

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3366/83

24/6-83
P9-83-193

Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.Н.Разувакин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВАРИАНТА МОДУЛЯТОРНОЙ ЧАСТИ
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Направлено в журнал "ПТЭ"

1983

ВВЕДЕНИЕ

При построении модуляторной части линейных индукционных ускорителей /ЛИУ/ наносекундного диапазона одной из острых проблем /как и вообще в наносекундной импульсной технике/ является проблема коммутатора, обладающего высокими технико-эксплуатационными характеристиками. В этой связи разработчики вынуждены искать технические решения, направленные на устранение пробела. Ниже излагается идеология одного из таких направлений, приведены экспериментальные результаты исследований, выявлены особенности рассматриваемого здесь построения импульсной части ЛИУ. Показано, что высокий коэффициент передачи энергии от первичного накопителя к пучку является также отличительной особенностью этой концепции.

В импульсной технике известно направление, в котором для формирования наносекундных импульсов используются в сочетании с линейными участками и нелинейные, причем их заряд осуществляется от так называемых магнитных генераторов импульсов /см., например, $1/2/$ /. Принцип работы схем этого направления следующий. С помощью "медленного" коммутатора создается исходный импульс колоколообразной формы. За счет использования нелинейных свойств ферромагнитных материалов осуществляется увеличение мощности импульса во времени и пространстве с помощью каскадов /звеньев/ сжатия. Эту часть схемы иногда называют задающей. Задающая часть подсоединена к формирующей через нелинейный переключающий дроссель. Формирующая часть /формирующая линия/ содержит нелинейные участки и участки с постоянными параметрами. В ней происходит формирование наносекундного импульса. Перекачка энергии из задающей части в формирующую и формирование импульса осуществляются за счет разности скоростей распространения волн по линейному и нелинейному участкам, причем, когда большая часть энергии будет сосредоточена в формирующей линии, нелинейный участок превращается в линейный, и на нагрузке формируется импульс наносекундной длительности. Фронт импульса здесь определяется длительностью фронта ударной волны, формируемой в процессе заряда нелинейного и линейного участков. Напомним, что он обратно пропорционален величине магнитного поля ударной волны H_y и при $H_y = 200 \div 250$ А/см составляет около $1,5 \div 2$ нс для ферритов типа НН и ВТ. В работе $1/$ описан наносекундный генератор рассматриваемого класса на выходную мощность 0,25 МВт.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАДАЮЩЕЙ ЧАСТИ СХЕМЫ

Задающая часть схемы состоит из последовательной цепочки звеньев сжатия. Принцип работы и методика расчета изложены в [2,3].

Как правило, интерес представляют реально получаемые коэффициенты сжатия мощности и к.п.д. звеньев сжатия. Для определения характерных величин этих параметров была собрана схема, приведенная на рис.1. В качестве исходного ключа К использовался тиратрон ТГИ1-2500/50. Мы располагали также конденсаторами C_{1-4} типа ИМН-100-0,1 и сердечниками индукторов от ЛИУ-5/5000^{6/}, выполненными из пермаллоя 50НП толщиной ленты $\delta = 10$ мкм. В первых экспериментах звено сжатия, состоящее из дросселя Dr_4 и конденсатора C_5 , не подключалось. Величины емкостей конденсаторов C_{1-4} были примерно одинаковы и равны 0,1 мкФ. Величина индуктивности Dr_1 составляла около 730 мкГ и была выбрана так, чтобы полупериод колебания тока в первом контуре не превышал 20 мкс /это предельная паспортная длительность тока, проходящего через тиратрон, хотя в нашем случае по величине тока он явно недоиспользован/. Число индукторов и число витков дросселей Dr_2 и Dr_3 составляло соответственно: 2×25 и 3×3 . Демпфирующая цепочка, состоящая из последовательно включенных диодов Д /Д247Б/ на напряжение до 40 кВ и сопротивления R/ТВО-60, 24 Ом/, обеспечивала устойчивый режим работы схемы.

