

СТАБИЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ БЕТАТРОНА

В. М. РАЗИН

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Стабильность излучения бетатрона зависит от многих причин. Отметим некоторые из них.

1. Колебания напряжения сети влияют на стабильность процессов захвата электронов, т. е. количество электронов, захватываемых в каждом цикле ускорения, изменяется от цикла к циклу, вследствие чего изменяется и среднее значение излучения.

2. Если сброс электронов на мишень осуществляется при постоянной фазе по отношению к магнитному полю бетатрона, то наличие колебаний напряжения сети приводит к изменению энергии электронов в момент сброса. Так как мощность дозы излучения в сильной степени зависит при постоянном среднем токе ускоренных электронов от их энергии в момент торможения (зависимость приближается к кубической), то незначительные изменения энергии являются причиной значительных изменений величины излучения.

3. Датчиком синхронизирующих импульсов для схемы инъекции обычно служит катушка с пермаллоевым сердечником, помещаемая в магнитное поле вблизи рабочей зоны бетатрона. Несовершенство механического крепления этой катушки может привести к нарушению процессов синхронизации и изменению излучения.

4. Вакуумная камера с электронной пушкой подвержена воздействию механических вибраций электромагнита бетатрона, вследствие чего может изменяться положение вакуумной камеры и пушки в магнитном поле бетатрона, а также может изменяться относительное расположение электродов пушки. Все это также влияет на процесс захвата и, следовательно, на интенсивность излучения.

5. Изменение эмиссионных свойств катода электронной пушки влияет на процесс захвата, несовершенство вакуума влияет на процессы захвата и ускорения и т. д.

В этом далеко не полном перечне наиболее существенное влияние на стабильность излучения оказывает первая причина. Это объясняется тем, что для нормальной работы бетатрона точность согласования импульса инъекции во времени по отношению к изменению магнитного поля измеряется величиной порядка десятых и даже сотых долей микросекунды (при частоте питания 50 гц). Малейшее нарушение точного согласования является причиной появления значительных изменений интенсивности излучения.

В целях повышения стабильности работы бетатрона можно осуществить полную стабилизацию всего питания установки, включая и питание электромагнита. Этот способ не является, по нашему мнению, наилучшим,

так как техническое осуществление стабилизации большой мощности (электромагнит потребляет мощность порядка десятка и более киловатт) затруднительно и сопряжено в некоторых случаях со значительными потерями мощности.

Следует считать более целесообразным применение для целей стабилизации различного рода схем автоматической синхронизации и регулировки в электрических схемах бетатрона, оставляя питание узлов, потребляющих большую мощность, нестабилизированным. Здесь могут быть использованы схемы автоматической подстройки фазы генерации импульса напряжения на электронной пушке [1], схемы автоматического регулирования, связанные непосредственно с излучением, как это предлагается в работе [2] и т. п.

Прежде, чем перейти к описанию разработанной нами системы стабилизации излучения бетатрона, рассмотрим теоретическую сторону вопроса.

При напряжениях инжекции порядка $30 \div 80$ кВ для расчетов может быть использовано нерелятивистское соотношение: $\sqrt{U} = 0,297 r H_m \sin \omega t$, (1) где

U — напряжение инжекции в вольтах,

H_m — амплитуда напряженности магнитного поля на равновесной орбите бетатрона в эрстедах,

r — радиус равновесной орбиты в см,

ω — круговая частота тока, питающего электромагнит,

t — время в сек.

Учитывая, что для большинства бетатронов инжекция осуществляется в момент $\omega t \leq 1^\circ$, можно с большой степенью точности (до 0,025%) принять приближение

$$\sin \omega t \cong \omega t.$$

Полагая, что для данного бетатрона $r = \text{const}$, запишем выражение в виде:

$$U = \kappa H_m^2 \omega^2 t^2, \quad (2)$$

где κ — коэффициент пропорциональности.

Рассмотрим возможные варианты выполнения условия (2).

