

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ИНЖЕКТОРНЫХ УСТРОЙСТВ СИЛЬНОТОЧНЫХ БЕТАТРОНОВ

Ю. М. СКВОРЦОВ

(Представлена научно-исследовательским институтом  
ядерной физики, электроники и автоматики)

Для повышения эффективности применения бетатронов за счет увеличения количества ускоряемых электронов в каждом импульсе наиболее реальным и выгодным путем представляется повышение напряжения инжекции с одновременным увеличением апертуры ускоряющего зазора [1, 2]. В настоящее время целесообразность применения высоковольтной инжекции для увеличения интенсивности излучения циклических ускорителей подтверждена экспериментально [3,4] а стоящие перед этой инжекцией требования достаточно четко поставлены в [5,6]. Именно удовлетворения этих требований [7] позволило в бетатронах с высоковольтной инжекцией получить существенное увеличение числа ускоряемых электронов. Возможность пропорционального изменения числа захватываемых и сохранение доводимых до конца цикла ускорения числа электронов в значительной степени определяется электрическими параметрами импульсного генератора схемы инжекции и характеристиками межполюсного пространства бетатрона. С этой точки зрения для получения условий «оптимального» захвата\* инжектируемых электронов к высоковольтным генераторам импульсного напряжения, в частности, предъявляется ряд требований.

В связи с необходимостью в момент инжекции получить удовлетворение условий равенства сил электрического взаимодействия электронного пучка с силами магнитного поля в межполюсном пространстве, к генерируемому импульсу напряжения, питающему высоковольтный инжектор, предъявляются требования как по мощности, которая соответствует необходимому току инжекции, так и по форме. Получение необходимого соответствия между амплитудами напряжения и тока импульса, подаваемого на инжектор, определяет источник питания и вид коммутатора схемы импульсного генератора. В то же время генерирование импульса с заданной формой зависит от конструктивных особенностей и электрических параметров накопителя высоковольтного модулятора.

Так как, согласно исследованиям ряда авторов [9,10], между величиной захватываемого заряда и напряжением инжекции не устанавливается предел начальному значению энергии вводимых в ускорение

\* «Оптимальный захват соответствует вводу такого количества электронов, которое приближается по величине к равновесному заряду, способному удержаться магнитными силами поля в межполюсном зазоре бетатрона при данных условиях.

электронов, поэтому реально допустимая амплитуда напряжения связана с обеспечением необходимой электрической прочности инжектора и деталей электромагнита в воздушном зазоре, где размещается этот инжектор.

Для инъекции в сильноточном бетатроне на 25 Мэв нами выбрана энергия инъекции примерно в 10 раз большая, чем ранее применяемая в обычных бетатронах на аналогичную энергию, то есть  $E_{и} = 400 + E_0$  Кэв. При указанном напряжении размеры системы инъекции в целом не выходят из разумных пределов. Такое увеличение энергии инъекции в соответствии с теоретическими предсказаниями дает увеличение выхода излучения более чем на порядок при прочих равных условиях. Для бетатрона на 15 Мэв энергия инъекции была выбрана равной  $E_{и} = 200 + E_0$  Кэв, здесь и ранее  $E_0 = 511$  Кэв — энергия покоя электронов.