От внешнего источника питания I заряжается емкость C_1 . В момент окончания заряда задающий генератор II формирует стартовый импульс на сетке тиратрона К. Заряженная емкость C_1 через Dr_1 и тиратрон К резонансно передает энергию на C_2 . В момент заряда C_2 часть тока протекает по C_3 и Dr_2 . В момент времени, когда большая часть энергии сосредоточена в C_2 , переключающий дроссель срабатывает, и емкость C_2 резонансно разряжается через Dr_2 на C_3 . Собственные частоты звеньев сжатия отличаются друг от друга так, что энергия из C_1 последовательно перекачивается в C_2, C_3 и т.д. С помощью блока размагничивания III выбирается начальная рабочая точка на петле гистерезиса материала переключающих дросселей.

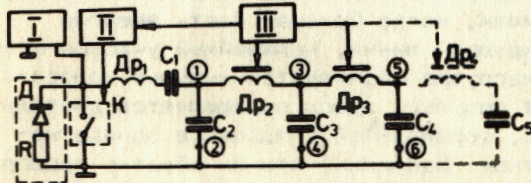


Рис.1.

тиратрона. Развертка по горизонтали - 5 мс/см. Чувствительность по вертикали - 25 А/см.

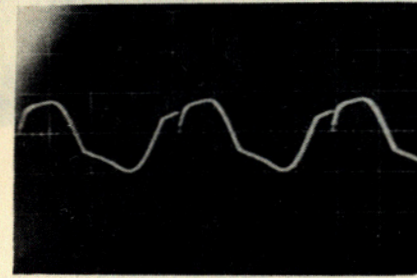


Рис.2

На рис.2 приведена осциллограмма тока размагничивания в Dr_2 и Dr_3 . На ней видны моменты времени срабатывания тиратрона. Осциллограмма иллюстрирует временную синхронизацию фазы тока размагничивания с током тиратрона. Развертка по горизонтали - 500 нс/см. Чувствительность по напряжению - 8 кВ/см, по току - 920 А/см. Из осциллограмм видно, что суммарный коэффициент сжатия по мощности двух звеньев составляет около 20. Амплитуда тока заряда C_4 составляет около 4,6 кА. Емкость 0,1 мкФ заряжается за время 1 мкс. Вариацией параметров дросселя Dr_3 /сечение и число витков/ увеличить суммарный коэффициент сжатия не удавалось. Следует заметить, что процесс установления напряжения на C_4 носит сложный характер. Возможно, что такая форма нарастания напряжения зависит от качества выполнения сердечников. Этот факт вносит свои коррективы в коэффициент сжатия звена.

