

## К ВОПРОСУ СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ

Б. А. БАГИНСКИЙ, Ю. А. ОТРУБЯННИКОВ, М. М. ШТЕЙН

(Представлена кафедрой промышленной и медицинской электроники)

Установлено, что для бетатронов одними из наиболее перспективных являются системы питания, обеспечивающие однополярные импульсы тока при однополярном режиме работы по напряжению накопительной батареи конденсаторов. В работах [1, 2, 3] рассмотрены и исследованы различные варианты подобных схем, а также некоторые вопросы стабилизации питания магнита. В качестве основного, и зачастую единственного, дестабилизирующего фактора рассматривалось изменение напряжения питающей сети. Однако тяжелый тепловой режим работы бетатронов [4] приводит к существенному изменению параметров контура магнита в процессе работы. Поэтому достаточно актуальным является вопрос исследования влияния указанных параметров на стабильность интенсивности излучения.

Кроме этого, до настоящего времени основное внимание уделялось стабилизации непосредственно интенсивности излучения (среднего значения, импульсного и т. д.). Новые области применения импульсных бетатронов, связанные с контролем взаимного положения деталей механизмов, находящихся в периодическом движении, предъявляют высокие требования к стабильности временных интервалов работы, и, в частности, к стабильности интервалов между запуском ускорителя и моментом получения импульса излучения.

При исследовании вопросов стабилизации следует различать системы импульсного питания с индуктивным и емкостным вводом энергии, а также способ коммутации тока, так как они в значительной степени определяют количественное влияние дестабилизирующих факторов и принципы построения схем стабилизации.

В настоящей статье оценивается влияние дестабилизирующих факторов для систем питания без искусственной коммутации с вводом энергии в индуктивность и емкость контура бетатрона. Система возбуждения электромагнита бетатрона при индуктивном вводе энергии показана на рис. 1. [5]. В исходном состоянии напряжение контурной емкости  $C_k$  больше напряжения на фильтровой емкости  $C_f$ . С приходом управляющего импульса на тиристор ввода энергии  $T_1$  ток в электромагните  $L_k$  начинает нарастать. Когда величина этого тока становится до-

статочной для компенсации потерь за импульс, включаются тиристоры прямой ветви  $T_2$  и  $T_3$  емкость  $C_k$  разряжается на электромагнит, а тиристор ввода выключается. При достижении напряжения на  $C_k$  некоторого отрицательного значения ( $U_1$ ), которое определяется вольтсекундами коммутирующего дросселя  $Dp_1$ , происходит перехват тока из це-

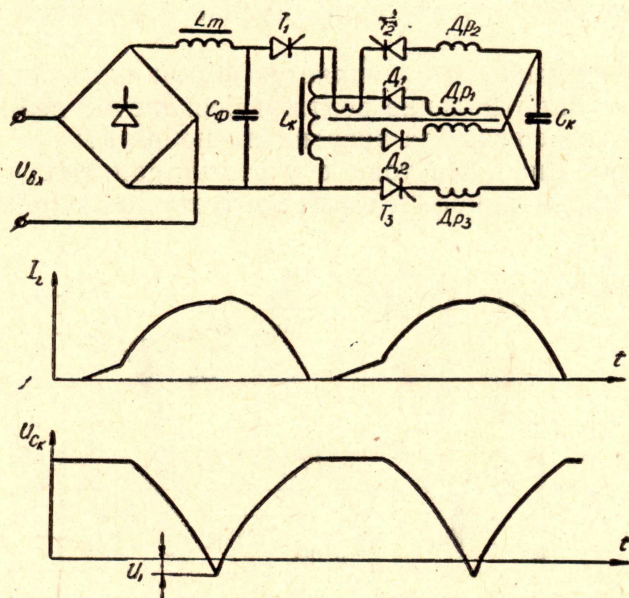


Рис. 1

пи тиристоров в цепь диодов. Текущий по цепи перезаряда  $L_k$ ,  $D_2$ ,  $C_k$ ,  $D_1$  ток заряжает конденсаторную батарею  $C_k$  с первоначальной полярностью. Сброс ускоренных электронов осуществляется в момент перехвата тока в диодную цепь [6]. На рис. 2 показана схема импульсного питания с емкостным вводом энергии [1]. Отличим ее от рассмотрен-