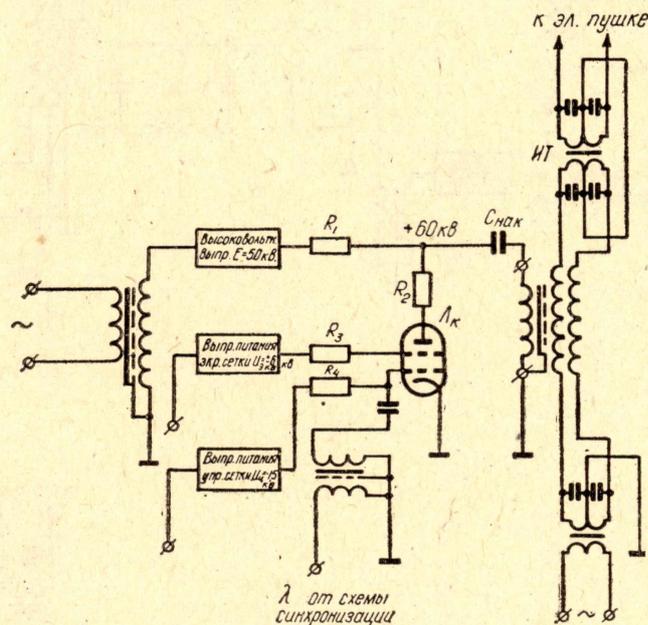


Рис. 1

Увеличение напряжения инъекции до сотен киловольт требует применения в тракте инъекции — инфлектора. Согласно существующей связи между напряжениями на электронной пушке и инфлекторе электростатического типа и с учетом его геометрических характеристик для выбранного диапазона напряжений инъекции ( $U_{и} = 200—400$  кВ), на отклоняющей пластине инфлектора требовалось напряжение  $U_{вы} = 30—60$  кВ соответственно.

Поскольку при высоковольтной инъекции мощность генератора импульсного напряжения приобретает существенное значение, для систем инъекции первых сильноточных бетатронов на 15—20 Мэв величина необходимого тока рассчитывалась по эмпирической формуле:

$$I_{нг} = (6 \div 8) \cdot 10^{-6} \frac{E_{и}}{R_0} \left[ \left( \frac{E_{и}}{E_0} \right)^2 - 1 \right] S_{и}.$$

Здесь  $R_0$  и  $S_{и}$  — радиус равновесной орбиты и область фокусирующих сил в межполюсном пространстве,  $(6—8) \cdot 10^{-6}$  коэффициент, учитывающий изменение необходимого тока генератора в зависимости от вида инжекторного устройства и мощности схемы.

Сооруженные автором модуляторы для высоковольтных генераторов импульсных напряжений охватывает весь диапазон:

- а) по типу накопителя,
- б) по виду коммутатора.

