103.
2. Анацкий 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. I/4, с.25.
3. Долболов 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  $CO_2$ -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.