

ВЫБОР СИНХРОНИЗИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Л. М. АНАНЬЕВ, М. М. ШТЕЙН

(Представлена научным семинаром кафедры промышленной электроники)

Экстремальный характер зависимости мощности дозы излучения, генерируемого бетатроном, от момента инжекции в основном определяет стабильность работы ускорителя при наличии возмущающих факторов и приводит к необходимости тщательного и обоснованного выбора соответствующих синхронизирующих устройств.

В настоящее время наиболее часто требуемый момент, или фаза инжекции, получается путем задержки импульса, генерируемого датчиком нулевого значения магнитного поля — пикером, подмагничиванием или электронными схемами. Однако указанный способ получения фазы инжекции не является единственным и синхронизация может быть получена от любого периодического процесса, связанного с работой бетатрона: магнитного поля в зазоре, намагничивающего тока в катушке или напряжения на электромагните (рис. 1).

Сложность выбора синхронизирующих устройств определяется не только многообразием возможных способов синхронизации, но также различием режимов возбуждения электромагнитов бетатронов. Так, при смешанном возбуждении электромагнита скорость изменения магнитного поля при переходе через нулевое значение резко уменьшается, что затрудняет применение пикера [1].

Для более обоснованного выбора схем синхронизации был проведен анализ представленных на рис. 1 способов синхронизации с учетом следующих требований:

1. Обеспечение необходимой стабильности момента инжекции электронов.

2. Простота и удобство электрической регулировки фазы инжекции.

3. Возможность введения автоматической коррекции фазы в зависимости от основных дестабилизирующих факторов: напряжения и частоты питающей сети. Такая коррекция позволяет повысить стабильность работы бетатронной установки [2, 3].

4. Возможность создания простых и надежных схем управления.

Несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам синхронизации, требования к временной стабильности схем управления определены недостаточно четко.

Попытка теоретической оценки временной стабильности устройств синхронизации была сделана в [4]. Из этой работы следует, что вблизи максимума относительное изменение интенсивности равно

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{r_0}{b_0} \frac{\Delta t_i}{t_i},$$

где r_0 — радиус равновесной орбиты,

b_0 — полуширина рабочего зазора,

$\frac{\Delta t_i}{t_i}$ — относительное изменение фазы инжекции.

Нами были сняты экспериментально на малогабаритных бетатронах зависимости $I = f(t_i)$ при различных условиях. Для них

$$\frac{\Delta I}{I} = (2,4 \div 3) \frac{\Delta t_i}{t_i}.$$

Эти данные позволяют приблизительно оценить временную нестабильность схемы, которая не должна превышать $0,5 \div 1\%$ с тем, чтобы нестабильность интенсивности, вызванная самой схемой синхронизации, была не больше $3 \div 5\%$. Для высокоэнергетических установок допустимая временная нестабильность, по всей вероятности, должна быть еще меньше.

Наибольшее распространение в настоящее время получила схема управления, когда сигнал с пикера запускает электронную схему задержки [5, 6]. В качестве задерживающего устройства обычно применяют ждущий мультивибратор с регулировкой длительности импульса изменением смещения на сетке нормально запертой лампы (рис. 2). В этом случае временная стабильность схемы синхронизации в основном определяется стабильностью длительности импульса мультивибратора.

Приведенная на рис. 2 схема была подвергнута экспериментальному исследованию. Для изменений анодного напряжения в пределах $\pm 5\%$ нестабильность не превышала $\pm 0,3\%$. Длительность импульса мультивибратора при изменении напряжения накала в сильной степени зависит от величины анодной нагрузки (рис. 3).

Таким образом, при тщательном конструировании и выборе параметров стабильность схем синхронизации со ждущим мультивибратором может быть доведена до $0,6 \div 0,7\%$. При применении фантастронной схемы временная стабильность может быть повышена [7].