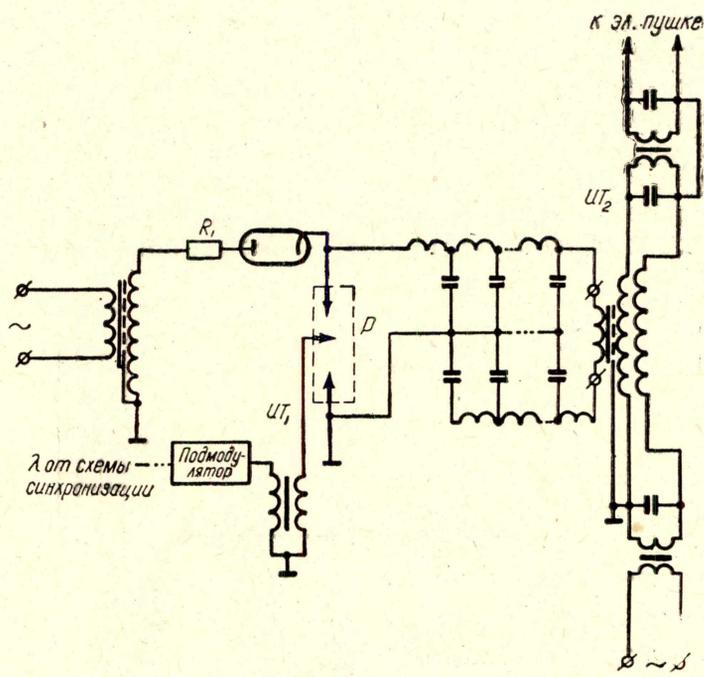


Рис. 2

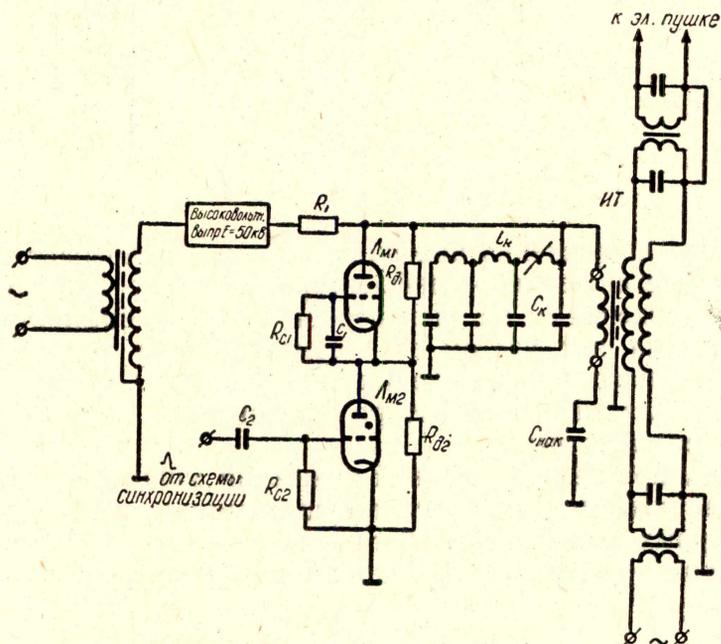


Рис. 3

Для сильнотоочного бетатрона на 25 Мэв, работающего на промышленной частоте, предусматривалась схема на мощной электронной лампе (рис.1), причем в качестве накопителя должна была использоваться сосредоточенная емкость с частичным разрядом. Однако малая величина

Т а б л и ц а 1

№ пп.	Характеристика	Ед. изм.	Номин. напряжение инъекции (кв)		
			200	300	400
<b>А. Модулятор</b>					
1	Амплитуда напряжения выпрямителя	<i>кв</i>	30	50	60
2	Зарядный ток	<i>ма</i>	40	150	15*
3	Накопитель	—	двойная формирующая линия	емкость с коррект. линией	двойная формирующая линия
4	Суммарная емкость	<i>мкф</i>	0,023	0,05 (0,023)	0,066
5	Суммарная индуктивность	<i>мкгн</i>	73	46**	138
<b>Б. Импульсный трансформатор</b>					
6	Импульсная мощность	<i>мгвт</i>	7,6	18,4	40,0
7	Форма генерируемого импульса:				
	а) длительность по основанию	<i>мксек</i>	1,3	3,5	3,0
	б) длительность фронта	"	0,22	0,8	0,4
8	Индуктивность кажущегося намагничивания	<i>мкгн</i>	650	1280	1500
9	Суммарная паразитная емкость	<i>пф</i>	1795	2547	1975
10	Индуктивность рассеяния	<i>мкгн</i>	13,6	9,0	14,3
11	Сердечник магнитопровода:				
	а) тип и толщина ленты	<i>мм</i>	Э310—0,08	Э310А—0,08	Э310—0,08
	б) средняя длина силовой линии	<i>см</i>	101	180	200
	в) сечение	<i>см<sup>2</sup></i>	52	102	128
12	Число витков обмоток:				
	а) первичной	<i>вит.</i>	12	18	10
	б) вторичной	"	80	108	66
13	Диэлектрическая среда	—	масло	масло	масло

\* Частота повторения импульсов 0,25 гц

\*\* Корректирующей линии

импульсной мощности, допускаемая современными электронными модуляторными лампами, и сложность эксплуатации, связанная с применением отдельных выпрямителей для питания сеток и необходимостью жидкостного охлаждения ее электродов, делают невозможным их применение на современном этапе в мощных генераторах высоковольтных систем инжекции.

Применение в качестве модуляторов ионных приборов типа воздушный управляемый разрядник или водородный тиратрон (рис. 2) позво-

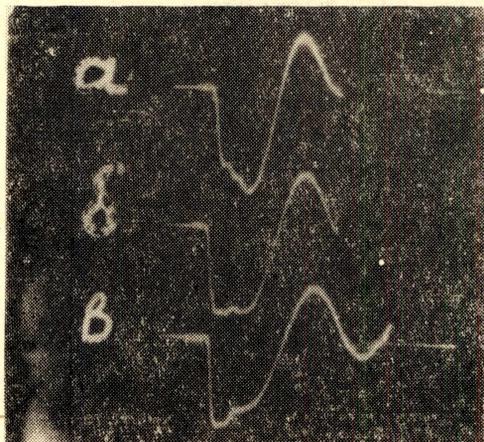


Рис. 4. Осциллограммы импульсов при различных значениях  $L_k$  отрезка искусственной линии