1. Схема регулирования фазы инжекции может быть выполнена таким образом, что будет выполняться равенство $\omega t = \text{const}$. В этом случае напряжение инжекции и амплитуда напряженности магнитного поля для выполнения соотношения (2) должны быть связаны условием

$$U = \kappa_1 H_m^2. \quad (3)$$

Здесь, как и во всех других случаях, будем предполагать, что амплитуда напряженности магнитного поля на орбите связана прямой пропорциональной зависимостью с напряжением сети $U_{сет} = \kappa_2 H_m$, для которой можно написать равенство:

$$\frac{d U_{сет}}{U_{сет}} = \frac{d H_m}{H_m}. \quad (4)$$

Дифференцируя (3) и деля на первоначальное равенство, получим

$$\frac{d U}{U} = 2 \frac{d H_m}{H_m}$$

или в конечных приращениях:

$$\frac{\Delta U}{U} \cong 2 \frac{\Delta U_{сет}}{U_{сет}} = 2 \frac{\Delta H_m}{H_m}. \quad (5)$$

Этот способ выполнения согласования нельзя считать целесообразным, так как практическое выполнение условия (5) затруднительно и к тому же значительное увеличение напряжения инжекции при некотором увеличении напряжения сети нежелательно ввиду опасности пробоя пушки, если учесть, что в целях получения максимальной интенсивности излучения почти всегда приходится работать на пределе электрической прочности пушки.

Единственным преимуществом такого способа является, может быть, лучшее сохранение согласования скорости изменения напряжения инжекции в момент захвата со скоростью изменения необходимого напряжения, определяемого условием (2).

2. Если зарядный трансформатор схемы инжекции питается от того же напряжения, что и электромагнит, или, что еще лучше, от специальной обмотки на электромагните, то напряжение инжекции будет пропорционально напряжению питания:

$$U = \kappa_3 U_{cem} = \kappa_4 H_m. \quad (6)$$

В этом случае на основании (2) и считая, что $\omega = \text{const}$, можно написать:

$$\kappa_4 H_m = \kappa_3 H_m^2 t^2, \quad \text{т. е. } H_m t^2 = \kappa_6. \quad (7)$$

Дифференцирование (7) дает: $\frac{dt}{t} = -\frac{1}{2} \frac{dH_m}{H_m}$. В конечных приращениях, принимая во внимание (4), имеем

$$\frac{\Delta t}{t} \cong -\frac{1}{2} \frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta H_m}{H_m}. \quad (8)$$

Следовательно, при таком способе синхронизации необходимо для выполнения условия (2) при колебаниях напряжения сети соответствующим образом, согласно уравнению (8), изменять фазу генерации импульса напряжения инжекции. Знак минус указывает на то обстоятельство, что возрастание напряжения в сети должно сопровождаться уменьшением времени запаздывания импульса инжекции по отношению к моменту нулевого значения магнитного поля на орбите.

Практическое осуществление этого способа не встречает каких-либо затруднений [1].

3. При питании зарядного трансформатора схемы инжекции от феррорезонансного стабилизатора представляется возможным при колебаниях напряжения сети выполнить условие $U = \text{const}$. Условие (2) здесь сводится к следующему соотношению:

$$H_m^2 t^2 = \kappa_7, \quad \text{или } H_m t = \kappa_8. \quad (9)$$

В результате дифференцирования (9) получаем

$$\frac{dt}{t} = -\frac{dH_m}{H_m}$$

или в конечных приращениях

$$\frac{\Delta t}{t} \cong -\frac{\Delta H_m}{H_m} = -\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}. \quad (10)$$

Практическое исполнение способа легко осуществимо. Постоянство напряжения инжекции в этом случае уменьшает вероятность пробоев электронной пушки при наличии колебаний напряжения сети.

Следует отметить, что во всех этих трех случаях рассматриваются условия сохранения оптимального (в смысле обеспечения максимальной производительности установки) режима работы схемы инжекции. Так как в некоторых способах допускается изменение напряжения инжекции, то этим самым делается допущение возможности появления колебаний интенсивности излучения. Следовательно, под понятием „стабилизация излучения“ мы здесь будем подразумевать собственно стабилизацию оптимальных условий захвата электронов в ускорение, то есть автоматическое поддержание максимальной производительности установки. Такой подход к рассмотрению вопроса практически оправдывается тем, что в большинстве случаев использования бетатрона определяющим является интегральное действие излучения.

Из всех рассмотренных способов предпочтение следует отдать, по нашему мнению, третьему, практическое осуществление которого мало чем отличается от выполнения второго.

Заметим, что при постоянстве напряжения инжекции условия согласования не изменяются и при релятивистских скоростях электронов, выбрасываемых пушкой.

