

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-86-156

Г.В.Долбилов, В.И.Казача, В.П.Саранцев,
А.И.Сидоров

**МОДУЛЯТОР
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ ЛУЭК-20**

Направлено в журнал "Приборы и техника
эксперимента"

1986

В работе дается описание мощного модулятора (генератора импульсов ускоряющего напряжения) линейного индукционного ускорителя ЛУЭК-20. Модулятор выполнен с применением нелинейных схем усиления мощности путем сжатия электромагнитной энергии во времени. Проектные параметры модулятора:

1. Выходное напряжение на нагрузке $R_H = 0,5 \text{ Ом}$ $U_H = 50 \text{ кВ}$.
2. Ток нагрузки $I_H = 100 \text{ кА}$.
3. Длительность импульса $70+80 \text{ нс}$.

Модулятор предназначен для запитки одной ускоряющей секции, состоящей из 36 индукторов, с целью получить напряженность ускоряющего поля в пучке $E = 10 \text{ кВ/см}$. В качестве коммутатора используется один тиратрон ТГИ-2500/50. В работе приведены результаты наладки одной из параллельных ветвей схемы модулятора.

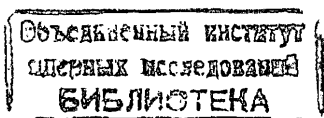
Впервые идея увеличения мощности - сжатие электромагнитной энергии во времени - была высказана Мелвилем ^{/1/} и применена к радарным модуляторам для генерации мощности 150 кВт, которые впоследствии стали называть магнитными импульсными модуляторами. Попытки использовать их в ЛИУ наносекундного диапазона ($< 500 \text{ нс}$) не приводили к желаемым результатам ^{/2/}. Этому препятствовали большой требуемый уровень энергии и малая эффективность традиционных схем сжатия в наносекундной области длительностей импульсов. Первое сообщение об успешном использовании магнитного импульсного модулятора в ЛИУ наносекундного диапазона появилось в 1979 г. ^{/3/}. Модулятор ускорителя СИЛУНД-П развивал мощность на уровне 600 МВт (мощность в пучке $\sim 400 \text{ МВт}$). Впоследствии его мощность была доведена до 1,2 ГВт ^{/4/}.

Дальнейшее развитие в области магнитных модуляторов было достигнуто в разработках ЛИУ наносекундного диапазона СИЛУНД-20 ^{/5/}, АТА ^{/6/}, ЛУЭК-20 ^{/7/}.

Конструкция и схема модулятора

Конструкция модулятора, предназначенного для запитки одной ускоряющей секции ЛУЭК-20, показана на рис. 1: 1 - коммутатор; 2 - накопительная емкость; 3 - каскад предварительного усиления мощности в микросекундном диапазоне; 4 - оконечные каскады усиления импульсной мощности в наносекундном диапазоне и формирования прямоугольной формы импульса; 5 - нелинейные линии (обострители фронта); 6 - индукторы.

Принципиальная схема модулятора приведена на рис. 2, где цифрами обозначены части схемы, конструктивное расположение которых показано на рис. 1. Работа схемы складывается из нескольких последовательно протекающих процессов. Перед подачей запускающего импульса на тиратрон ТГИ-2500/50 через схему пропускается импульс размагничива-



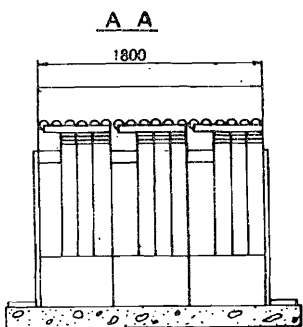
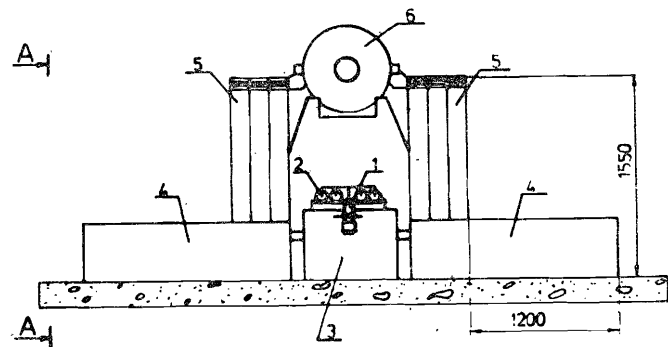


Рис. 1. Конструкция модулятора.

