

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ БЕТАТРОНОВ С ПОВЫШЕННЫМИ УДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А. А. ГЕЙЗЕР, В. Л. ЧАХЛОВ, М. М. ШТЕПН

(Представлена научным семинаром сектора ПМБ)

Переносные малогабаритные бетатроны типа ПМБ-6 [1], которые в настоящее время выпускаются мелкими сериями, весьма эффективно применяются для контроля рентгенографическим способом различных материалов и изделий с эквивалентной толщиной по стали от 30 до 250 мм в нестационарных условиях.

Важной характеристикой для данных типов бетатронов является отношение мощности экспозиционной дозы к весу всей установки или к весу блока излучения, которые будем называть удельными характеристиками бетатрона.

Улучшение удельных характеристик позволяет повысить производительность контроля как за счет сокращения времени экспозиции, так и за счет уменьшения затрат времени на транспортировку и установку излучателя у контролируемого участка детали. При разработке переносных малогабаритных бетатронов с повышенными, по сравнению с ПМБ-6, удельными характеристиками, рассматривалась возможность увеличения частоты следования импульсов излучения, повышения напряжения инжекции, применения новых материалов, а также совершенствования технологии изготовления и создания более оптимальных конструкций электромагнитов.

Из известных схем возбуждения электромагнитов бетатронов [2, 3], позволяющих повышать частоту следования импульсов излучения, наиболее перспективной является импульсная схема питания [4], обеспечивающая протекание по обмотке электромагнита однополярных импульсов тока при однополярном напряжении на конденсаторной батарее.

Как показано в [5] переход от возбуждения электромагнита переменным током частотой 50 гц к питанию однополярными импульсами тока при неизменных суммарных потерях в электромагните, а также одинаковом его весе позволяет довести частоту следования импульсов тока до 200 в секунду, а следовательно, и увеличить мощность дозы тормозного излучения, генерируемого бетатроном, в 4 раза.

Для исследования особенностей работы бетатрона с импульсным возбуждением электромагнита была изготовлена экспериментальная бетатронная установка, рассчитанная на энергию 6 Мэв, состоящая из четырех блоков: излучателя, импульсных схем, конденсаторов и пульта управления.

В блоке излучателя этого бетатрона использовался электромагнит от бетатрона типа ПМБ-6 [1].

Параметры импульсов возбуждения следующие: длительность импульсов тока 2500 мксек, скважность следования импульсов равна 2, амплитуда импульсов тока — 376 а.

Схема питания электромагнита приведена на рис. 1 и работает следующим образом. С момента подачи запускающих импульсов на тиристоры T_1 и T_1' предварительно заряженная конденсаторная батарея C_k разряжается на обмотку электромагнита L_k . В момент, когда напряжение на емкости C_k равно нулю, открываются диоды D_1 и D_1' , но дрос-