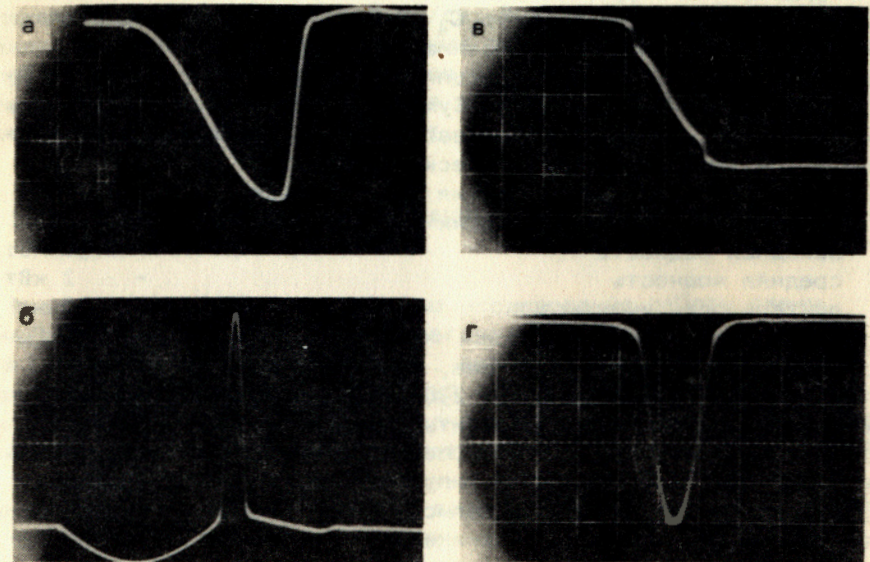


Рис.3

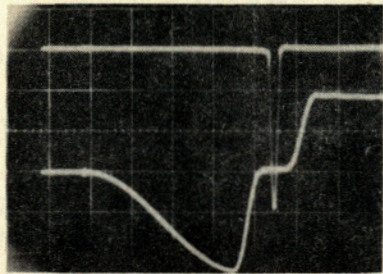


Рис. 4

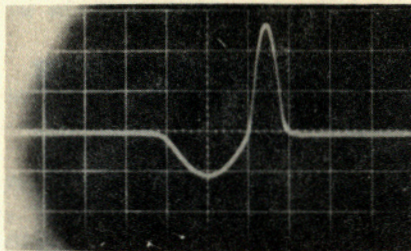


Рис. 5

На рис. 4 приведена совмещенная осциллограмма изменения тока в точке 6 и напряжения в точке 1 схемы в случае короткого замыкания в конденсаторе C_4 . Развертка по горизонтали - 5 мкс/см. Чувствительность по току /верхний луч/ - 1,82 кА/см. Амплитуда напряжения в точке 1 - около 34 кВ. Видно, что в Дрз амплитуда тока достигает 7,3 кА. Длительность импульса тока - около 1 мкс.

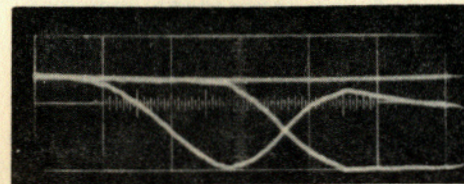
Дальнейшее подключение звеньев сжатия с использованием конденсаторов типа ИМН-100-0,1 нерационально из-за большой их собственной индуктивности.

Была предпринята попытка подключить звено сжатия Др₄, C_5 с целью перехода в наносекундный диапазон по длительности. В этом случае в качестве C_4 и C_5 использовались конденсаторы К-15-10, 4700 х 50 кВ. В качестве Др₄ использовались три сердечника от ЛИУ-5/5000. Конструктивно цепочка была разбита на 18 равномерно расположенных секций. Контур C_4 , Др₄, C_5 образовал один виток. На рис. 5 приведена осциллограмма изменения тока в точке 6 одной из секций. В каждой секции амплитуда тока разряда из C_4 в C_5 составляет около 620 А. Суммарный ток - около 11 кА. Длительность тока заряда C_5 составляет 500 нс. В результате схема имела следующие электротехнические параметры:

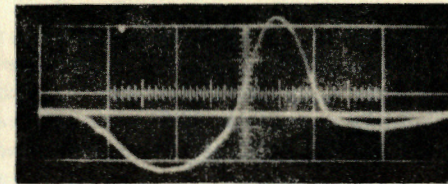
суммарный коэффициент сжатия трех звеньев	-	50
коэффициент передачи энергии	-	0,5
выходная мощность	-	90 МВт
средняя мощность	-	2 кВт
длительность импульса	-	500 нс
частота посылок импульсов	-	50 Гц

Отметим, что амплитуда тока, проходящего через тиратрон, в этом случае составляла всего 230 А. Таким образом, при необходимости есть возможность увеличить выходную мощность до 1 ГВт. Этого можно достичь за счет использования 80 штук пермаллоевых сердечников, выполненных по типу индукторов ЛИУ 5/5000.