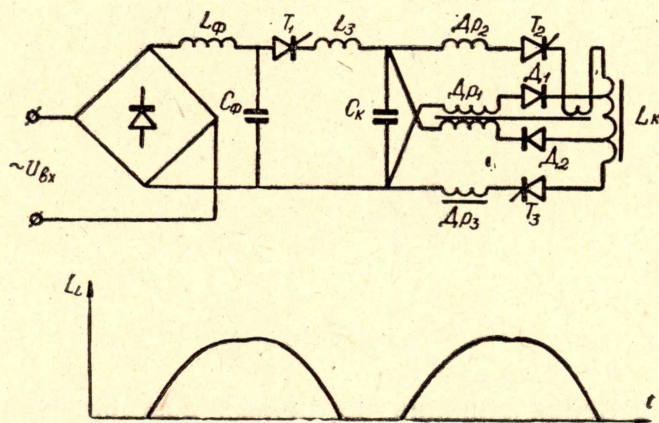


Рис. 2

ной выше схемы является то, что тиристор ввода, присоединенный к контурной емкости  $C_k$ , открывается в момент времени, когда произошла коммутация тока в контуре магнита. При этом ток от источника начинает подзаряжать емкость  $C_k$ , и при равенстве его нулю тиристор ввода энергии закрывается.

Требования стабилизации интенсивности излучения применительно к системе формирования магнитного поля сводятся к обеспечению стабильного значения индукции в момент сброса электронов и, следовательно, стабильного значения  $B_{\max}$  в рассматриваемых схемах.

Для сравнения различных систем питания в первом приближении можно считать, что величина индукции в обмотке электромагнита прямо пропорциональна току. При анализе принимаем следующие допущения:

1. Фильтровая емкость  $C_f$  является источником напряжения.
2. Обратное сопротивление вентиля бесконечно велико.
3. Потерями в цепи ввода энергии пренебрегаем.

Максимальное значение тока с учетом принятых допущений соответственно для индуктивного и емкостного вводов запишется

$$I_m^L = e^{-\frac{R}{2\omega L_K} \operatorname{arctg} \frac{2}{R \sqrt{\frac{C}{L_K} + 2} \sqrt{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L_K}}}} \cdot \frac{U_c t_B}{L_K} \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L_K}}} + 1}}, \quad (1)$$

$$I_m^C = \left[ 2C \sqrt{\frac{U_c (U_c - U_1)^3}{3L_p L_K (e^{\frac{\pi R}{2\omega L_K}} - e^{\frac{\pi R}{2\omega L_K}})}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

здесь

- $L_K$  — индуктивность намагничения магнита;  
 $C$  — емкость контурной батареи конденсаторов;  
 $R$  — эквивалентное сопротивление потерь в контуре;  
 $t_B$  — время ввода энергии при индуктивном вводе.

Временной интервал между запускающим импульсом и максимумом тока определяется

$$t^L = \frac{I_m L_K}{U_c} e^{-\frac{R}{2\omega L_K} \operatorname{arctg} \frac{1}{\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L_K} + 1} \sqrt{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}{2 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}}} + \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{1}{\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L_K} + 1} \sqrt{1 - e^{-\frac{\pi R}{\omega L}}}}, \quad (3)$$

$$t^C = \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{2\omega L}{R}. \quad (4)$$

Для исследования влияния различных дестабилизирующих факторов, относительные изменения которых невелики, найдем выражение, связывающее непосредственное приращение функции с приращением аргументов. Изменение тока и времени при отклонении параметров ( $R, L_K, C, U_c, t_B, U_1$ ) может быть найдено разложением в ряд Тейлора:

$$\frac{\Delta I_m^L}{I_m^L} = K_U^L \frac{\Delta U_c}{U_c} + K_t^L \frac{\Delta t}{t} + K_R^L \frac{\Delta L_K}{L_K} + K_C^L \frac{\Delta C_K}{C_K}. \quad (5)$$