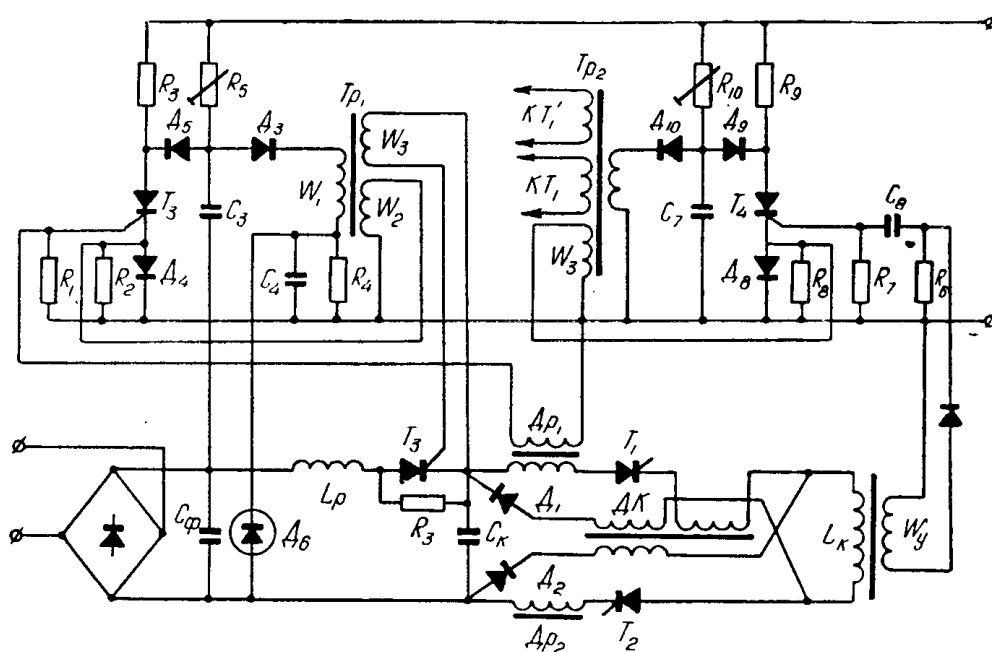


Рис. 1.

сель насыщения задерживает нарастание тока в них на время, достаточное для закрытия тиристоров T_1 , T_1' . После перехвата тока в диоды ток емкости изменяет направление, и при спаде тока в индуктивности емкость C_k заряжается до напряжения первоначального знака.

Для компенсации потерь в контуре от емкости фильтра выпрямителя C_Φ через индуктивность L_p и тиристор T_2 осуществляется ввод энергии. Если питание бетатрона осуществляется от низковольтного источника, то тиристор ввода T_2 включается после перехвата тока из тиристоров T_1 , T_1' , в диоды D_1 , D_1' .

Стабилизация максимального значения магнитного поля в рабочем зазоре бетатрона при нестабильном напряжении источника питания осуществляется путем регулирования порции вводимой энергии в колебательный контур. Количество вводимой энергии регулируется изменением времени включения тиристора T_2 относительно момента закрытия тиристоров T_1 и T_1' .

Анализ процесса ввода энергии в предположении, что за время ввода ток в контуре $C_k L_k$ остается постоянным и напряжение на емкости C_Φ не изменяется, показал, что за время ввода

$$t_b = \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{U_{c\Phi} - U_1}{\rho I_k},$$

в контур вводится

$$Q_{\text{в}} = \frac{2 U_{\text{сф}} C_k^2 (U_{\text{сф}} - U_1)^3}{3 L_p I_k^2}$$

джоулей энергии, где

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_p C_k}} \text{ — резонансная частота контура подзаряда,}$$

$U_{\text{сф}}$ — напряжение на фильтрующей емкости выпрямителя,

U_1 — напряжение на конденсаторе контура в момент начала ввода энергии,

$\rho = \sqrt{\frac{L_p}{C_k}}$ — характеристическое сопротивление контура цепи подзаряда. Для поддержания в контуре электромагнита неизменной энергии задержка момента включения тиристора ввода энергии T_2 относительно перехвата тока в контуре подчиняется зависимости

$$t_3 = \frac{1}{\omega_k} \arcsin \frac{\left(4,3 \Delta U_{\text{сф}} - \frac{\Delta U_{\text{сф}} U_1}{U_{\text{сф}}} \right)}{U_{\text{сф}} e^{-\alpha/2}} \cdot \frac{\omega_k}{\omega_{0k}}, \quad (3)$$

где $\omega_k = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k} - \frac{r_k}{2L_k}}$ — собственная частота контура,

$$\omega_{0k} = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} \text{ — резонансная частота контура,}$$

$U_{\text{сф}}$ — напряжение на конденсаторе контура,

$$\alpha = \frac{r_k}{2L_k} \text{ — коэффициент затухания контура,}$$

$\Delta U_{\text{сф}}$ — изменение напряжения на емкости фильтра,

$$T = 2\pi \sqrt{L_k C_k - \frac{2L_k}{r_k}} \text{ — период собственной частоты контура.}$$

Такая зависимость реализуется схемой задержки [6], включающей динистор D_3 , конденсаторы C_3, C_4 , резисторы $R_1—R_5$, трансформатор T_{p1} , тиристор T_3 и диоды D_4, D_5 .

Схема принимает исходное состояние после того, как подано питающее напряжение и потенциал на интегрирующей емкости C_3 достиг величины, при которой включается динистор D_3 . При этом конденсатор C_3 через внутреннее сопротивление источника опорного напряжения разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора T_{p1} . Возникший на вторичной обмотке W_2 импульс приводит тиристор T_3 во включенное состояние. Режим работы тиристора выбирается таким, что он удерживается включенным. Это обеспечивается соответствующим выбором величины резистора R_3 из условия

$$\frac{E_a (R_3 + R_5 + r_{д5} + r_{д4})}{R_3 (R_5 + r_{д5})} = I_T \gg I_{уд}, \quad (4)$$

где I_T — ток тиристора,

E_a — напряжение источника питания,

$I_{уд}$ — ток удержания тиристора,

$r_{д4}, r_{д5}$ — внутреннее сопротивление диодов D_4 и D_5 .