Недостатком электронных схем задержки является то, что для компенсации изменений напряжения источника питания необходимо вво-

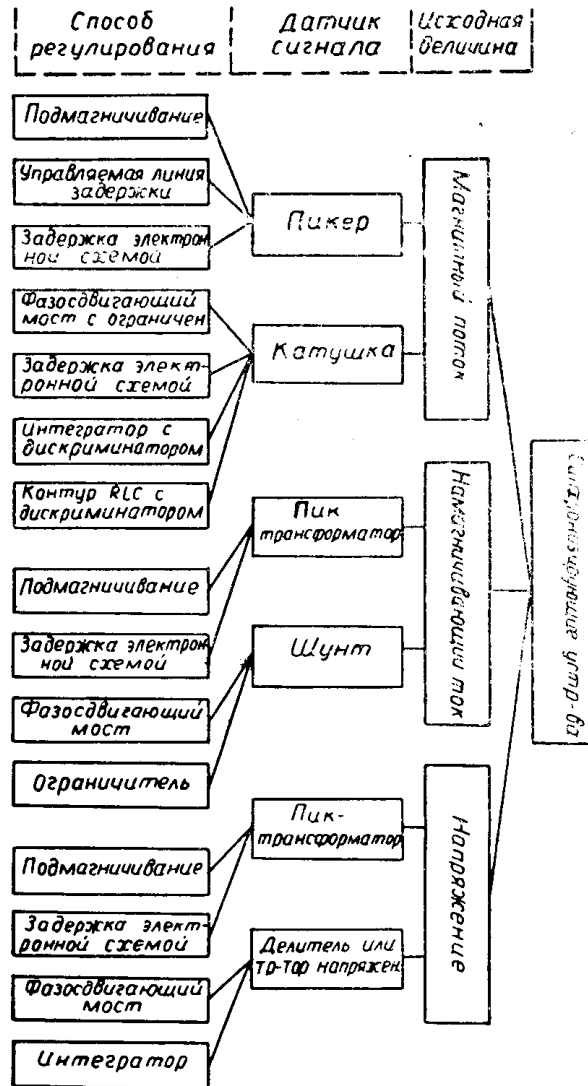


Рис. 1

дить дополнительные устройства. Если электромагнит и схема инжекции питаются нестабилизированным напряжением, требуемое изменение длительности задержки равно

$$\frac{\Delta t_i}{t_i} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta U_{1m} + \Delta(U_{3m} \cos \varphi_3) + \Delta(U_{5m} \cos \varphi_5) + \dots}{U_{1m}} \right],$$

где $U_{1m}, U_{3m}, U_{5m} \dots$ — амплитуды первой, третьей, пятой и т. д. гармоник напряжения питания,

$\varphi_3, \varphi_5 \dots$ — фазы этих гармоник.

В схемах синхронизации с подпиткой пикера импульс, генерируемый пикером, задерживается относительно момента перехода магнитно-

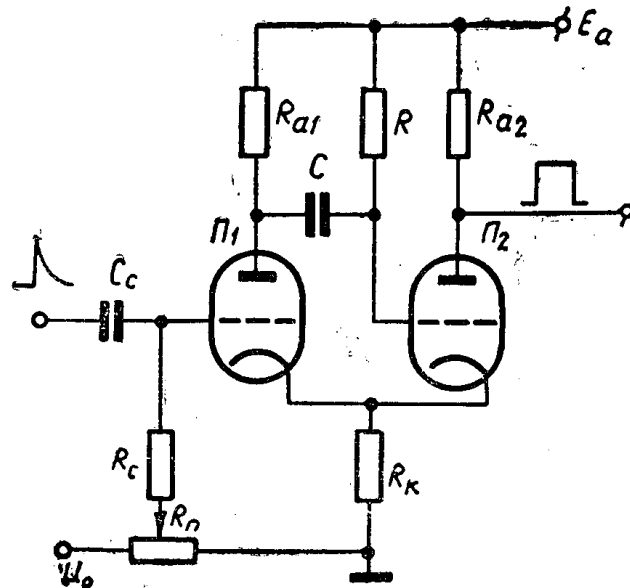


Рис. 2

го поля через нуль на время t_i , определяемое током дополнительного подмагничивания I_n и напряженностью магнитного поля $H_{п/п}$ в месте установки пикера.

$$t_i = \frac{K_n J_n}{H_{п/п} \omega},$$

где K_n — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции пикера.

