

## К ВОПРОСУ ОБ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ БЕТАТРОНА

Е. М. БЕЛОВ, Н. Я. МАКАРОВ, И. Э. НААЦ

(Представлена научным семинаром НИИ ЭИ)

Для целей промышленной дефектоскопии требуется получить максимальную интенсивность излучения, тогда как при проведении различного рода физических экспериментов иногда бывает необходимо работать на требуемом уровне интенсивности излучения.

Авторы поставили задачу: разработать электронную автоматическую следящую систему, которая позволяла бы эксплуатировать бетатрон в обоих указанных режимах. Однако обеспечение режима работы бетатрона с максимальным выходом интенсивности излучения технически трудно выполнимо вследствие острой пиковой статической характеристики объекта регулирования.

Задачи экстремального регулирования существенно отличаются от задач обычного регулирования тем, что искомая величина неизвестна и наперед не задана; с помощью системы автоматического регулирования эта величина определяется и поддерживается с заданной точностью.

На интенсивность излучения бетатрона влияет ряд факторов, учесть которые трудно, а иногда практически невозможно [3]. Основными параметрами, характеризующими ускорительную установку, являются: индукция в зазоре между полюсами —  $B$ , напряжение инжекции —  $u_u$ , ток со слоя —  $I_{сл}$ , положение камеры в зазоре между полюсами магнита, вакуум, расположение пикового трансформатора и, наконец, фаза генерации импульса инжекции —  $\varphi$ .

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что основными параметрами, определяющими интенсивность излучения, являются напряжение и фаза импульса инжекции. Общее выражение для интенсивности излучения с учетом только этих двух параметров имеет вид

$$I = f(u_u, \varphi). \quad (1)$$

Исследуем возможность экстремального регулирования интенсивности излучения бетатрона, т. е. такого регулирования, когда автоматически определяются значения параметров  $\varphi_0$  и  $u_{0u}$ , при которых интенсивность излучения достигает максимально возможного значения при прочих равных условиях. Прежде чем решать такую задачу, необходимо показать наличие экстремумов полного или хотя бы час-

точного в рабочем диапазоне изменения параметров  $\varphi$  и  $u_u$ . Условие наличия экстремума у функции  $I(\varphi, u_u)$  запишется в виде

$$\frac{\partial I(\varphi, u_u)}{\partial u_u} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial I(\varphi, u_u)}{\partial \varphi} = 0. \quad (3)$$

Рассмотрим возможность экстремального регулирования по напряжению инжекции.

Считаем, что

$$I \cong \kappa_1 \sqrt{u_u}. \quad (4)$$

Тогда

$$\frac{\partial I}{\partial u_u} = \kappa_2 \frac{1}{\sqrt{u_u}}, \quad (5)$$

где  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  — некоторые постоянные.

Из выражения (5) следует, что  $\frac{\partial I}{\partial u_u} \neq 0$  в рабочем диапазоне и, следовательно, ставить оптимальную задачу регулирования по данному параметру невозможно, так как увеличение интенсивности излучения ограничивается пробивным напряжением на инжекторе.

Другим параметром, по которому можно осуществить экстремальное регулирование, является фаза инжекции электронов в ускорительную камеру [4].

При данных выбранных параметрах  $-\frac{\partial I}{\partial \varphi}$  обращается в нуль по крайней мере в одной точке в рабочем диапазоне изменения фаз от 0 до  $\varphi_{\max}$ . В зависимости от соотношений различных параметров ускорительной установки возможны два или более максимума интенсивности излучения, поэтому поиск главного экстремума целесообразнее осуществлять методом запоминания, поскольку использование метода градиента в этих условиях затруднительно.

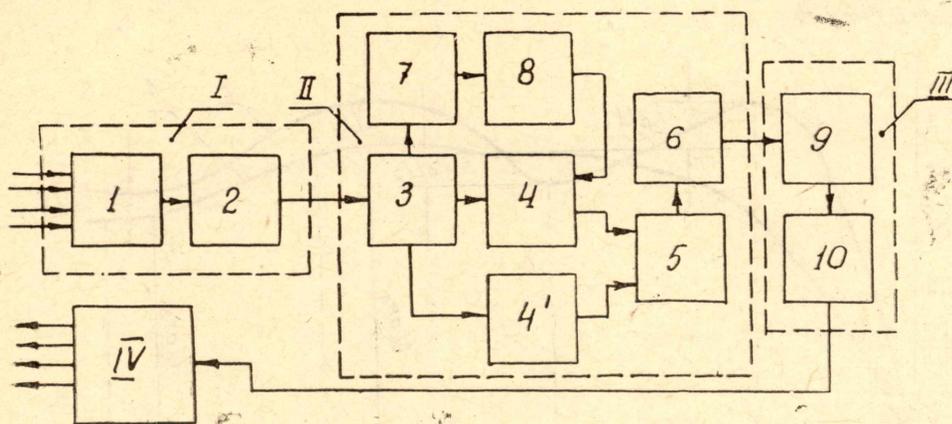


Рис. 1. Блок-схема экстремального регулятора.

