

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ КОМПАКТНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО БЕТАТРОНА

В. А. МОСКАЛЕВ, Ю. М. СКВОРЦОВ

Высокая плотность ускоренного электронного пучка в сильноточном бетатроне [1, 2, 3] достигнута как за счет увеличения области фокусирующих сил и создания «емкого» поля, так и за счет ввода в ускорение не менее 10^{13} электронов в каждом импульсе. Применение увеличенного напряжения инжекции накладывает своеобразный отпечаток на вид и конструктивные особенности высоковольтного инжекторного устройства [4], а также схемы его питания. Ниже приводятся результаты разработки высоковольтной системы инжекции для компактного сильноточного бетатрона (БСК).

Известно, что с целью обеспечения пропорционального изменения количества ускоренных частиц с повышением напряжения инжекции [5, 6] импульсный генератор, питающий электронную пушку, должен иметь мощность, обеспечивающую ток не менее

$$I_{\max} = 1,8(\beta\gamma)^3 \frac{x_n^2 - b}{\beta \ln x_n^2}, \quad (1)$$

где β и γ — релятивистские факторы, учитывающие скорость и энергию инжектируемых частиц; $x_n = \frac{\rho_n}{\rho_0}$ — отношение приведенных к круглому сечению радиусов области фокусирующих сил и апертуры инжекционного устройства; $b = 1 + 2 \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{R_0}{\rho_0} \right)^2$ — параметр, учитывающий расходимость инжектируемого в межполюсное пространство пучка с углом α ; R_0 — равновесный радиус, а 1,8 — коэффициент, учитывающий физические константы при подстановке величин в системе МКС. Именно ток этот определяет импульсную мощность генератора схемы инжекции БСК, в модуляторе которого (рис. 1) предусмотрен комбинированный накопитель [7].

Поскольку в таком бетатроне все узлы и элементы, включая и импульсные системы, рассчитываются на оптимальные параметры, при проектировании импульсного модулятора учтен опыт применения высоковольтной инжекции в первых сильноточных бетатронах. С этой целью в линейном модуляторе накопитель, основные параметры которого определены из выражений:

$$C_0 = 2 \frac{I_{\text{и}}}{U_{\text{и}}} g^2 \tau_{\text{и}},$$

$$C'_{\text{кор}} = 0,5 \frac{I_{\text{и}}}{U_{\text{и}}} g^2 \sigma \tau_{\text{и}}, \quad (2)$$

$$L'_{\text{кор}} = 0,25 \frac{U_{\text{и}}}{I_{\text{и}} g^2} \sigma \tau_{\text{и}},$$

составляется из ограниченного числа конденсаторов типа ИМ или КВ, а их зарядка с целью экономичности и повышения к.п.д. осуществляется через дроссель с индуктивностью:

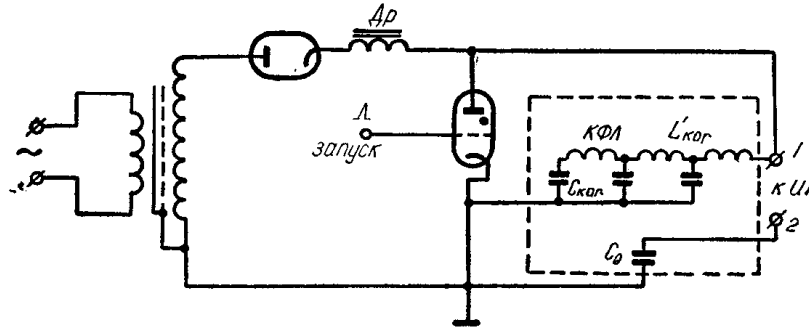


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного модулятора с комбинированным накопителем