Действительно, нерелятивистское соотношение записывается в виде

$$r H_m \sin \omega t = \frac{10^4}{2,97} \sqrt{U},$$

где напряжение инжекции U выражено в мегавольтах.

Релятивистское выражение имеет вид:

$$r H_m \sin \omega t = \frac{10^4}{3} \sqrt{U(U + 1,02)}.$$

Из рассмотрения этих равенств видно, что и в том и в другом случаях при $U = \text{const}$, $\omega = \text{const}$, $r = \text{const}$ и $\sin \omega t \cong \omega t$ условия согласования являются одинаковыми

$$H_m t = \text{const}.$$

В практических условиях при работе с датчиком синхронизирующих импульсов в виде катушки с пермалловым сердечником необходимо учитывать то обстоятельство, что катушка устанавливается не непосредственно на орбите, а снаружи вакуумной камеры, вблизи рабочей зоны у полюсов. Здесь изменение магнитного поля вследствие размагничивающего действия меди катушек намагничивания немного отстает по фазе от изменения поля на орбите.

Для получения требуемой задержки управляющего импульса, генерируемого в катушке с пермалловым сердечником, по этой же катушке пропускается „постоянный“ ток (постоянный в том смысле, что его величина в момент инжекции не зависит от колебаний напряжения питающей сети) от батареи аккумуляторов или феррорезонансного стабилизатора.

Если в качестве источника постоянного подмагничивания используется феррорезонансный стабилизатор, то в цепь необходимо включить большое активное сопротивление для уменьшения до минимума фазового сдвига между током и напряжением [1].

При наличии такого постоянного подмагничивания фаза генерации управляющего импульса будет при колебаниях напряжения сети автоматически изменяться таким образом, что при правильном подборе параметров все время будут выполняться условия (8) или (10), в зависимости от способа регулировки.

Для того, чтобы осуществить регулировку по второму способу, а при использовании третьего способа иметь возможность учесть фазовый сдвиг в изменении магнитных полей на орбите и в месте установки датчика, необходимо в цепь регулировки ввести „переменное“ подмагничивание (переменное в том смысле, что эта составляющая подмагничивания в момент инжекции должна быть пропорциональна напряжению на электромагните).

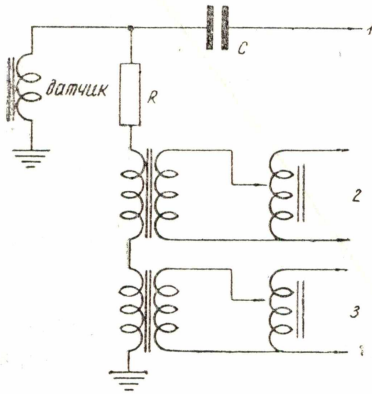


Рис. 1

Переменная составляющая тока подмагничивания может быть получена от трансформатора, напряжение на котором синфазно и пропорционально напряжению на электромагните. Для уменьшения фазового сдвига между током и напряжением в цепь включается большое активное сопротивление.

В простейшем случае схема управления и регулировки имеет вид, представленный на рис. 1 [1].

Величина постоянной и переменной составляющих подмагничивания может быть определена на основании следующих рассуждений. Пусть магнитное поле в месте

установки датчика изменяется по закону:

$$H = H_{m_1} \sin(\omega t - \varphi) \cong H_{m_1}(\omega t - \varphi). \quad (11)$$

За счет токов подмагничивания создается в том же месте магнитное поле

$$H_{подн} = -(H_0 - \kappa_9 H_{m_1}), \quad (12)$$

где

H_0 — поле за счет постоянной составляющей подмагничивания,

$\kappa_9 H_{m_1}$ — поле от переменной составляющей,

κ_9 — постоянный коэффициент, причем $[\kappa_9] \ll 1$.

Очевидно, момент t_0 генерации управляющего импульса определится из условия $H + H_{подн} = 0$, то есть

$$H_{m_1}(\omega t_0 - \varphi) = H_0 - \kappa_9 H_{m_1}.$$

Это выражение приводим к виду

$$\omega t_0 - \varphi = \frac{H_0}{H_{m_1}} - \kappa_9 \quad (13)$$

и дифференцируем, считая переменными (при наличии колебаний напряжения сети) t_0 и H_{m_1} ,

$$\omega dt_0 = - \frac{H_0}{H_{m_1}^2} dH_{m_1}. \quad (14)$$

При использовании второго способа регулировки фазы инжекции должно быть выполнено условие

$$\frac{dt_0}{t_0} = - \frac{1}{2} \frac{dH_m}{H_m} = - \frac{1}{2} \frac{dH_{m_1}}{H_{m_1}}, \quad (15)$$

