

УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО БЕТАТРОНА

Д. А. НОСКОВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Принцип работы схемы

Импульсный режим работы бетатронов, как и других ускорителей, характерен тем, что при прохождении импульса тока через катушки электромагнита напряжение на последних изменяется, как правило, по косинусоидальному закону.

В начальный момент к катушкам мгновенно прикладывается максимальное напряжение. Этот мгновенный бросок напряжения нами используется для генерирования импульсов инжекции с помощью очень простой схемы.

Последовательно соединенные первичная обмотка трансформатора, емкость и сопротивление включаются параллельно катушкам электромагнита (рис. 1, схема а).

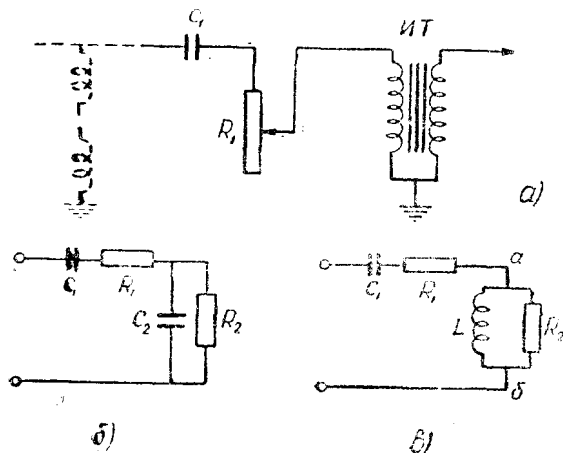


Рис. 1

Параметры этой схемы подобраны так, что в момент броска напряжения на катушках электромагнита бетатрона в цепи инжекции возникает колебательный переходный процесс, первая полуволна которого трансформируется импульсным трансформатором и подается на электроды электронной пушки. Все последующие колебания вследствие большого затухания имеют небольшую амплитуду и не оказывают влияния на работу ускорителя. Амплитуда и длительность импульса определяются параметрами схемы.

Так как параметры трансформатора изменить нельзя, то главную роль в изменении длительности и амплитуды импульса играют сопротивление R и емкость C .

Изменение емкости влияет на ширину импульса и в значительной степени изменяет его амплитуду. Величина сопротивления определяет амплитуду импульса и существенно влияет на ширину импульса. Точно рассчи-

тать ход переходных процессов в схеме практически очень трудно вследствие наличия в цепи импульсного трансформатора. Поэтому анализ цепи удобнее проводить рассматривая упрощенную эквивалентную схему.

Импульсный трансформатор, как известно, имеет относительно большие паразитные емкость и индуктивность, которые оказывают существенное влияние на переходный процесс в цепи с импульсным трансформатором. В начальный момент переходного процесса, когда индуктивность трансформатора представляет большое сопротивление, ход явлений переходного процесса определяется, главным образом, паразитными емкостями обмоток трансформатора, а в последующие моменты времени, когда через индуктивность пойдет ток, весь ход переходного процесса определяется индуктивностью цепи.

Исходя из этого анализ переходного процесса в цепи инжекции будем проводить в два этапа. Явления, происходящие в цепи в первый момент времени, т. е. на фронте импульса инжекции, рассмотрим, пользуясь упрощенной эквивалентной схемой, в которой трансформатор заменен схемой, состоящей из емкости и сопротивления (рис. 1, схема б),

где C_2 —паразитная емкость обмоток импульсного трансформатора, приведенная к первичной обмотке,

R_2 —сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке,

C_1, R_1 —параметры цепи, определяющие форму и амплитуду импульса.

Переходные процессы, происходящие на хвосте импульса (последующие промежутки времени), рассмотрим, пользуясь эквивалентной схемой, изображенной на рис. 1 (схема в), где:

C_1, R_1 —параметры формирующей цепи,

L —кажущаяся индуктивность трансформатора.

R_2 —сопротивление нагрузки трансформатора, приведенное к первичной обмотке.

Определение параметров схемы

Величины R_2, C_2 и L —приведенные к первичной обмотке параметры импульсного трансформатора—вносятся в схему импульсным трансформатором. В общем случае каждый трансформатор имеет определенные величины данных параметров.

Величина сопротивления R_2 —приведенного к первичной обмотке сопротивления нагрузки—определяется величиной нагрузки. Нагрузкой трансформатора является электронная пушка, сопротивление которой может изменяться в довольно широких пределах, в зависимости от тока накала.

Для упрощения расчета можно принять в качестве эквивалентного сопротивления пушки какое-то постоянное сопротивление R_3 .