Динистор выключается после полного разряда конденсатора C_3 . Исходным состоянием схемы является такое, когда тиристор T_3 включен, а динистор D_3 выключен. С приходом запускающего импульса с обмотки W_3 тиристор T_3 закрывается. Протекающий по цепи $R_5 C_3$ ток заряжает конденсатор, и напряжение на его обкладках экспоненциально возрастает.

$$U_{c3}(t) = U_{c3}(0) + [E_a - U_{c3}(0)](1 - e^{-\frac{t_{\text{зад}}}{T}}), \quad (5)$$

где $T_1 = R_5 C_3$, $t_{\text{зад}}$ — время задержки импульса. Динистор включается тогда, когда

$$U_{c3}(t) - U_{\text{оп}} = U_{\text{вкл}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{оп}}$ — величина опорного напряжения.

Возникающий при этом импульс на обмотке трансформатора W_2 возвращает схему в исходное состояние, а импульс с обмотки W_3 служит для включения тиристора ввода энергии T_2 .

Из формул (5) и (6) видно, что при изменении величины опорного напряжения изменяется момент включения динистора, т. е. величина задержки импульса включения тиристора ввода энергии.

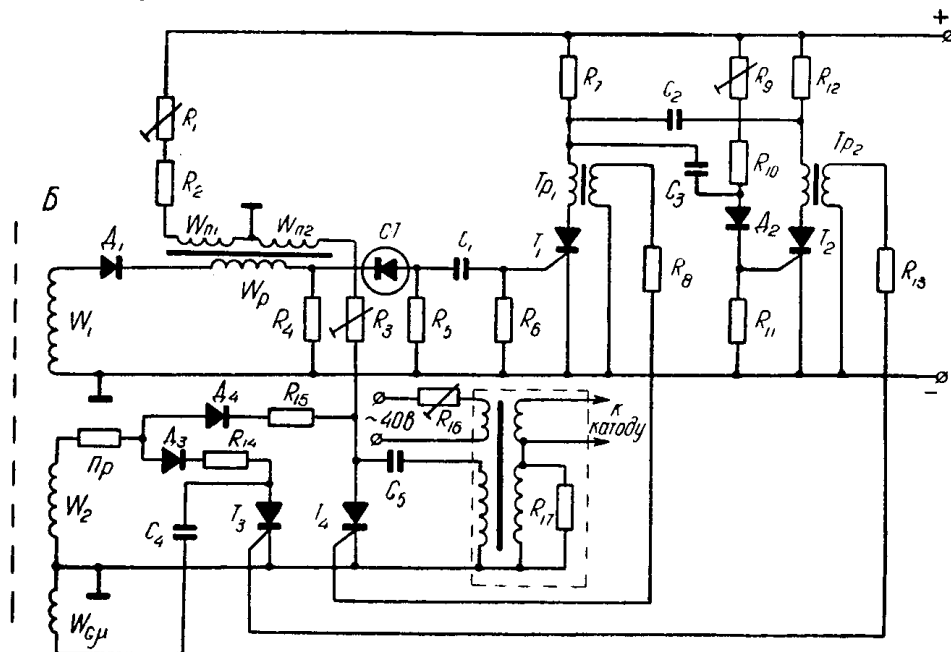


Рис. 2.

При испытании схема стабилизации работала удовлетворительно и при изменении напряжения на конденсаторе фильтра $C_{\text{ф}}$ в пределах от 200 до 300 в обеспечивала изменение напряжения на конденсаторе контура $C_{\text{к}}$ в пределах 1,5 в.

Схема, задающая момент включения тиристов колебательного контура T_1 и T_1' и тем самым определяющая скважность импульсов тока в обмотке электромагнита, построена аналогично вышеописанной схеме задержки. Ее запуск осуществляется продифференцированными цепочками $C_7 R_2$ импульсами с дополнительной обмотки W_y электромагнита.