так как можно предполагать, что амплитуда магнитного поля в месте установки датчика при малых изменениях напряжения сети будет пропорциональна амплитуде поля на орбите, то есть справедливо равенство

$$\frac{dH_m}{H_m} = \frac{dH_{m_1}}{H_{m_1}}.$$

В результате деления (14) на (15) получаем:

$$H_0 = \frac{1}{2} H_{m_1} \omega t_0$$

и из (13) находим для этого способа величину

$$\kappa_9 = \varphi - \frac{\omega t_0}{2}. \quad (16)$$

Так как практически $\varphi < \frac{\omega t_0}{2}$, то в этом случае переменная и постоянная составляющие подмагничивания должны быть направлены, согласно (12), в одну и ту же сторону (против основного поля).

Для третьего способа учитываем условие

$$\frac{dt_0}{t_0} = - \frac{dH_m}{H_m} = - \frac{dH_{m_1}}{H_{m_1}}$$

и находим аналогичным образом:

$$H_0 = H_{m_1} \omega t_0, \quad (17)$$

$$\kappa_9 = \varphi. \quad (18)$$

Переменная и постоянная составляющие подмагничивания здесь имеют противоположные направления (постоянная направлена против основного поля, переменная — по направлению основного поля).

Из (12) и последних соотношений видно, что переменная составляющая подмагничивания компенсирует фазовый сдвиг φ , тогда как постоянная составляющая обеспечивает автоматическое выполнение условия (10) при колебаниях напряжения сети в некоторых пределах.

Величину допустимых отклонений напряжения сети от номинального значения определим для одного частного случая при регулировании по третьему способу.

Для этого случая необходимо выполнить условие

$$U_{cem} t_0 = \text{const} = \kappa_{10}, \quad (19)$$

где t_0 — время инъекции.

В третьем способе практически легко осуществляется выполнение приближенного условия согласования

$$\frac{\Delta t_0'}{t_0} \cong - \frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}. \quad (20)$$

При точном выполнении условия согласования (19) должно быть выполнено соотношение

$$(U_{cem} + \Delta U_{cem}) (t_0 + \Delta t_0'') = \text{const} = \kappa_{10}. \quad (21)$$

В результате деления (21) на (19) получаем условие точного выполнения согласования для конечных приращений $\Delta t_0''$ и ΔU_{cem} :

$$\frac{\Delta t_0''}{t_0} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}} - 1 = - \frac{\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}}{1 + \frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}}. \quad (22)$$

Вычитая почленно (20) из (22), определяем связь между фазовой погрешностью и отклонением напряжения сети от номинального значения

$$\frac{\Delta t_0'' - \Delta t_0'}{t_0} = \frac{\left(\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}\right)^2}{1 + \frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}} \quad (23)$$

Для серии бетатронов на ³⁰ 15 Мэв, изготавливаемых в Томском политехническом институте, $t_0 \cong 50$ мксек при напряжении инжекции около 40 кв. Допустимая погрешность, определенная на основании экспериментальных исследований для колебаний излучения в пределах 5%, измеряется величиной в 0,1 мксек. Следовательно, для этого частного случая

$$\frac{\Delta t_0'' - \Delta t_0'}{t_0} = \frac{0,1}{50} = 0,002.$$

Решая уравнение (23) относительно $\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}$ для этого случая, получим:

$$\frac{\Delta U'_{cem}}{U_{cem}} = +4,6\% \quad \text{и} \quad \frac{\Delta U''_{cem}}{U_{cem}} = -4,4\%,$$

т. е. точное условие согласования (22) выполняется с требуемой относительной точностью в 0,2% только лишь при изменениях напряжения сети в пределах от 95,6 до 104,6% от номинального значения. Для подобных расчетов можно воспользоваться также упрощенной формулой, получаемой из (23), если пренебречь в знаменателе величиной $\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}} \ll 1$

$$\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}} \cong \pm \sqrt{\frac{\Delta t_0'' - \Delta t_0'}{t_0}} \quad (24)$$

Для нашего частного случая по приближенной формуле получаем

$$\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}} = \pm 4,5\%.$$

Для второго способа согласования путем аналогичных выкладок не трудно получить соотношение

$$1 + \frac{\Delta t_0'' - \Delta t_0'}{t_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}}}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}} \quad (25)$$

Решая приближенным методом это кубическое уравнение, для нашего частного случая определяем допустимые колебания напряжения сети при втором способе согласования:

$$\frac{\Delta U_{cem}}{U_{cem}} \cong \pm 8\%.$$

Пользуясь выражением (23) или (25), в зависимости от способа согласования, можно определить допустимые колебания напряжения сети для любых других случаев.