Здесь коэффициенты

$$K_u^L = K_t^L = 1; K_R^L = -\frac{1}{2Q}\gamma; K_L^L = -\frac{1}{4Q}\gamma; K_c^L = -1 + \frac{1}{4Q}\gamma;$$

$$\text{где } \gamma = m - n + p; m = \operatorname{arctg} \frac{1}{\frac{1}{2Q} \sqrt{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}}}};$$

$$n = \frac{1 + \pi \frac{e^{-\frac{\pi}{Q}}}{\sqrt{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}}}}}{2Q \left[ 1 + \left( \frac{1}{2Q} + \sqrt{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}}} \right)^2 \right]}; \quad p = \frac{\pi e^{-\frac{\pi}{Q}}}{(1 - e^{-\frac{\pi}{Q}})(2 - e^{-\frac{\pi}{Q}})};$$

$$\frac{\Delta t^L}{t^L} = K_u^L \frac{\Delta U_c}{U_c} + K_I^L \frac{\Delta I_m}{I_m} + K_R^L \frac{\Delta R}{R} + K_L^L \frac{\Delta L_K}{L_K} + K_c^L \frac{\Delta C_K}{C_K}. \quad (6)$$

Коэффициенты

$$K_u^L = -K_I^L = 1; K_R^L = \frac{1}{2Q} \left( \gamma + \frac{1}{2Q} - 2Q \frac{n}{m} \right),$$

$$K_L^L = 1 - \frac{1}{4Q} \left( \gamma - 2Q + \frac{1}{Q} - 4Q \frac{n}{m} \right); \quad K_c^L = \frac{1}{4Q} \left( \gamma + 2Q - 4Q \frac{n}{m} \right);$$

Для емкостного ввода

$$\frac{\Delta I_m^c}{I_m^c} = K_1^c \frac{\Delta U_c}{U_c} + K_2^c \frac{\Delta U_1}{U_1} + K_R^c \frac{\Delta R}{R} + K_L^c \frac{\Delta L_K}{L_K} + K_c^c \frac{\Delta C}{C}. \quad (7)$$

Коэффициенты

$$K_1 = 1 - K_2 = \frac{4 \frac{U_{co} + 1}{U_1}}{4 \left( \frac{U_{co}}{U_1} + 1 \right)}; \quad K_R^c = -\frac{\pi}{8Q} \beta;$$

$$K_L^c = \frac{\pi}{8Q} \beta - \frac{1}{4}; \quad K_c^c = \frac{1}{2} - \frac{\pi}{16Q} \beta,$$

где

$$\beta = \frac{e^{\frac{\pi}{Q}} + 1}{e^{\frac{\pi}{Q}} - 1};$$

$$\frac{\Delta t_c}{t_c} = K_R^c \frac{\Delta R}{R} + K_L^c \frac{\Delta L}{L} + K_c^c \frac{\Delta C}{C}. \quad (8)$$

Коэффициенты

$$K_R^c = \frac{1}{4Q^2} - 2Qd; \quad K_L^c = \frac{1}{2} + 44Q^2d; \quad K_c^c = \frac{1}{2} - Qd;$$

где

$$d = \frac{1}{(1+4Q^2) \operatorname{arctg} 2Q}$$

Полученные выражения позволяют определить возможное влияние каждого из дестабилизирующих факторов, а также просчитать необходимые законы регулирования для выбранного способа стабилизации. На рис. 3 и 4 представлены зависимости коэффициентов, характеризующих влияние изменения параметров контура, от добротности  $Q$ . Анализируя полученные результаты для индуктивного и емкостного ввода энергии, можно отметить следующее:

1. Стабильность временных интервалов импульсов излучения, а также стабильность максимума тока при применении системы импульс-