Момент инжекции определяется только током подмагничивания J_n , и его временная стабильность может быть сделана достаточно высокой.

Преимуществом схемы с подпиткой пикера по сравнению с электронной задержкой является автоматическая компенсация изменений напряжения и частоты источника питания электромагнита. Если отсутствует фазовый сдвиг между магнитными полями в месте установки пикера и на равновесной орбите, изменение тока подмагничивания определяется только отклонениями напряжения инжекции U_i и находится из выражения:

$$\frac{\Delta J_n}{J_n} = \frac{\Delta U_i}{2U_i}.$$

Так как схема инжекции потребляет небольшую мощность, стабилизация напряжения инжекции не представляет затруднений. В этом

случае оптимальные условия инжекции сохраняются при неизменном токе подмагничивания.

Из вышеуказанных способов синхронизации можно выделить те, у которых выходной величиной датчика является напряжение. Все они характеризуются тем, что между напряжением и магнитным потоком имеется фазовый сдвиг на угол порядка $\frac{\pi}{2}$.

Анализ наиболее характерных случаев показал, что, несмотря на простоту, помехоустойчивость, возможность в отдельных случаях добиться компенсации дестабилизирующих факторов, применение этих способов для обычных схем питания бетатронов является нецелесообразным. Это связано с тем, что вследствие большого постоянного сдвига между потоком и напряжением временная неустойчивость схем синхронизации не должна превышать 0,01%, что трудно обеспечить на практике.

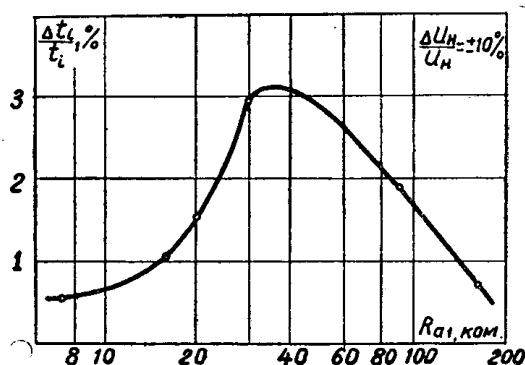


Рис. 3

Для бетатронов со смешанным возбуждением, особенно при больших уровнях

подпитки, когда угол сдвига между нулевым значением магнитного поля и напряжения невелик, этот способ синхронизации может найти применение. Вариант схемы с использованием в качестве датчиков витков, помещенных в междуполосное пространство, и последующей дискриминацией напряжения на определенном уровне был проверен при настройке бетатрона со смешанным возбуждением ПМБ-5 и дал удовлетворительные результаты.

При рассмотрении систем синхронизации по намагничивающему току следует учитывать различные схемы питания обмоток электромагнита. Если бетатрон имеет две обмотки, возбуждающую и намагничивающую, в качестве опорного сигнала может быть выбран только ток намагничивающей обмотки. Для этого случая была построена векторная диаграмма и найдено аналитическое выражение для угла сдвига между током и магнитным потоком. Связь эта достаточно сложна: в нее входят частота питающей сети ω , омическое сопротивление намагничивающей обмотки r_2 , емкость и тангенс угла потерь δ компенсационной батареи C , индуктивности рассеяния.