А это надо рассмотреть!

В заключение теоретического рассмотрения вопроса отметим, что во всех наших рассуждениях мысленно предполагался захват электронов при изменяющихся фазовых соотношениях всегда в одной и той же части импульса напряжения инжекции (допустим, всегда на вершине или, что ближе к действительности, на одном и том же участке фронта). Следовательно, влияние формы импульса инжекции на условия согласования здесь не учитывается. Это обстоятельство делает весь анализ в некоторой мере приближенным.

Разработанная нами блок-схема всей системы стабилизации оптимальных условий захвата имеет вид, представленный на рис. 2. Согласно этой схеме стабилизированное с помощью феррорезонансного стабилизатора переменное напряжение используется для питания всех электронных схем, а также для питания накальных цепей схем смещения и инжекции. При использовании третьего способа согласования от этого же стабилизатора, а не от обмотки на магните, как это показано на рис. 2 для второго способа согласования, должен получать напряжение и зарядный трансформатор схемы инжекции.

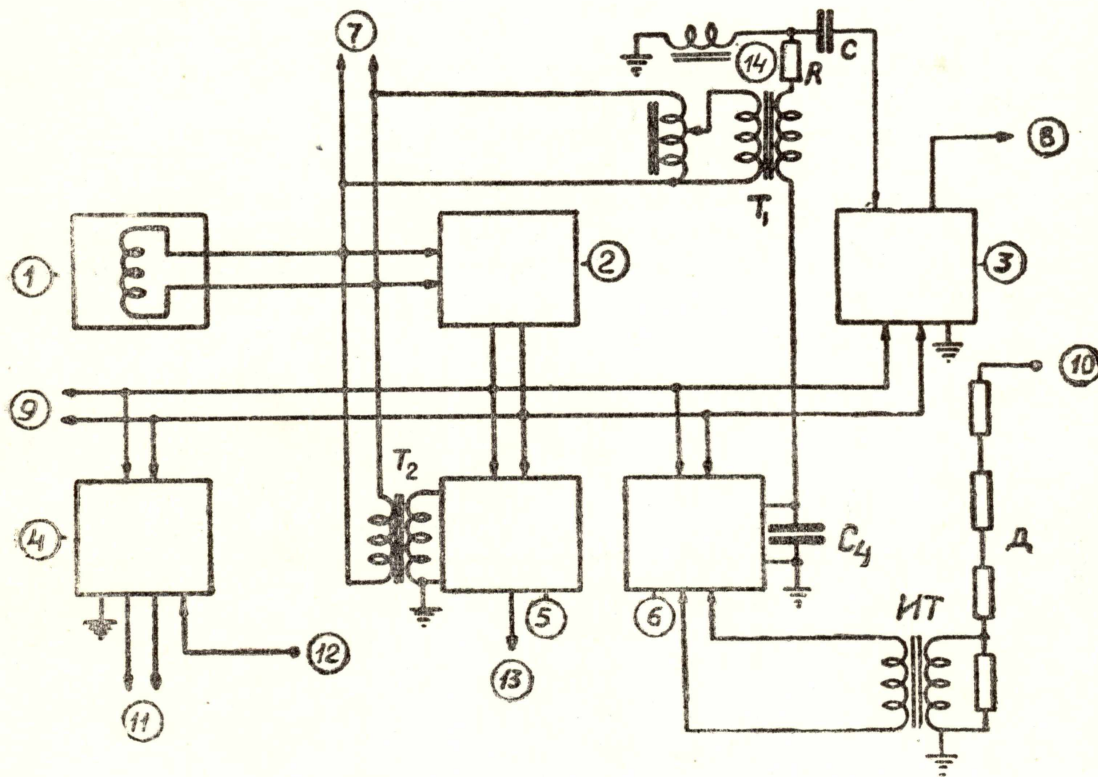


Рис. 2

Блок-схема системы стабилизации

1—Специальная обмотка на магните бетатрона, 2—феррорезонансный стабилизатор напряжения, 3—импульсная электронная схема, 4—стабилизатор тока эмиссии пушки, 5—электронная схема управления фазой сброса, 6—электронный стабилизатор постоянного тока, 7—цепь к зарядному трансформатору схемы инжекции, 8—цепь к сетке тиратрона схемы инжекции, 9—накал схем инжекции и смещения, 10—цепь от импульсного трансформатора схемы инжекции (с катода электронной пушки), 11—накал пушки, 12—цепь с проводящего слоя вакуумной камеры, 13—цепь к сетке тиратрона схемы смещения, 14—датчик в виде катушки с пермаллоем.