Экспериментально исследовались звенья сжатия и в наносекундном диапазоне. Проблемы, возникающие при работе в этом диапазоне на высоких уровнях мощности, - узкая номенклатура конденсаторов с высокой удельной энергоемкостью и отсутствие качест-



а



б

Рис. 6

венных пермаллоевых сердечников. В наших экспериментах использовались керамические конденсаторы К-15-10, 10 нФ х 40 кВ, материалом переключающих дросселей служили ферритовые кольца 200 НН /или 600 НН/. Указанные конденсаторы обладают сравнительно высокой удельной энергоемкостью и малой собственной индуктивностью. Исследовались разные типоразмеры ферритовых колец /180х110х20, 100х60х15, 125х80х12/. Экспериментально наблюдаемые коэффициенты сжатия звена К на мощностях 30 МВт - около 2. Эта величина примерно в 2 раза меньше расчетной по методике работы^{3/}. Значительное отклонение К от расчета связано с рядом факторов. Один из них - влияние паразитной индуктивности монтажа элементов на работу звена.

На рис. 6а приведены совмещенные осциллограммы изменения напряжений на конденсаторах звена сжатия, на рис. 6б - осциллограмма изменения тока в предпоследнем конденсаторе. Развертка по горизонтали - 100 нс/см. Чувствительность по напряжению и току соответственно 16 кВ/см и 1,8 кА/см. В этом эксперименте использовались три параллельно включенных дросселя, каждый из которых выполнен из шести ферритовых колец К 100х60х15 и содержал пять витков. При сокращении числа переключающих дросселей сжатия в звене практически не происходит.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЗАДАЮЩЕЙ ЧАСТИ СХЕМЫ И ФОРМИРУЮЩЕЙ ЛИНИИ

В отличие от^{1/}, было проведено исследование работы схемы, приведенной на рис. 7.^{7/} Здесь нагрузка /индуктор 1/ и плечи 2 и 3 образуют формирующую часть, которая через переключающий дроссель 4 подсоединена к задающей части 7, содержащей каскады сжатия 6. Формирующая часть выполнена по типу Blumlein, но плечо 2 представляет нелинейную короткозамкнутую часть схемы. В моменты времени резонансной перекачки энергии из емкости 5 - последнего звена сжатия - через дроссель 4 в линии 2 и 3 скорость распространения фронта волны в линии 2 будет в несколько раз меньше, чем в 3. К моменту времени, когда значительная часть энергии сосредоточена во 2-й и 3-й линиях, нелинейный участок

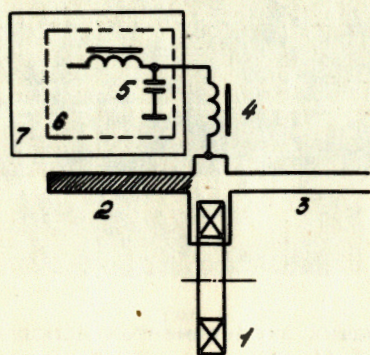


Рис. 7

превращается в линейный. Далее на нагрузке 1 происходит формирование импульса обычным для Blumlein образом. В этой схеме, так же как и в схеме работы ¹¹, полная передача энергии из емкости 5 в линии 2 и 3 невозможна потому, что нелинейный участок в момент его зарядки ведет себя как переменная емкость с потерями, которая добавляется к распределенной емкости 3. Эквивалентная схема для интервала времени, когда энергия емкости последнего звена 5 резонансно перекачивается

в формирующую часть схемы, приведена на рис.8. Элементы 1, 2, 3 и 4 образуют резонансный контур, в котором заряженная до U_0 емкость 2 подключается к индуктивности 3 и емкости 4 при замыкании ключа 1. Емкость 4 - эквивалентная емкость линейного участка цепи формирования и одновременно - возрастающая во время зарядки емкость нелинейного участка. Сопротивление 5 учитывает потери энергии на перемагничивание нелинейного участка. На рис.9 приведены экспериментальные зависимости коэффициента передачи энергии η от величины относительного сопротивления R/ρ для разных значений C_1/C_2 , где C_1 и C_2 - величины емкостей 2 и 4, ρ - волновое сопротивление контура. Экспериментально реализуемые η для рассмотренной схемы могут составлять $0,5 \div 0,8$.