Схемы синхронизации, инжекции и смещения (рис. 2), выполненные полностью на полупроводниковых приборах, кроме своей простоты, от-

личаются от известных схем тем, что для задержки момента инъекции используется одноконтурный магнитный усилитель МУ. Применение такого усилителя с обмоткой подмагничивания, ток которой пропорционален напряжению инъекции, позволяет автоматически поддерживать оптимальный момент инъекции при изменении напряжения на электромагните в небольших пределах. Обмотка подмагничивания $W_{п1}$ служит для регулирования момента инъекции вручную. Ампер-витки обмоток $W_{п1}$ и $W_{п2}$ устанавливаются примерно одинаковыми.

Напряжение с витков W_1 , охватывающих центральный магнитный поток бетатрона, через диод D_1 подается на рабочую обмотку магнитного усилителя. После включения тиристоров колебательного контура через некоторое время, определяемое параметрами МУ и ампер-витками $W_{п1}$, $W_{п2}$, сердечник МУ перемагничивается. На сопротивлении R_4 возникает перепад напряжения, который через стабилитрон S_T и дифференцирующую цепь C_1R_6 поступает на управляющий электрод тиристора T_1 .

На тиристорах T_1 и T_2 собрана схема ждущего мультивибратора, длительность импульса которого регулируется сопротивлением R_9 и определяет момент смещения электронов на мишень.

Схемы смещения и инъекции состоят из зарядных вентилях D_3 и D_4 , зарядных сопротивлений R_{14} и R_{15} и накопительных конденсаторов C_4 и C_5 . В качестве коммутаторов используются тиристоры T_3 и T_4 со средним током 25 а и напряжением 600 в.

Трансформатор Tr_4 служит для получения импульсного напряжения инъекции с амплитудой порядка 30 кВ и длительностью 10 мсек. С импульсным трансформатором конструктивно в один блок объединен высоковольтный накальный трансформатор Tr_3 .

Поскольку при переходе на импульсный режим питания распределение потерь между элементами электромагнита зависит от параметров импульсов, а теоретическое исследование этого вопроса сопряжено с определенными трудностями, на экспериментальном образце импульсного бетатрона на 6 МэВ, наряду с другими вопросами, детально исследовался температурный режим электромагнита бетатрона и распределение потерь в его частях.

Потери в намагничивающих обмотках, найденные экспериментально, составляют 746 Вт, а в магнитопроводе — 551 Вт.

Подсчет джоулевых потерь, без учета дополнительных, обусловленных наличием полей рассеяния, показывает, что в намагничивающих обмотках они должны составить при этом режиме питания всего лишь 164,2 Вт. Таким образом, при расчете и конструировании намагничивающих обмоток необходимо учитывать дополнительные потери от полей рассеяния, которые, как видно, значительно превышают джоулевые потери.

Исследование магнитных характеристик рабочего зазора электромагнита бетатрона, питаемого однополярными импульсами тока, и сравнение их с аналогичными характеристиками этого же электромагнита, возбуждаемого синусоидальным током от сети 50 Гц, показало, что переход на импульсное питание не привел к их существенному изменению.

Настройка бетатрона на излучение показала, что с одной и той же ускорительной камерой, при одинаковом напряжении импульса инъекции, мощность экспозиционной дозы излучения возросла пропорционально частоте питаемого тока и составила 72 р/час на расстоянии 1 м от мишени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ананьев [и др.]. Малогабаритные бетатроны и их применение в дефектоскопии. «Дефектоскопия», 1968, № 6, стр. 60—61.
 2. Л. М. Ананьев [и др.]. Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. Госатомиздат, 1961, стр. 136—163.
 3. Электронные ускорители. Труды IV Межвузовской конференции по электронным ускорителям. «Высшая школа», 1964, стр. 243—247, 280—285.
 4. В. В. Ивашии. Экономическая тиристорная схема возбуждения электромагнита ускорителя однополярными импульсами тока. «Электронные ускорители», вып. 3. Атомиздат, 1970, 27—29.
 5. Л. М. Ананьев, Ю. А. Отрубяников. Некоторые вопросы импульсного питания электромагнитов индукционных ускорителей. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 1967, 40—41.
 6. А. А. Гейзер [и др.]. Устройство задержки. Авторское свидетельство № 302824. «Бюллетень изобретений». № 15, М., 1971.
-