$$L_{\text{зopt}} = \frac{1}{C_{\Delta} f^2 \chi^2} \cdot 10^{-2}. \quad (3)$$

В (2) и (3) C_0 , $C'_{\text{кор}}$, $L'_{\text{кор}}$ — параметры накопителя и корректирующей линии (КФЛ); $U_{\text{и}}$, $I_{\text{и}}$ и $\tau_{\text{и}}$ — амплитудные значения и величина напряжения, тока и длительности генерируемого импульса; σ — выбираемый момент корректирования импульса (фронт, вершина или срез) $\sigma = 0,1 \div 0,9$; $C_{\Delta} = C_0 + \Sigma C'_{\text{кор}}$ — суммарная емкость накопителя; f и χ — частота питающего напряжения и относительный период процесса зарядки накопителя. Применение в системе инжекции БСК указанного модулятора позволяет не только подавать на инжекторное устройство напряжение с заданной мощностью, но и в известных пределах осуществлять коррекцию формы импульса с целью оптимизации условий захвата [8].

Сокращение геометрических размеров сильноточного бетатрона без изменения его электрофизических параметров при заданной энергии инжекции достигается за счет объединения источника электронов — пушки и источника импульсного напряжения — высоковольтного трансформатора инжекции в единый блок аналогично [9]. До настоящего времени электронная пушка и импульсный трансформатор (ИТ) во всех бетатронах (за исключением ПМБ-6 [10] и бетатрона производства ФРГ на 42 МэВ [11]) разносились на расстояние, которое, с одной стороны, обеспечивало электрическую прочность деталей, находящихся под высоким импульсным напряжением, но, с другой стороны, существенно увеличивало размеры ускорителя, ограничивая его мобильность, так как передача импульсов напряжения на инжекторное устройство осуществлялось по кабельным или жесткофиксированным проводным линиям при напряжении 25—300 кВ.

Рассмотрим некоторые моменты, позволяющие решить задачу по созданию импульсного источника ускоренных электронов (ИИУЭ). Прежде всего необходимо принять условие, что такой ИИУЭ не должен ухудшать импульсные и энергетические характеристики прежней системы, когда высоковольтный инжектор торцового типа с инфлекторным вводом электронов в область захвата питались от отдельных генераторов импульсами различной полярности.

В БСК инжекторное устройство и импульсный трансформатор питания выполняются в виде совмещенной конструкции (рис. 2), позволя-

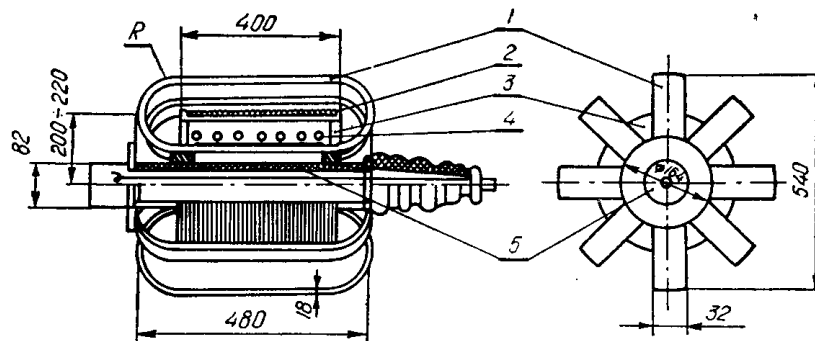


Рис. 2. Эскиз конструктивного объединения электронной пушки торцового типа и импульсного трансформатора

ющей инжектировать пучок электронов с параметрами, обеспечивающими достижение требуемой величины ускоряемого заряда. В основу ИИУЭ положен импульсный трансформатор, состоящий из восьми отдельных стальных сердечников 1, которые наматываются из ленточной холоднокатаной стали марки Э310А и укрепляются по звездообразной схеме вокруг инжектора 5. Используя воздушно-каркасную изоляцию 2

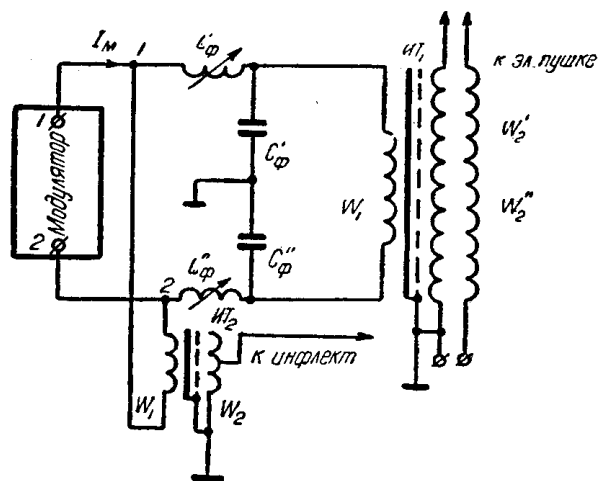


Рис. 3. Принципиальная схема совмещенного питания пушки и инфлятора с применением двух импульсных трансформаторов