Пренебрегая нелинейностью электромагнита и индуктивностями рассеяния, выражение для относительного угла сдвига можно записать следующим образом:

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\omega r_2 C}{\omega r_2 C + \operatorname{tg} \delta} \left(\frac{\Delta \omega}{\omega} + \frac{\Delta r_2}{r_2} + \frac{\Delta C}{C} \right) + \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega r_2 C + \operatorname{tg} \delta} \cdot \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta}.$$

Эксперименты позволили также установить, что для такой схемы питания электромагнита связь между намагничивающим током и магнитным потоком определяется рядом трудноконтролируемых величин: угол сдвига зависит сложным образом от напряжения питания, существенна также температурная зависимость угла α . Рассмотренные факторы приводят к значительным временным изменениям момента инжекции и неустойчивости излучения. Поэтому применение этого способа синхро-

низации для бетатронов с возбуждающей и намагничивающей обмоткой, по всей вероятности, нецелесообразно.

Если бетатрон имеет только намагничивающую обмотку, которая чаще всего питается от повышающего трансформатора, угол сдвига между током и потоком зависит от величины реактивной и активной составляющей полного сопротивления магнитной цепи и конструктивных размеров электромагнита. Приближенное выражение для угла сдвига имеет вид:

$$\alpha = \frac{\rho_x}{\rho_R + \frac{\delta_0 \kappa_c r_n}{2 \sqrt{2} \mu_0 I_{cp} \sigma r_0}},$$

где ρ_x и ρ_R — удельное реактивное и активное сопротивление стали магнитопровода,

I_{cp} — длина средней силовой линии магнитного потока в стали,

κ_c — коэффициент заполнения по стали,

δ_0 — зазор на равновесной орбите,

r_n — наружный радиус полюса,

σ — коэффициент рассеяния полюсов электромагнита.

Абсолютное значение угла сдвига для переносных бетатронов на частоте 50 гц составляет величину порядка 30 мксек. Зависимость угла α от напряжения питания определяется удельным активным сопротивлением ρ_R , так как ρ_x почти не зависит от индукции [8]. В области значений индукций 10 ÷ 15 кгс активное сопротивление ρ_R резко растет, но для бетатронов магнитное сопротивление воздушного зазора значительно больше, чем сопротивление стального магнитопровода, поэтому уменьшение угла α с ростом напряжения незначительно.

Зависимость угла сдвига α от частоты питающей сети полностью определяется удельным реактивным сопротивлением ρ_x , которое зависит от частоты так же, как потери в стали, т. е. степени 1,3.

Уменьшение угла сдвига α при изменении напряжения питания от нуля до максимального невелико и составляет величину порядка 5 мксек на частоте 50 гц. Температурные изменения угла α находились в пределах погрешности эксперимента.

Таким образом, проведенный выше анализ различных способов синхронизации позволяет установить, что схема с подмагничиванием пикера способна обеспечивать создание более простых и стабильных систем синхронизации. Если по тем или иным причинам получение необходимого момента инжекции путем подпитки пикера нежелательно, следует применять электронную схему задержки. Для установок, в которых применение пикера принципиально невозможно (например, при смешанном возбуждении электромагнита), необходимо использовать системы синхронизации по магнитному потоку, а для бетатронов с одной обмоткой возбуждения — по намагничивающему току.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Ярушкин. Кандидатская диссертация. Томск, ТПИ, 1965.
2. В. М. Разин. Изв. ТПИ т. 87, 206, 1957.
3. Н. Я. Макаров. Кандидатская диссертация, Томск, ТПИ, 1966.
4. Л. М. Ананьев, Я. С. Пеккер. Зависимость интенсивности излучения бетатрона от фазы инжекции. Тезисы докладов VI Межвузовской конференции по электронным ускорителям, Томск, 1966.
5. Л. М. Ананьев, В. Л. Чахлов, Я. А. Шарашин, М. М. Штейн. Переносный малогабаритный бетатрон ПМБ-3, ПНТПО, № 2-64-624/14, ГОСИНТИ, М., 1964.
6. Бетатрон Б-25/10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, НИИЭИ, Томск, 1963.
7. Л. А. Меерович, Х. Г. Зеличенко. Импульсная техника. «Сов. радио», М., 1953.
8. Б. К. Буль. Основы теории и расчета магнитных цепей. Энергия, М.—Л., 1964.