В нашем частном случае были приняты следующие значения параметров:

$$R_3 = 64\,000 \text{ ом}; \quad C_2 = 50\,000 \text{ мк мкф};$$

$$R_2 = \frac{R_3}{n^2} = 40 \text{ ом}; \quad L = 500 \text{ мк гн}.$$

Для вычисления величины емкости C , определяющей длительность импульса, необходимо знать величину кажущейся индуктивности трансформатора и длительность импульса инжекции. Длительность импульса инжекции в данной схеме необходимо рассчитывать особенно тщательно, т. к. согласование фазы впуска и амплитуды импульса с напряженностью магнитного поля производится только изменением длительности и амплитуды импульса.

Для нашего бетатрона при напряжении инжекции 25 кВ длительность импульса инжекции должна быть ~ 25 мксек.

Так как нами в качестве импульса инжекции используется только четверть волны косинусоиды, то период колебания для этого случая будет $T = 4 \times 25 = 100$ мксек. Отсюда емкость C ориентировочно определится по формуле:

$$C = \frac{T^2}{4\pi L}.$$

Для нашего случая емкость равна 0,25 мкф. Этот ориентировочный расчет позволяет с достаточной точностью определить емкость C , не зная других параметров цепи, кроме кажущейся индуктивности.

Величина R_1 должна быть такой, чтобы переходный процесс был колебательным, а не периодическим, т. е. R_1 должно быть меньше критического сопротивления $R_{кр}$ для схемы рис. 1 в. Критическое сопротивление определяется из условия равенства корней характеристического уравнения:

$$\frac{1}{Cp} + R_1 + \frac{Lp R_2}{Lp + R_2} = 0. \quad (1)$$

Для данного уравнения это условие сводится к следующему:

$$R_{кр} = \frac{L}{R_2 C} \pm 2 \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2)$$

Подставив числовые значения величин $R_2 L$ и C , найдем значение $R_{кр}$

$$R_{кр1} = 140 \text{ ом}, \quad R_{кр2} = -40.$$

В данном случае отрицательное значение не имеет смысла, значит критическое сопротивление равно 140 ом, следовательно сопротивление R_1 должно быть меньше 140 ом.

Для удобства регулирования амплитуды напряжения инжекции в качестве R_1 лучше использовать переменное сопротивление от 0 до 140. В дальнейшем расчет схемы и анализ явлений на хвосте и на фронте импульса будем проводить при $R_1 = 20$ ом.

Таким образом, пользуясь данной методикой расчета и зная параметры импульсного трансформатора, можно приближенно определить все параметры цепи инжекции для любого импульсного бетатрона.

Анализ переходного процесса на фронте импульса инжекции

Характер переходного процесса на фронте импульса определяется, как уже указывалось, паразитными емкостями катушек трансформатора. Будем считать, что индуктивность импульсного трансформатора в этот промежуток времени на ход переходного процесса не оказывает влияния.

Так как параметры цепи инжекции в десятки, даже сотни раз меньше параметров контура электромагнита и, следовательно, длительность переходного процесса значительно меньше, чем длительность импульса тока электромагнита, то переходный процесс в цепи инжекции можно рассматривать как переходный процесс в схеме рис. 1 (схема б) при подключении ее к постоянному напряжению.

Для выяснения зависимости напряжения между точками ab от времени при переходном процессе воспользуемся формулой разложения

$$U_{ab} = \frac{U}{H(0)} + \sum \frac{U e^{p_k t}}{P_k H'(p_k)} \quad (3)$$

Для нашего частного случая решение имеет вид

$$U_{ab} = 760 e^{-1,64 t} - 760 e^{-0,06 t}, \quad (4)$$

где время t в микросекундах.

График зависимости $U_{ab} = f(t)$ для данного переходного процесса представлен на рис. 2 (кривая a). В этом процессе нас интересует только начало переходного режима, т. е. возрастание напряжения, т. к. дальнейший ход переходного процесса будет определяться другими параметрами импульсного трансформатора. Как видно из графика, напряжение на выходе схемы довольно быстро возрастает до максимального значения (за время около 2 мксек) и затем медленно уменьшается.