с применением оргстекла и полиэтилентерфталатной пленки, детали округлой формы, способствующей выравниванию электростатического поля [12], удалось при заданном напряжении инжекции сконструировать ИИУЭ, который вписывается в установленные габариты. Проведенная оценка эффективности трансформирования импульсов заданной формы (длительность, фронт, спад на вершине и т. п.) показала, что ухудше-

ние переходной характеристики [13] такого ИТ привело к некоторому увеличению длительности фронта, но в допустимых пределах. В указанной системе удается сохранить важное достоинство импульсного трансформатора для высоковольтной инжекции [14] — незначительная зависимость энергетических параметров от степени нагрузки.

Однако даже при использовании ИИУЭ требуется осуществлять раздельное питание пушки и инфлектора импульсами различной полярности, причем их амплитудные и фазовые соотношения должны находиться в определенной связи.

В системе инжекции БСК питание ИИУЭ, снабженного электростатическим инфлектором, будет осуществляться от одного модулятора. Это позволит [15] упростить процесс настройки ускорителя с высоковольтной системой инжекции.

В качестве окончательной ступени импульсного генератора предлагается применить какую-либо одну из 2-х ниже рассматриваемых схем, использующих для целей согласования импульсов по фазе так называемых «фильтров квазинизких» или «квазивысоких частот» [16]. В одной из схем (рис. 3) применяются два импульсных трансформатора. Трансформатор для питания инфлектора подключается непосредственно к выходным клеммам модулятора, а импульсный трансформатор, питаю-

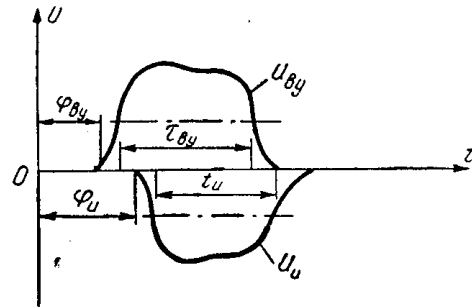


Рис. 4. Волновая диаграмма импульсов: U_{by} — импульс инфлектора, $U_{и}$ — импульс электронной пушки, φ_{by} и $\varphi_{и}$ — задержки (фазы) соответствующих импульсов

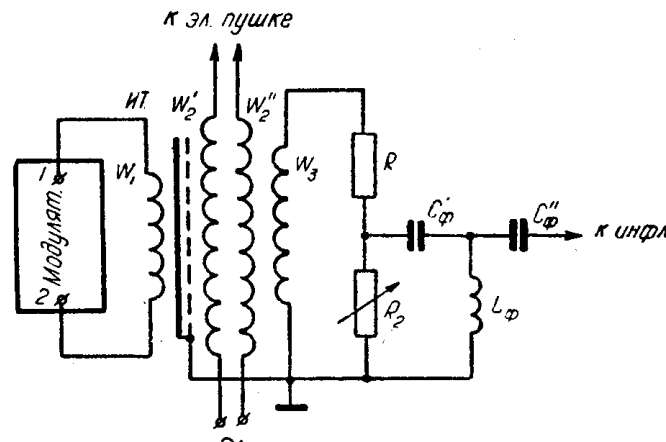


Рис. 5. Принципиальная схема совмещенного питания пушки и инфлектора от одного импульсного трансформатора

щий электронную пушку, подключается к модулятору через «фильтр квазинизких частот» $L_{\varphi}'C_{\varphi}' - L_{\varphi}''C_{\varphi}''$. Путем регулирования напряжения на вторичной стороне ИТ₂ можно получить требуемое соотношение между напряжением инфлектора и напряжением пушки, которое в дальнейшем с изменением напряжения на выходе модулятора (T I—I, рис. 1) будет оставаться неизменным, т. е. $\frac{U_{by}}{U_{и}} = \text{const}$. «Фильтр» позволит обеспечить необходимое согласование импульсов $U_{и}$ и U_{by} по фазе, причем для случая (рис. 4), когда

$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_{ay} > 0, \quad (4)$$

может быть достигнуто условие максимальной «проходимости» электронного пучка через инфлектор.