Общее потребление мощности от феррорезонансного стабилизатора в этом случае измеряется величиной порядка $500\div 600$ в a , так что размеры стабилизатора не будут велики. Напряжение порядка 220 в со специальной дополнительной обмотки на электромагните используется для питания

трансформатора T_1 , создающего переменную составляющую подмагничивания для получения постоянного фазового смещения импульса инжекции. От этой же обмотки питается зарядный трансформатор схемы инжекции, если используется второй способ согласования. Напряжение, пропорциональное напряжению на электромагните, требуется также для электронной схемы управления фазой сброса, если для автоматической регулировки фазы, обеспечивающей постоянство энергии сбрасываемых на мишень электронов, используется схема с интегрирующей цепью [3,4]. Если же в схеме смещения используется электронная схема с постоянной задержкой, то в качестве задающего импульса следует использовать импульс напряжения от импульсной схемы в сеточной цепи тиратрона схемы инжекции.

Электронная импульсная схема генерирует короткие управляющие импульсы с крутым фронтом (для уменьшения разброса срабатывания тиратрона в схеме инжекции), совпадающим примерно со серединой импульса напряжения от датчика синхронизирующих импульсов, что позволяет уменьшить влияние нелинейности параметров датчика.

Эта схема подобна схеме рис. 9 в одной из опубликованных работ [1], поэтому подробного описания импульсной схемы здесь не приводится.

Описание стабилизатора импульсного тока эмиссии электронной пушки (точнее, среднего значения электронного тока на проводящий слой вакуумной камеры) дано в отдельной работе [5].

Для создания постоянной составляющей подмагничивания в схеме используется электронный стабилизатор постоянного тока, принципиальная схема которого представлена на рис. 3. Применение электронного стабилизатора вместо феррорезонансного позволило исключить возможность влияния на работу схемы частотной зависимости стабилизированного напряжения последнего.