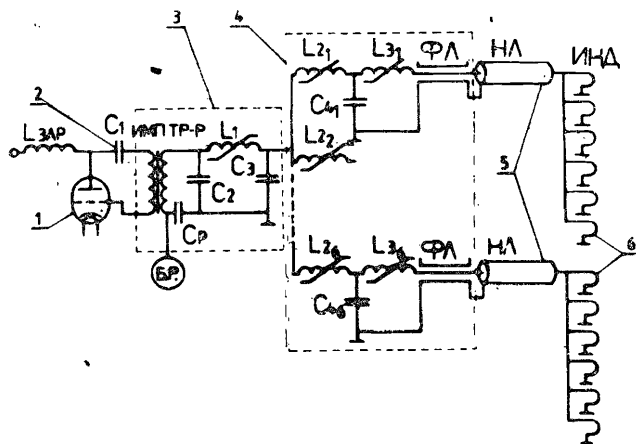


Рис. 2
Принципиальная
схема модулятора.

щего тока (вырабатывается импульсным блоком размагничивания БР) обратной основному току полярности с целью получения максимального изменения индукции в переключающих дросселях цепей сжатия и в сердечниках индукторов. Через некоторое время в области отрицательного значения тока размагничивания (\mathcal{J} отрицательное $\ll \mathcal{J}_{\text{max}}$ положительной подволны) запускается тиратрон и энергия, накопленная в C_T , перекачивается через повышающий импульсный трансформатор (1:3) в C_2 . В максимуме зарядного напряжения на C_2 дроссель L_1 насыщается и энергия из C_2 передается в C_3 и т.д. В соответствующий момент энергия из C_3 передается в шесть соединенных параллельно оконечных каскадов усиления импульсной мощности и формирования прямоугольной формы импульса, в которых емкости C_{4K} , формирующие линии (ФЛ) и нелинейные линии (НЛ) выполнены в виде элементов с распределенными параметрами. Для каждого из шести оконечных каскадов $C_{4K} = C_{\text{ФЛ}} + C_{\text{НЛ}}$, где $K = 1, 2, \dots, 6$; $C_{\text{ФЛ}}$ - емкость одной формирующей линии; $C_{\text{НЛ}}$ - суммарная емкость нелинейных линий, используемых в одном оконечном каскаде. Параметры L_{2K} ($K = 1, 2, \dots, 6$) выбираются таким образом, чтобы передача энергии в формирующую линию начиналась в максимуме напряжения на C_{4K} и практически заканчивалась к моменту, когда волна напряжения, распространяющаяся по нелинейной линии (во время зарядки), отразившись от нагрузки, вернется к началу нелинейной линии. В этом случае почти вся энергия, первоначально накопленная в C_T , выделяется на нагрузке и формируется импульс напряжения прямоугольной формы.

Количественные соотношения для параметров модулятора

выражения, определяющие процессы в цепях сжатия, в основном, известны [8], однако целесообразно привести более простые соотношения для параметров модулятора, поскольку точное значение параметров можно установить лишь при экспериментальной отладке модулятора. Можно показать, что объем ферромагнитного материала в дросселе n -й цепи сжатия

$$V = \frac{(\tau_{\text{зар}}^{C_n})^2}{(\tau_{\text{разр}}^{C_n})^2 - \tau_0^2} \cdot \frac{U_0^2 C_n}{2} \cdot \frac{\pi^2 M_{\text{нас}}}{4 (\Delta B)^2} \frac{1}{2} \frac{D+d}{D-d} \ln \frac{D}{d}, \quad (I)$$

где $\tau_{\text{зар}}^{C_n} = \pi \left(\frac{C_n}{2} L_{n-1}^{\text{нас}} \right)^{1/2}$ - время зарядки емкости C_n ; $L_{n-1}^{\text{нас}}$ - значение индуктивности дросселя L_{n-1} в насыщенном состоянии; $\tau_{\text{разр}}^{C_n} = \pi \left(\frac{C_n}{2} L_n^{\text{нас}} \right)^{1/2}$ - время разрядки C_n (или зарядки C_{n+1}); $L_n^{\text{нас}}$ - значение индуктивности дросселя L_n в насыщенном состоянии; $\tau_0 = \pi \left(\frac{C_n}{2} L_0 \right)^{1/2}$; L_0 - индуктивность контура $C_n - L_n - C_{n+1}$ в отсутствие дросселя L_n ; U_0 - максимальное напряжение на C_n ;

ΔB - изменение индукции в сердечнике дросселя l_n ; D, d - внешний и внутренний диаметры сердечника в дросселе l_n ; $\mu_{нас}$ - магнитная проницаемость сердечника l_n в насыщенном состоянии.