Блок-схема регулятора с запоминанием экстремума представлена на рис. 1, где:

I — датчик излучения: 1 — ионизационная камера с рентгенометром «Кактус»; 2 — усилительное устройство для преобразования постоянного напряжения сигнала в высокочастотное напряжение.

II — двухканальное устройство преобразования информации: 3 — усилитель переменного тока с пиковыми детекторами; 4 — интеграторы; 5 — схема сравнения; 6 — схема поиска и слежения; 7—8 — устройство оперативной памяти.

III — канал синхронизации: 9 — модулятор поджигающих импульсов; 10 — схема инжекции.

IV — объект регулирования — бетатрон.

Датчик излучения — I служит для преобразования импульсов излучения в высокочастотное напряжение, амплитуда которого пропорциональна интенсивности излучения.

Двухканальное устройство преобразования информации — II предназначено для обработки информации, поступающей по каналам, и выделения сигнала ошибки, управляющего цепями синхронизации.

Канал синхронизации служит для синхронизации электронной управляющей схемы с магнитным полем бетатрона. Принцип действия экстремум-регулятора состоит в следующем.

При работе регулятора в режиме поиска максимального значения интенсивности излучения напряжения на выходах пиковых детекторов точно следуют за изменением интенсивности излучения, причем скорость нарастания напряжения текущей координаты (пик-детектор 3) выше, чем опорной (пик-детектор 4). Благодаря этому полярность сигнала рассогласования при принятой фазировке дифференциального усилителя — 5 остается отрицательной. Таким образом, движение импульса инжекции по оси фаз к максимуму интенсивности излучения замедляется с ростом отрицательного сигнала рассогласования.

При достижении экстремума оперативная память отключается (оперативная память реагирует только на изменение амплитуды импульса интенсивности излучения), величина сигнала рассогласования уменьшается, тем самым изменяя скорость сканирования импульса инжекции по оси фаз.

Каскад сканирования (поиск) переводится в режим усилителя постоянного тока с медленно меняющимся выходным напряжением, в результате чего фаза импульса инжекции колеблется вокруг экстремума ( $t_1$ ).

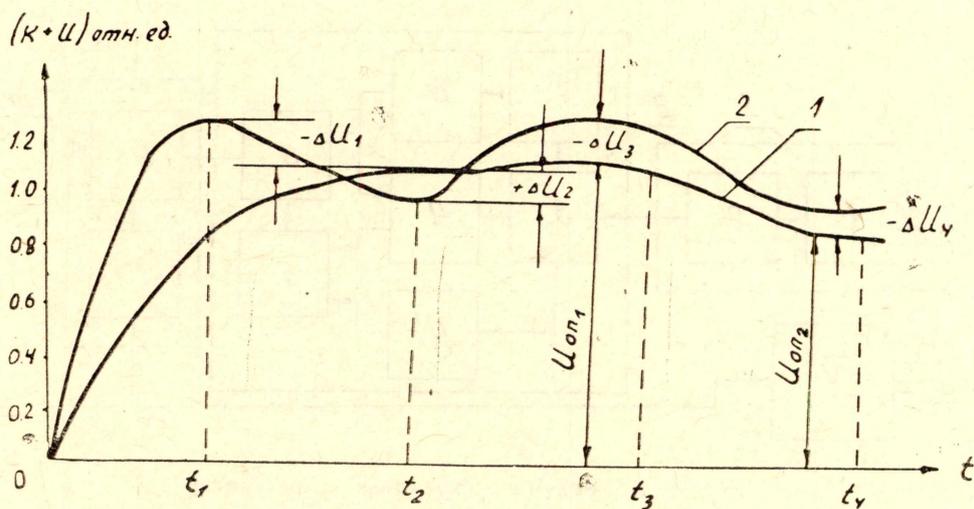


Рис. 2. График изменения напряжений на интеграторах текущей и опорной координат.

В случае резкого уменьшения интенсивности излучения, например, вследствие резкого увеличения напряжения на магните, напряжение интегратора опорной координаты остается практически постоянным,

тогда как на интеграторе текущей координаты оно резко уменьшается ( $t_2$ ). Сигнал рассогласования при этом становится положительным, и импульс инжекции перемещается с увеличенной скоростью в сторону уменьшения величины фазы.

Аналогичный процесс наблюдается при уменьшении напряжения питающей сети. Эпюры напряжений на интеграторах текущей и опорной координат иллюстрируются графиками рис. 2, где: 1 — напряжение на интеграторе опорной координаты; 2 — напряжение на интеграторе текущей координаты.

Изменения напряжений на интеграторах текущей и опорной координат в момент времени  $t^2$  соответствуют такому увеличению напряжения на магните, при котором интенсивность излучения падает до нуля.

Момент времени  $t_3$  соответствует значению интенсивности излучения при новом установившемся напряжении на магните. Эпюры напряжений в момент времени  $t_4$  соответствуют пониженному напряжению на магните бетатрона.