Применение отдельного трансформатора несколько усложняет схему, но не исключает ее возможного применения. В связи с этим для системы БСК предпочтительнее применить схему с одним импульсным трансформатором, но имеющим две отдельные обмотки для питания пушки и инфлектора (рис. 5).

Для изменения моментов подачи импульсов на пушку и инфлектор от одного модулятора — согласно (4) — на выходе обмотки W_3 , питающей инфлектор, устанавливается «фильтр квазивысоких частот» с емкостью $C_\Phi = 2C'$, где $C' = \frac{1}{2\omega\rho}$ — условная емкость, характеризующая передачу импульса с частотой $\omega = \frac{2\pi}{\tau_n}$, а $L_\Phi = \frac{\rho}{2\omega}$ — индуктивность фильтра. Здесь τ_n — длительность импульса, формируемого в модуляторе. Параметры таких фильтров определяются из условия передачи импульса за время $t = \varphi_{ay} = 2\pi \sqrt{L_\Phi C_\Phi}$ для соблюдения необходимого согласования (4).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Москалев, Б. В. Окулов, Ю. А. Отрубяниников, Ю. М. Скворцов, А. Г. Скориков, В. Г. Шестаков. Изв. ТПИ т. 2, 122, 1962, 50—58.
2. В. А. Москалев, Ю. М. Скворцов, Б. Н. Окулов, В. Г. Шестаков. Электронные ускорители. Труды IV межвузовской конф., 1964. 204—209.
3. А. А. Воробьев, В. А. Москалев, Ю. М. Скворцов, А. М. Слупский, В. Г. Шестаков. Изв. вузов, «Физика», № 4, 1967, 139—140.
4. Б. В. Окулов. Диссертация. НИИ ЯФ, Томск, 1969.
5. L. Gonella, Nucl. Instr. a. Meth., 22, 1963, 269—291.
6. Б. Н. Родимов. Докторская диссертация. НИИ ЯФ, Томск, 1966.
7. В. А. Москалев, Б. В. Окулов, Ю. М. Скворцов, А. М. Слупский. Электронные ускорители. Труды IV межвузовской конф. 1968, 273—276.
8. А. А. Воробьев, В. А. Воробьев, Л. Н. Дроздов, О. В. Соколов, И. А. Цехановский. Электронные ускорители. Труды VII межвузов. конф., вып. 2, 1970, 41—43.
9. Е. А. Абрамян, С. Б. Вассерман, В. М. Долгушин, А. А. Егоров, И. В. Казарезов, А. В. Филиппченко, Г. И. Яснот. Электронные ускорители. Труды VII межвуз. конф., вып. 3, 1970, 36—38.
10. Л. М. Ананьев, М. И. Штейн, В. Л. Чахлов, Ю. П. Ярушкин. Дефектоскопия, 1968, № 6.
11. R. Schittenhelm u. a. Strahlentherapie., b. 127, h4, 1965.
12. С. В. Кривоносов. Электронные ускорители. Труды VII межвуз. конф., вып. 3, 1970, 49—51.
13. Я. С. Ицкохи. Импульсные трансформаторы. ВИ, 1950.
14. Ю. М. Скворцов, А. М. Слупский. Электронные ускорители. Труды VII межвуз. конф., вып. 2, 1970, 41—43.
15. Б. В. Окулов. Электронные ускорители. Труды VII межвуз. конф. вып. 2, 1970, 25—28.
16. Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, С. В. Страхов. Основы теории цепей. Изд-во «Энергия», 1965.