Для цепей сжатия, в которых используются емкости, выполненные в виде элементов с распределенными параметрами,

$$l_n^{нас} \gg l_0. \quad (2)$$

Кроме того, если в качестве ферромагнитного материала использовать ферриты, для которых

$$\frac{1}{2} \frac{D+d}{D-d} \ln \frac{D}{d} = 1, \quad (3)$$

тогда выражение (I) для суммарного объема ферромагнитного материала в дросселе цепи сжатия упрощается:

$$V = \left(\frac{\tau_{зар}^{сн}}{\tau_{разр}^{сн}} \right)^2 \frac{U_0^2 C_n}{2} \frac{\pi^2 \mu_{нас}}{4 (\Delta B)^2}, \quad (4)$$

и определяется только первоначально запасенной энергией, свойствами ферромагнитного материала и квадратичной зависимостью от требуемого коэффициента увеличения мощности:

$$\frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{\tau_{зар}^{сн}}{\tau_{разр}^{сн}} = \left(\frac{l_n^{нас}}{l_n} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

С целью получения прямоугольного импульса на нагрузке и выполнения условий процесса увеличения мощности в оконечных каскадах должны быть выполнены следующие требования:

1. $\tau_{зарядки}^{ФЛ} \leq \tau_{задержки}^{НЛ}. \quad (6)$

2. Для обеспечения однородного распределения напряжения в ФЛ

$$\tau_{зарядки}^{ФЛ} \gg \frac{l_{ФЛ}}{v_1}, \quad (7)$$

где $l_{ФЛ}$ - длина формирующей линии;

$v_1 = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon}}$, v_0 - скорость света, ϵ - диэлектрическая проницаемость среды.

3. $\tau_{выходного импульса} \gg \tau_{фронта}. \quad (8)$

4. Для передачи максимальной мощности в нагрузку

$$\frac{1}{\epsilon} \rho_{ФЛ} = \frac{1}{\alpha} \rho_0^{НЛ} = R_{х.х.}, \quad (9)$$

где $\rho_{ФЛ}$ - волновое сопротивление формирующей линии, α - количество нелинейных линий на весь модулятор, $\rho_0^{НЛ}$ - волновое сопротивление нелинейной линии в насыщенном состоянии, $R_{х.х.}$ - суммарное сопротивление индукционной ускоряющей секции без пучка.

При этом амплитуда напряжения на нагрузке и длительность импульса определяются выражениями

$$U_{R_{х.х.}} = \frac{U_0}{2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{нас}}{\mu_{ненас}} \right)^{1/2} \right], \quad (10)$$

$\mu_{ненас}$, $\mu_{нас}$ - магнитные проницаемости на фронте и за фронтом ударной волны в НЛ [9]; U_0 - максимальное напряжение на ФЛ,

$$\tau_{выходного имп} = 2 R_{х.х.} C_0 = \left[\frac{2 l_{ФЛ}}{v_1} + \frac{2 l_{НЛ}}{v_2} (\mu_{нас})^{1/2} \right], \quad (11)$$

где $C_2 = C_3 = C_0$; $C_{4К} = \frac{1}{5} C_0$, $v_2 = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_{эф}}}$, $\epsilon_{эф}$ - эффективная диэлектрическая проницаемость в нелинейной линии [9]; $l_{ФЛ}$, $l_{НЛ}$ - длины формирующей и нелинейной линий.

Результаты наладки

Микросекундная часть схемы не вызывает принципиальных сложностей в создании и наладке. В то же время для экспериментальной проверки возможности создания модулятора достаточно изучить одну из параллельных ветвей части схемы (4 на рис.2).

Для запитки одного оконечного каскада (из шести) был создан макет схемы 3, дающий те же параметры, что и 3 на всю схему 4. Выходные параметры макета: $U = 120$ кВ, $\tau = 270$ нс. Оконечный каскад представлял собой рабочий вариант конструкции одной из ветвей схемы 4. Емкость $C_{4К} = C_{ФЛ} + C_{НЛ} = 8+9$ нФ. Индуктивность $L_{3К} - 3$ дросселя, соединенных параллельно, каждый из них представлял собой обмотку из 8 витков на сердечнике из 15 ферритовых колец типа 600 НН $125 \times 80 \times 12$ мм³. Длина формирующей линии - 1 м. Нелинейные линии заполнялись ферритами типа 600 НН $65 \times 40 \times 6$ мм³ на длине 1 м, внешний диаметр НЛ - 94 мм. Соединение формирующей линии с нагрузкой осуществлялось через девять нелинейных линий. В качестве диэлектрика в оконечном каскаде применена деионизованная вода. Нагрузка состояла из сопротивлений типа ТВО, параллельно которым подключался пермалловый сердечник с одновитковой обмоткой для пропускания тока размагничивания. На холостом ходу (без пучка) модулятор нагружается на 36 индукторов. Динамическое сопротивление одного индуктора 27 Ом, следовательно, $R_{х.х.}$ модулятора = 0,75 Ом и для одного оконечного каскада - 4,5 Ом. Расчетное значение амплитуды напряжения в этом режиме $U = 64$ кВ. Для наладки одного оконечного каскада волновое сопротивление формирующей линии, общее волновое сопротивление нелинейных линий в насыщенном состоянии, а также сопротивление нагрузки выбирались равными 4,5 Ом. На рис.3 представлены осциллограммы, иллюстрирующие работу оконечного каскада; сверху - напряжение на нагрузке

ке, внизу - на формирующей линии. На рис.4 приведена нагрузочная характеристика оконечного каскада. Выходная мощность на нагрузке 4,5 Ом 900 МВт при $U = 64$ кВ.