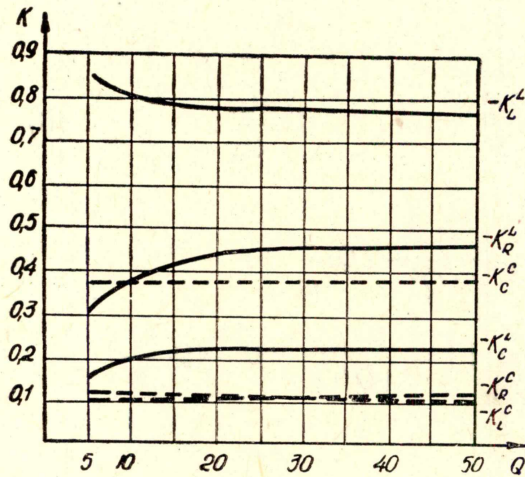


Рис. 3

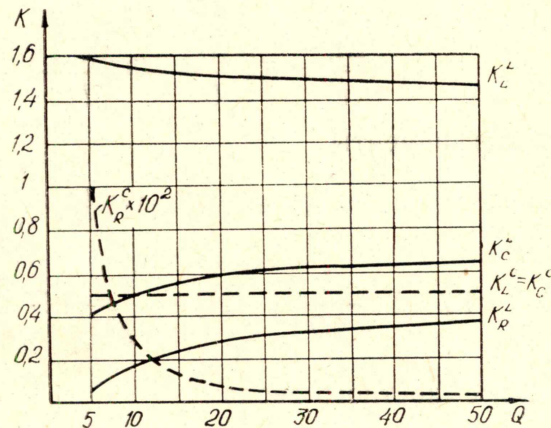


Рис. 4

ного питания с вводом энергии в индуктивность магнита наиболее сильно зависит от изменения параметров цепи ввода ( $U_c, t_B$ ), а также изменения индуктивности электромагнита, причем стабильность временного промежутка в наибольшей степени зависит от  $L_K$ .

2. При вводе энергии в емкость контура основное влияние на стабильность импульсов тока оказывает напряжение питающей сети и величина емкости конденсаторной батареи, а стабильность временных интервалов определяется постоянством индуктивности и емкости контура бетатрона.

3. Индуктивный ввод энергии при стабилизации как временных интервалов, так и максимума тока предъявляет существенно более жесткие требования к стабильности параметров контура, чем емкостной.

4. Так как время ввода энергии в индуктивность магнита входит в интервал между запуском ускорителя и моментом получения импульса излучения, то наиболее разработанный метод стабилизации поля путем регулирования этого времени является неприемлемым для систем, предъявляющих требования к стабильности временных интервалов. Одновременная стабилизация указанных параметров для систем питания с вводом энергии в индуктивность возможна лишь путем применения отдельного стабилизированного источника питания, причем может оказаться целесообразным применение регулируемого в функции изменения параметров контура источника стабилизированного постоянного напряжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ивашин. Коммутация тока в схемах создания магнитных полей и электрических машинах. Диссертация, 1968.
  2. Э. Г. Фурман. Разработка и исследование схем импульсного питания электромагнитов ускорителей. Диссертация, 1972.
  3. Ю. П. Ярушкин, П. Г. Гордеев, П. П. Румянцева. Разработка и исследование системы импульсного питания малогабаритного бетатрона. Научный отчет НИИЯФ ЭА, 1972.
  4. А. А. Гейзер, В. С. Логинов, В. Л. Чахлов. Исследование бетатрона на энергию до 6 Мэв с импульсным питанием. Труды НИИЯФ ЭА при ТПИ. Вып. 2, Атомиздат, 1972.
  5. А. А. Гейзер, Г. Л. Чахлов, В. Л. Чахлов. К вопросу выбора способа ввода энергии в электромагнит бетатрона. Отчет НИИЯФ ЭА, 1972.
  6. А. А. Гейзер, В. В. Бажилин, В. Л. Чахлов. Выбор системы сброса электронов в импульсном бетатроне. Отчет НИИЯФ ЭА, 1972.
-