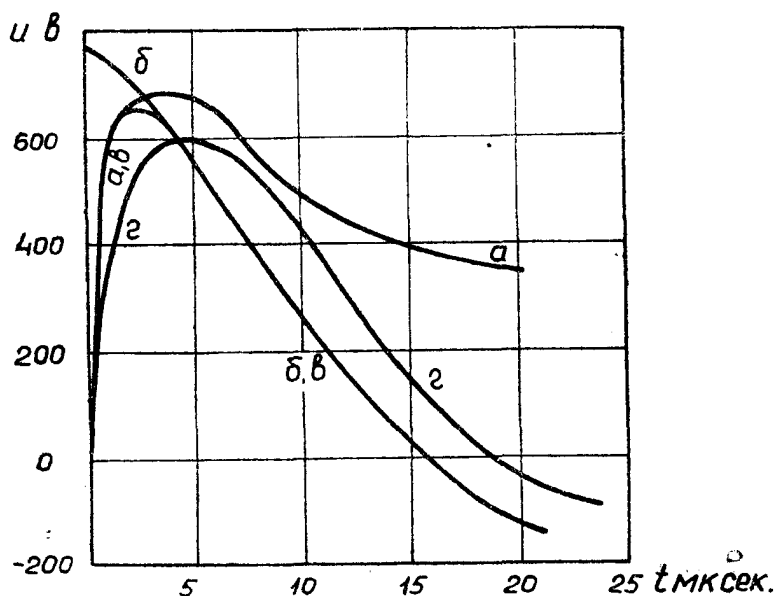


Рис. 2

Изменяя форму импульса посредством подключения емкости ко вторичной обмотке трансформатора, можно фронт импульса сделать более пологим. Изменить фронт импульса другим путем не представляется возможным, т. к. он зависит, главным образом, от паразитной емкости импульсного трансформатора, изменять которую нельзя, не меняя конструкции трансформатора.

Анализ переходного процесса на хвосте импульса инжекции

Переходный процесс, определяющий явления на хвосте импульса, обусловливается в основном кажущейся индуктивностью импульсного трансформатора и величинами емкости и сопротивления в цепи инжекции. Анализ этого процесса проведем, пользуясь эквивалентной схемой цепи инжекции, изображенной на рис. 1 (схема b). Параметры схемы:

$$R_1 = 20 \text{ ом}, \quad C = 0,25 \text{ мкф}, \quad L = 500 \text{ мкГн}, \quad R_2 = 40 \text{ ом}.$$

Нас интересует характер изменения напряжения между точками a и b (рис. 1, схема b).

Пользуясь операторным методом, напишем выражение для напряжения между точками a и b

$$U_{ab}(p) = \frac{U}{Z(p)} Z_{ab}(p), \quad (5)$$

$$\text{где} \quad Z(p) = \frac{1}{Cp} + R_1 + \frac{Lp \cdot R_2}{Lp + R_2}; \quad Z_{ab}(p) = \frac{Lp \cdot R_2}{Lp + R_2}.$$

Подставив в уравнение (5) значения $Z(p)$ и $Z_{ab}(p)$ и проведя некоторые преобразования, получим:

$$U_{ab}(p) = \frac{U \frac{R_2}{R_1 + R_2} p^2}{p^2 + \frac{L + CR_1R_2}{LC(R_1 + R_2)} p + \frac{R_2}{LC(R_1 + R_2)}} = \frac{UR_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{A(p)}{B(p)}. \quad (6)$$

Решение этого уравнения в функции времени имеет вид:

$$U_{ab}(t) = \frac{UR_2\omega_0}{(R_1 + R_2)\omega} \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t + \gamma),$$

где:

$$\delta = \frac{L + CR_1R_2}{2LC(R_1 + R_2)}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{R_2}{LC(R_1 + R_2)}}; \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}; \quad \gamma = \text{arctg} \frac{\delta}{\omega}.$$

В формулу (7) подставим числовые значения и получим выражение для напряжения между точками a , b в таком виде:

$$\bullet \quad U_{ab} = 1040 e^{-4.67 \cdot 10^4 t} \cdot \cos(5,62 \cdot 10^4 t + 0,68). \quad (8)$$

Пользуясь данным выражением, можно построить кривую изменения напряжения во времени.

На рис. 2 (кривая b) изображена зависимость напряжения между точками a и b от времени. Как уже указывалось, для инъекции используется только первый пик напряжения, т. е. четверть полуволны. Из рисунка видно, что амплитуды всех остальных колебаний гораздо меньше амплитуды первого колебания и на процесс инъекции существенного влияния не оказывают.

Форма импульса напряжения такова, что захват электронов в ускорение возможен только на хвосте импульса инъекции, т. к. фронт импульса очень короток (2—4 мксек), а начало импульса и начало кривой необходимого напряжения совпадают, и согласование напряжения инъекции с кривой необходимого напряжения возможно только на хвосте импульса.

Длительность импульса инъекции, определяемая частотой затухающих колебаний, зависит, главным образом, от величины емкости C (рис. 1). Это ясно видно из уравнения (7) для частоты ω . С некоторым приближением можно считать, что длительность импульса прямопропорциональна корню квадратному из емкости. Более точную зависимость можно получить из формулы (7).

Изменение сопротивления R_1 влияет, главным образом, на амплитуду импульса. Из формулы (7) видим, что с увеличением сопротивления напряжение уменьшается, а с уменьшением — возрастает.