лило полностью удовлетворить требования к системе высоковольтной инжекции. Коммутирование в модуляторе импульсных токов с амплитудой до 1000 а при напряжении 60 кВ позволило обеспечить генератором для напряжений до 400 кВ необходимые токи в нагрузке — высоковольтной электронной пушке торцового типа [11]. Кроме того, путем изменения волнового сопротивления линии за счет уменьшения ее продольной индуктивности возможно осуществлять необходимую коррекцию формы импульса. Эта коррекция призвана повысить стабильность захвата, что отражается на средней интенсивности тормозного излучения сильноточного бетатрона.

Положительные свойства емкостного накопителя и двойной формирующей линии были реализованы в предложенном и осуществленном импульсном модуляторе (рис. 3) с комбинированным накопителем [2]. Оригинальное подключение отрезка искусственной линии, разомкнутой на конце, позволяет, изменяя ее волновое сопротивление, осуществлять в известных пределах коррекцию импульса (рис. 4).

Ниже в таблице приведены основные характеристики высоковольтных модуляторов и импульсных трансформаторов [13], изготовленных под руководством автора для сильноточных бетатронов на энергию 15 ÷ 25 МэВ.

В заключение отметим, что применение изготовленных высоковольтных генераторов импульсного напряжения в системе инжекции сильноточных бетатронов [14, 15], имеющих увеличенную область фокусирующих сил в межполюсном пространстве электромагнита, дало возможность повысить ускоряемый заряд более чем в 200—500 раз по сравнению с обычными бетатронами такой же энергии.

Пользуясь случаем, автор приносит искреннюю благодарность профессору Москалеву В. А. за постановку задачи и ценные советы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wideröe. Journ. Appl. Phys., 18, 783, (1947).
2. В. А. Москалев, М. Ф. Филиппов, А. Г. Скориков, Ю. М. Скворцов. Изв. вузов. «Физика», № 5, 35—44. (1959).

3. А. П. Комар, О. П. Коровин. ДАН СССР, 159, № 4, 775—776, (1964).
  4. В. А. Москалев, Б. В. Окулов, Ю. М. Скворцов, А. М. Слупский. Электронные ускорители. Труды VI межвузовской конференции. «Энергия», 273, (1968).
  5. Б. Н. Родимов. Докторская диссертация. НИИ ЯФ ТПИ, Томск, (1967).
  6. L. Gonella, Nucl. Instr. a Meth, 22, № 2, 269—291, (1963).
  7. Ю. М. Скворцов. Диссертация. НИИ ЯФ ТПИ, Томск, (1967).
  8. Б. Н. Родимов, П. А. Черданцев, В. Л. Русанов, А. М. Герасимов. Изв. вузов, «Физика», № 5, 6—13, (1959).
  9. В. Н. Логунов, Е. П. Овчинников, В. Л. Русанов, А. М. Герасимов. ЖТФ, 27, № 5, 1125—1142, (1967).
  10. А. И. Павловский, Г. В. Склизков, Г. Д. Кулешов, А. М. Герасимов. ЖТФ, 33, № 3, 374—375, (1963).
  11. Б. В. Окулов. Диссертация. Томск, (1969).
  12. В. А. Москалев, Ю. М. Скворцов, А. М. Слупский. Авторское свидетельство, № 207979 от 16/X-1967.
  13. Ю. М. Скворцов, А. М. Слупский. Электронные ускорители. Труды VII межвузовской конференции. Атомиздат, М., в. 3, 41, (1970).
  14. В. А. Москалев, Ю. М. Скворцов, Б. В. Окулов, В. Г. Шестаков. Электронные ускорители. Труды IV межвузовской конференции. М., «Высшая школа», (1964), 204—209.
  15. А. А. Воробьев, В. А. Москалев, Ю. М. Скворцов, Б. В. Окулов, А. М. Слупский, В. Г. Шестаков. Изв. вузов, «Физика», 4, 139, (1967).
-