На рис.10 приведены экспериментальные зависимости коэффициента передачи по напряжению для схемы, изображенной там же. Цифрами обозначены зависимости коэффициентов передачи по напряжению для соответствующих точек схемы. В этой схеме макетировалась работа последнего звена сжатия задающего контура на формирующую часть, состоящую из линейного L_1 , нелинейного L_2 плеч и последовательно включенной активной нагрузки R_H . Вместо переключающего нелинейного дросселя использовался тиратрон ТГИ1-2500/50 /элемент К/. Параметры схемы брались следующими. Величина емкости C составляла 2,2 нФ. Величина емкости плеча L_1 - 1,5 нФ.

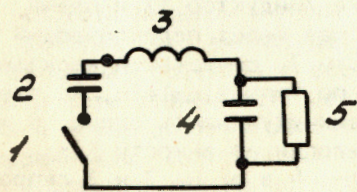
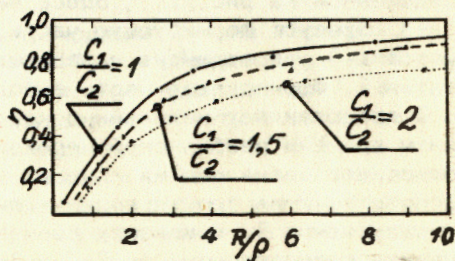


Рис. 8

Рис. 9



Волновое сопротивление $L_1, \rho_{L1} = 25 \text{ Ом}$. Волновое сопротивление ρ_{L2} нелинейной части L_2 без учета намагниченности ⁴ - 21 Ом. Путем изменения величины индуктивности L схема настраивалась так, чтобы к моменту перехода тока от задающего контура через нулевое значение ферритовые кольца в линии L_2 полностью перемагничивались. Типичная осциллограмма импульса напряжения на нагрузке приведена на рис.11. Развертка по горизонтали - 100 нс/см, чувствительность по вертикали - 8 кВ/см. Отсюда видно, что схема формирует импульс на нагрузке, длительность которого на полувысоте составляет около 30 нс. Длительность полупериода задающего контура составляет 200 нс. Фронт импульса на нагрузке определяется фронтом ударной электромагнитной волны, образующейся в L_2 . Анализ результатов показывает, что коэффициент передачи энергии из C в R_H составляет около 20%. Большая часть энергии рассеивается в R_H - момент зарядки формирующей части схемы.

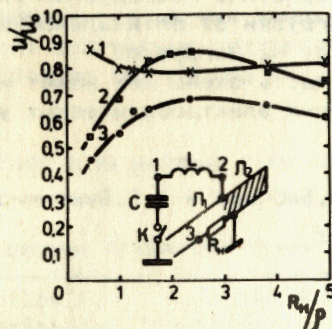
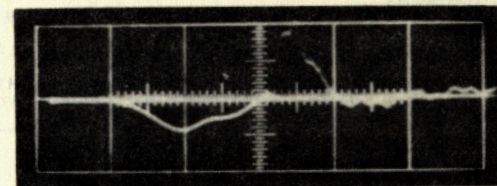


Рис. 10

Рис. 11



Из приведенной на рис.10 зависимости $\frac{U_H}{U_0} = f\left(\frac{R_H}{\rho}\right)$ видно, что напряжение на нагрузке имеет максимум при $\frac{R_H}{\rho} = 2$. При рассогласовании схемы в диапазоне $\frac{R_H}{\rho} = 1 \div 6$ это напряжение изменяется всего на $15 \div 20\%$.