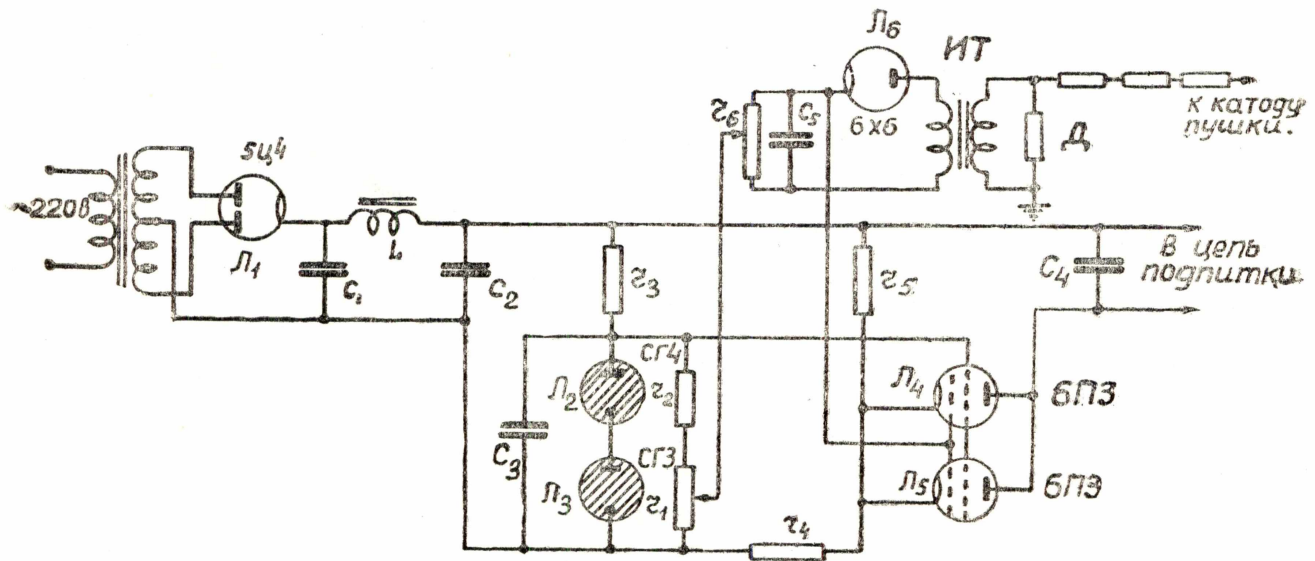


Рис. 3

Емкость C_4 на выходе стабилизатора служит для пропускания тока переменной составляющей подмагничивания. Делитель напряжения D (рис. 2) подключен к катоду электронной пушки. После изолирующего импульсного трансформатора T напряжение выпрямляется (пропускается только напряжение, соответствующее амплитуде рабочего импульса) диодом L_6 и усредняется в цепи C_5R_6 . Усредненное напряжение подается в цепь сеток регулирующих ламп 6П3 (рис. 3) и служит для коррекции постоянной

составляющей тока подмагничивания в зависимости от изменения амплитуды инжекции.

Необходимость в такой коррекции объясняется тем обстоятельством, что изменение напряжения инжекции определяется не только изменением напряжения сети. Так, при использовании третьего способа синхронизации напряжение инжекции, стабилизированное феррорезонансным стабилизатором, будет зависеть от частоты, если не использовать специальные типы стабилизаторов. Далее, как показывает опыт эксплуатации бетатронов, напряжение инжекции может изменяться вследствие изменения под действием механических вибраций распределения тока эмиссии катода пушки между анодом и проводящим слоем вакуумной камеры.

Стабилизатор тока эмиссии поддерживает постоянным ток эмиссии электронов на проводящий слой, так как только при постоянном значении этого тока обеспечивается максимальная производительность установки. Перераспределение токов на слой и на анод изменяет, очевидно, величину общего импульсного тока катода и вследствие этого влияет на величину напряжения инжекции.

Наличие цепи коррекции позволяет осуществить автоматический учет этих изменений напряжения инжекции. В остальном работа электронного стабилизатора постоянного тока подобна работе описанных в литературе [6] схем и в детальных пояснениях не нуждается.

Практическая настройка схемы стабилизации излучения производится следующим образом. При разомкнутой цепи коррекции (лампа Л6 в схеме рис. 3 отсутствует) производится подбор постоянной и переменной составляющих подмагничивания таким образом, чтобы излучение все время было максимальным при изменении напряжения на магните на $\pm 10\%$. После этого включается цепь коррекции и при постоянном напряжении на магните производится подбор постоянной и переменной составляющих управляющего напряжения в схеме электронного стабилизатора тока (с помощью потенциометров r_1 и r_6 схемы рис. 3) так, чтобы излучение все время было максимальным при изменении напряжения инжекции на $\pm 10\%$.

Следует отметить, что описанный выше метод стабилизации оптимальных условий захвата будет действительным также и при наличии изменений в частоте питающего напряжения, поскольку момент захвата определяется величиной параметра ωH_m независимо от того, чем вызвано его изменение (величиной ω или H_m).

Применение описанной здесь схемы стабилизации позволило осуществить весьма эффективную стабилизацию излучения бетатрона сравнительно простыми способами.

Если имеется необходимость в стабилизации интенсивности излучения бетатрона в собственном смысле этого слова, то для цепи регулирования должны быть использованы электронные схемы, связанные с непосредственным измерением излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. W. Dietze, T. M. Dickinson, *Proceedings of the IRE*, 96, 1171—1178, 1949.
2. D. W. Fry, J. Dain, H. H. H. Watson, H. F. Payne, *Proceedings of the IEE*, 97, part I, 305—319, 1950.
3. I. Paul, T. J. Wang, *Electronics*, 19, 156, 1946.
4. L. Katz и др., *Canadian J. of Research*, 28-A, 113, 1950.
5. Разин В. М. Стабилизатор тока эмиссии. Известия ТПИ, 87, 1957.
6. Бонч-Бруевич А. М. Применение электронных ламп в экспериментальной физике, ГИТТЛ, 1954.