На длительность импульса изменение R_1 влияет незначительно.

Работа схемы инжекции

По результатам анализа переходных процессов, определяющих фронт и хвост импульса впуска, получена теоретическая форма импульса, изображенная на рис. 2 (кривая δ).

На рис. 2 (кривая ε) изображена осциллограмма действительной формы импульса, генерируемого схемой инжекции. Сравнение экспериментального и расчетного импульсов показывает, что принятые нами положения при анализе переходных процессов близки к действительности.

Оба импульса имеют одинаковую форму, расхождение в длительности порядка $5 \div 7\%$; амплитуды отличаются также незначительно.

Схема впуска при работе бетатрона давала напряжение около 27 кВ. При этом интенсивность излучения отличалась на $10-15\%$ от интенсивности излучения при работе бетатрона с обычной схемой инжекции на тиратроне ТГ 15/3000 при одинаковом токе накала и напряжении инжекции.

Эту разницу можно объяснить тем, что в данной схеме отсутствует точная регулировка фазы инжекций.

Регулирование фазы инжекции в данной схеме может быть заменено изменением длительности и амплитуды импульса. Изменяя емкость C и сопротивление R_1 можно в широких пределах менять длительность и амплитуду импульса инжекции до тех пор, пока не будет достигнуто оптимальное согласование момента инжекции с напряженностью магнитного поля (или кривой необходимого напряжения).

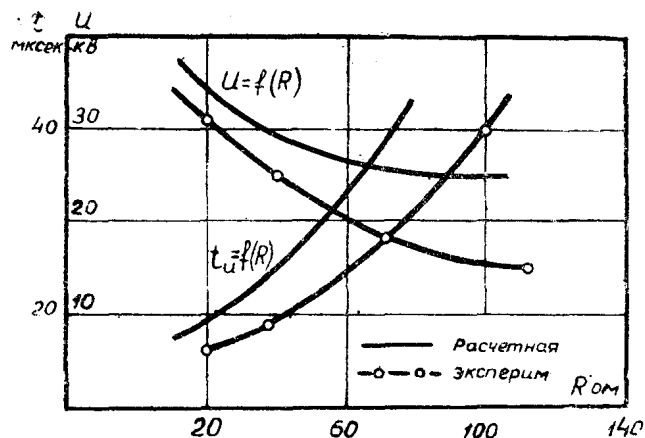


Рис. 3

Полученные нами экспериментальные и расчетные зависимости длительности и амплитуды импульса от величины сопротивления приведены на рис. 3. На рис. 4 показаны экспериментальные зависимости амплитуды и ширины импульса от величины емкости C .

Как уже указывалось выше, форма импульса может быть изменена с помощью подключения небольшого конденсатора ко вторичной обмотке импульсного трансформатора.

Измерения интенсивности излучения, произведенные при подключении различных емкостей от 70 до 2500 мкмкф, при одном и том же напряжении инжекции показали, что изменение формы импульса в этих пределах не ведет к значительному увеличению интенсивности излучения.

Таким образом, расчеты и результаты опытов с упрощенной схемой впуска показывают ее пригодность для практического использования в импульсных ускорителях электронов.

Данная упрощенная схема имеет ряд преимуществ перед схемой на тиратроне.

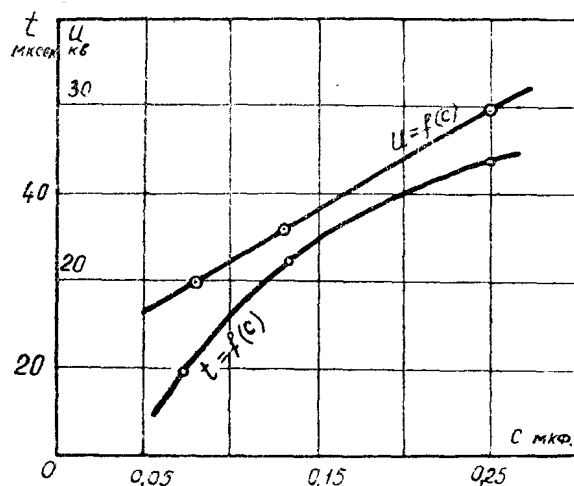


Рис. 4

1. Основным преимуществом является простота схемы.

Вся наша схема состоит из импульсного трансформатора, емкости и переменного сопротивления. Отметим, что обычная схема содержит два газоразрядных прибора — газотрон и тиратрон, накальные и анодные трансформаторы.

2. Схема является более надежной в работе, чем электронные схемы.

3. Схема не боится перегрузок по току.

Недостатком схемы является трудность согласования момента инжекции с напряженностью магнитного поля на орбите, а также невозможность работы на фронте импульса.