Проведено технико-экономическое сравнение рассматриваемого варианта модуляторной части линейного индукционного ускорителя с модулятором СИЛУНД ⁵. Анализ проведен по стоимости основных элементов /тиратроны, конденсаторы, ферромагнитные материалы/ в пересчете на один индуктор. Выходные параметры модуляторной части принимались одинаковыми. Анализ показывает, что затраты на указанные элементы для обоих вариантов примерно одинаковы в пересчете на один индуктор. Однако коэффициент передачи энергии от накопителя к нагрузке в рассматриваемом варианте примерно в 3-4 раза выше.

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показали, что коэффициент сжатия в микросекундном диапазоне может составлять $6 \div 8$, если использовать индукторы ЛИУ в качестве сердечников переключающих дросселей. При неизменном типоразмере сердечников коэффициент сжатия падает от одного звена к другому. Коэффициент передачи энергии в диапазоне мощностей нескольких мегаватт составляет $0,8 \div 0,9$.

Типичные коэффициенты сжатия в наносекундном диапазоне /до 100 нс/ составляют $1,5 \div 3$, при этом передаваемая энергия от звена к звену может составлять 10 Дж.

Экспериментально исследована работа модифицированной схемы двойной формирующей линии, содержащей открытое линейное и нелинейное короткозамкнутое плечи. Заряд линий осуществлялся от магнитных звеньев сжатия. Реализуемый коэффициент передачи энергии от емкости последнего звена сжатия к формирующей линии может составлять $\approx 0,6$. Нагрузочная характеристика исследуемой схемы имеет максимум, причем расстройка нагрузки от оптимальной величины несущественно влияет на амплитуду на нагрузке.

Рассмотренная здесь модуляторная часть схемы ЛИУ может найти применение также в цепях питания других электрофизических устройств.

Авторы выражают благодарность В.И.Бабчику и А.С.Биктимирову за помощь в подготовке экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубнев А.И. и др. ПТЭ, 1976, №3, с. 145.
2. Меерович Л.А. и др. В кн.: Магнитные генераторы импульсов. "Советское радио", М., 1968.
3. Катаев И.Г. и др. Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1974, 17, №12, с. 40.
4. Долбилов Г.В., и др. ОИЯИ, 9-83-78, Дубна, 1983.
5. Гитт В.Д. и др. ОИЯИ, Р9-5601, Дубна, 1971.
6. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. В кн.: Линейные индукционные ускорители. Атомиздат, М., 1978, с. 152.
7. Красных А.К. В кн.: Коллективные методы ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с. 136.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 марта 1983 года.

Долбилов Г.В., Красных А.К., Разувакин В.Н. Р9-83-193
Экспериментальное исследование варианта модуляторной части
линейного индукционного ускорителя

Рассмотрена модуляторная часть линейного индукционного ускорителя /ЛИУ/ с применением магнитных звеньев сжатия мощности и нелинейных схем формирования. Целью работы было экспериментальное определение коэффициентов сжатия и коэффициентов передачи энергии в звеньях, содержащих дроссели, выполненные на базе индукторов ЛИУ-5/5000, а также ферритовых колец. Из анализа приведенных осциллограмм получены характерные величины коэффициентов сжатия звеньев и коэффициентов передачи энергии. Анализ полученных результатов позволяет рационально подойти к построению модулятора ЛИУ.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Dolbilov G.V., Krasnykh A.K., Rasuvakin V.N. Р9-83-193
Experimental Investigation of a Version of Modulator Part
of Linear Induction Accelerator

The construction of modulator of the linear induction accelerator (LIA) with the use of the magnetic power Melville lines and nonlinear pulse lines is considered. The aim of the work is experimental determination of the compression and energy transfer coefficients in the Melville lines containing choking coils designed on the base of inductor cores of LIA-5/5000 and also on the basis of ferromagnetic rings. The typical values of the compression and energy transfer coefficients in the Melville lines were obtained from the analysis of the given oscillogrammes. The analysis of the obtained results will permit to proceed rationally to the construction of LIA modulator.

The investigation has been performed at the Department of New Methods and Acceleration, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.