### К вопросу о выборе скорости сканирования

При проектировании экстремум-регулятора необходимо определить начальную скорость сканирования импульса инжекции при движении последнего по оси фаз.

$$c = \frac{I(\varphi_{\kappa+1}) - I(\varphi_{\kappa})}{t_{\kappa+1} - t_{\kappa}}, \quad (6)$$

где  $c$  — скорость сканирования;  $\varphi_{\kappa}$ ,  $\varphi_{\kappa+1}$ ,  $t_{\kappa}$ ,  $t_{\kappa+1}$  — соответственно значения фазы импульса инжекции и временного интервала между импульсами инжекции через период питающего напряжения.

Обозначим через  $\Theta$  величину сдвига фазы на один импульс инжекции

$$\Theta = \varphi_{\kappa+1} - \varphi_{\kappa}, \quad (7)$$

тогда приращение интенсивности излучения

$$\Delta I(\Theta) = I(\varphi_{\kappa+1}) - I(\varphi_{\kappa}). \quad (8)$$

Выбираем линейную развертку с постоянной скоростью сканирования, т. е. непрерывным принудительным изменением фазы импульса инжекции. Из выражения (8) следует, что приращение интенсивности излучения на каждый импульс инжекции постоянной амплитуды является функцией 3 переменных

$$\Delta I = f(\varphi_{\kappa}, I, \Theta), \quad (9)$$

или

$$\Delta I_{\max} = \max f(\varphi_{\kappa}, I, \Theta), \quad (10)$$

где  $\Delta I_{\max}$  — максимальное значение приращения интенсивности излучения между двумя импульсами инжекции.

Из экспериментально полученных характеристик  $I = f(\varphi_{\kappa})$  для данного ускорителя выбираем в области расположения главного экстремума точки  $\varphi_{\kappa}$  с наибольшей производной.

В этой области

$$\Delta I_{\max} \geq e, \quad (11)$$

где  $e$  — величина, равная погрешности измерительного прибора.

В конкретной реализации регулятора в качестве измерительного устройства использован рентгенометр „Кактус“, погрешность кото-

рого 10%. Таким образом, в области главного максимума на кривой рис. 3 откладываем участок  $0,1 I_{\max}$  по оси ординат и, проектируя точки на ось фаз, получаем максимальное значение  $\theta_{\max}$ .

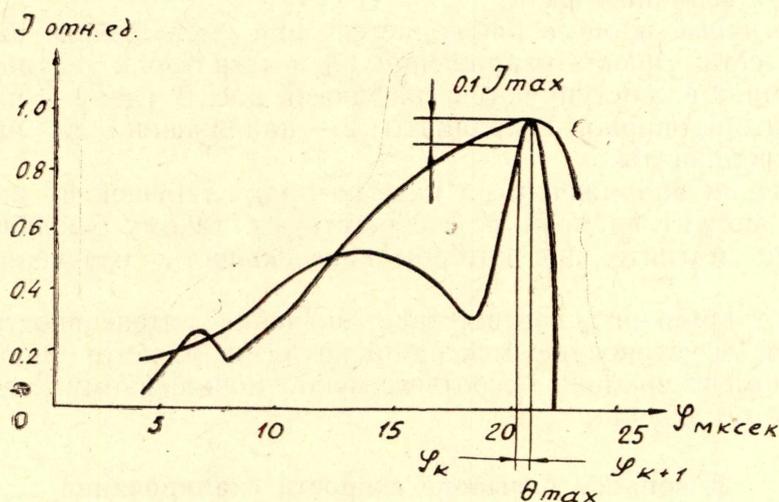


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения бетатрона от фазы инжекции.

Если учесть возможные достижимые напряжения на инжекторе, то для данного ускорителя имеем значение —  $\varphi_{\max}$ , при этом время полного пробега всех возможных значений фаз от 0 до  $\varphi_{\max}$  составляет

$$t = \frac{\varphi_{\max}}{\Theta_{\max}} \cdot T, \quad (12)$$

где  $T$  — период повторения импульсов инжекции.

Экстремум-регулятор с непрерывным принудительным изменением фазы импульса инжекции с запоминанием максимального значения интенсивности излучения был проверен на бетатронах с максимальной энергией ускоренных электронов 15 и 30 Мэв. Результаты экспериментальной проверки оказались несколько неожиданными: регулятор с «оперативной памятью» поддерживал интенсивность излучения, более чем в 2 раза превосходящую значение, достижимое при ручной подстройке импульса инжекции на оптимальное значение при прочих равных условиях. Коэффициент спада магнитного поля в опыте составлял 0,68.

Электронные схемы двух вариантов экстремум-регуляторов, их обсуждение и результаты экспериментальных исследований будут даны в следующих работах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Белов, В. Н. Титов. Устройство для регулирования интенсивности гамма-излучения бетатрона. Авторское свидетельство № 140 505.
2. Е. М. Белов, И. Э. Наац. Экстремальный регулятор интенсивности гамма-излучения. Авторское свидетельство № 141 912.
3. Е. М. Белов, В. Н. Титов. Стабилизатор интенсивности гамма-излучения бетатрона. Известия вузов, раздел радиотехника, № 1, 1960.
4. В. М. Разин. Стабилизация излучения бетатрона. Известия Томского политехнического института, т. 87, 1957.