Рис. 3. Развертка по горизонтали 30 нс/деление; чувствительность по вертикали: вверху - 16 кВ/деление, внизу - 45 кВ/деление.

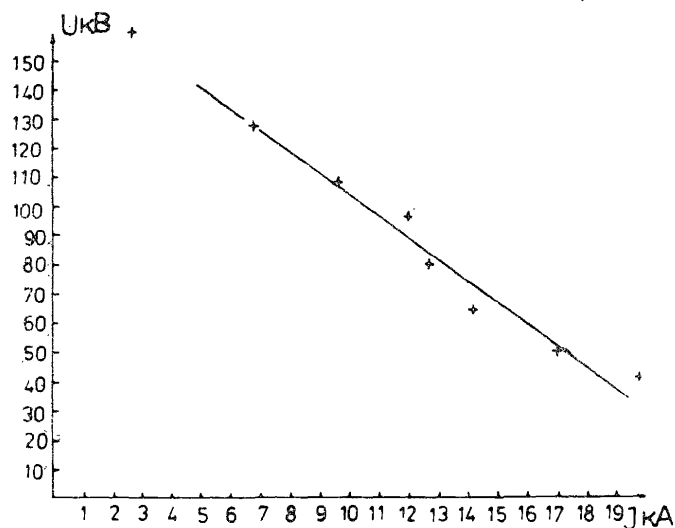


Рис. 4

При ускорении электронно-ионных колец среднее значение тока пучка 1000 А. Из нагрузочной характеристики видно, что при этом значении тока пучка $U = 50$ кВ.

Эксперименты по наладке оконечного каскада показали, что

1. Достигнутые параметры находятся в хорошем соответствии с расчетными.
2. Параметры входного импульса вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к импульсу ускоряющего напряжения ЛУЭК-20 /10/.

3. Возможность создания модулятора с выходной мощностью $> 5 \cdot 10^9$ Вт.

В настоящее время на первой очереди ЛУЭК-20 смонтированы три модулятора, нагрузкой которых являются три индукционные ускоряющие секции, произведен пробный запуск модуляторов без пучка и на каждой секции получено суммарное напряжение 1,8 МВ.

Литература

1. Melville W.S. Proc.IEE , 1951, No 53, p.185.
2. Харькозов Р.В., Швец В.А. ОИЯИ, 9-9523, Дубна, 1976.
3. Горинов Б.Г. и др. ОИЯИ, 9-12148, Дубна, 1979.
4. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, 9-82-339, Дубна, 1982.
5. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-83-307, Дубна, 1983.
6. Virx D.L. et al. IEEE Trans. Nucl. Sc., 1983, VNS - 30, No 4, p.27.
7. Александров В.С. и др. В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т.2, с.151.
8. Меерович А.А. и др. Магнитные генераторы импульсов. "Советское радио", М., 1968.
9. Катаев И.Г. Ударные электромагнитные волны. "Советское радио", М., 1963.
10. Александров В.С. и др. В кн.: Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 марта 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Долбилов Г.В. и др.

P9-86-156

Модулятор линейного индукционного ускорителя электронно-ионных колец ЛУЭК-20

Дается описание мощного модулятора - генератора импульсов ускоряющего напряжения - линейного индукционного ускорителя электронно-ионных колец ЛУЭК-20. Параметры модулятора: выходное напряжение на нагрузке $R_H = 0,5 \text{ Ом}$ равно 50 кВ; ток в нагрузке - 100 кА; длительность импульса напряжения на нагрузке 70÷80 нс. Модулятор выполнен с применением нелинейных схем усиления мощности путем сжатия электромагнитной энергии во времени. Приведены результаты наладки одной из параллельных ветвей схемы модулятора.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Dolbilov G.V. et al.

P9-86-156

The Modulator of the LUEK-20 Linear Electron Ring Accelerator

The powerful modulator - the accelerating voltage pulse generator of the linear induction electron ring accelerator LUEK-20 is described. The modulator parameters are: output voltage on the load $R_H = 0.5 \text{ Ohm}$ is equal to 50 kV; current in the load is 100 kA; duration of the voltage pulses on the load is 70-80 ns. The modulator is designed with application of the nonlinear circuits of power amplification by means of electromagnetic energy compression in time. The adjustment of one of the parallel modulator circuit branches is described.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986