

ЕРЕВАНСКИЙ
ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ВФН-ФФТ-1(69)

А.Р. ТУМАНЯН, К.А. САДОЯН, Л.Г. МЕЛКУМЯН

СТАБИЛИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЭЛЕКТРОННОГО СИНХРОТРОНА

Заказ И17 ВФ 03283 Тираж 250

Множительно-копировальный сектор Ереванского физического
института, Ереван 36, Маркарян 2

ЕРЕВАН
1969

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФФИ-УФТ-1(69)

А.Р.ТУМАНЯН, К.А.САДОЯН, Л.Г.МЕЛКУМЯН

СТАБИЛИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЭЛЕКТРОННОГО СИНХРОТРОНА

Исследовано влияние колебаний режима питания на величины неустойчивостей магнитных характеристик электромагнита электронного синхротрона и обосновывается целесообразность стабилизации скорости нарастания напряженности магнитного поля, на уровне инжекции, путем авторегулирования амплитуды переменной составляющей поля. Приводится описание схемы и конструкции измерительного элемента в системе стабилизации скорости нарастания.

STABILIZATION OF THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE
ELECTRON SYNCHROTRON ELECTROMAGNET

A.R.Toomanian, K.A.Sadoyan and L.G.Melkumian

The influence of the oscillations of the power supply regime on the magnitudes of nonstabilities of the magnetic characteristics of the electron synchrotron electromagnet is investigated. The expediency of the stabilization of the rate of rise of the magnetic field at the injection level by autoregulating the amplitudes of A.C. field is proved. The description of the scheme and the construction of the measuring element in the stabilization system of the rate of rise are given.

Датчики системы измерения и контроля напряженности магнитного поля, а также датчики систем синхронизации и управления процессами различных узлов Ереванского электронно-кольцевого ускорителя на энергию 6 Гэв (ЭКУ-6) находятся в рассеянных полях электромагнита. Эти участки поля особенно чувствительны к неустойчивостям системы питания электромагнита. В связи с этим необходимо определить требования к системе питания и возможности стабилизации магнитных характеристик электромагнита.

Влияние колебаний режима на стабильность
магнитных характеристик электромагнита ЭКУ

С целью выявления связи между режимом питания и магнитными характеристиками электромагнита были произведены измерения этой зависимости в наиболее чувствительных областях рассеянного поля электромагнита. Измерения производились на стенде калибровки блоков электромагнита ЭКУ, где было проще барьеровать режимом питания магнита. Магнитное поле в электромагните ЭКУ изменяется по

следующему закону:

$$H = H_n - \hat{H} \cos \omega t,$$

где \hat{H} - амплитуда переменной составляющей напряженности магнитного поля, H_n - величина постоянной составляющей поля.

Интервал времени между двумя ближайшими моментами перехода напряженности поля через ноль:

$$T_0 = \frac{2}{\omega} \arccos \frac{H_n}{\hat{H}};$$

Параметры номинального режима следующие:

$$H_{max} = H_n + \hat{H} = \hat{H}(1 + \kappa) = 8300 \text{ э.}$$

Отношение амплитуд:

$$\kappa = H_n / \hat{H} = 0,97.$$

Частота переменной составляющей магнитного поля $f = 50 \text{ гц}$.

Поле инжекции для ЭКУ $H_u = 66 \text{ в}$. Скорость нарастания напряженности поля в момент инжекции:

$$\dot{H}_u = 397300 \text{ в/сек}$$

при этом: $T_0 = 1570 \text{ мксек}$. Частота переменной составляющей напряженности магнитного поля во время измерений кратковременно стабилизировалась с погрешностью не более $\pm 0,1\%$ амплитуда постоянной составляющей - $\pm 0,05\%$ и амплитуда переменной составляющей - $\pm 0,1\%$. Нестабильность напряженности магнитного поля определялась методом относительных измерений с помощью двух нормальных зондов и электронно-измерительной аппаратуры, чувствительность которой не хуже $\pm 0,005\%$. Измерительный датчик располагался в краевых и рассеянных полях, а опорный - в центре рабочей области магнита, в одном из средних пакетов. Подмагничивающий ток в опорном датчике соответствовал полю инжекции, т.е. все

измерения производились на уровне поля инжекции. Усредненные результаты по многократным измерениям приведены в таблицах I и 2. Отклонения напряженности и градиента магнитного поля на уровне инжекции связаны, как с изменением уровня остаточного поля в зависимости от амплитуды размагничивающего поля: $H_p = \hat{H} - H_n$, так и с изменением величины вихревых токов в зависимости от скорости нарастания напряженности поля. Поэтому были исследованы две зависимости:

$$\Delta H\% = f_1(H_u) \quad \text{и} \quad \Delta H\% = f_2(H_p),$$

где $\Delta H\% = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - H_{oi}) / H_{oi}$; H_{oi} - напряженность поля в i -ой точке рассеянного поля при номинальном режиме питания блока электромагнита, H_i - поле в той же точке при другом режиме питания.

По результатам измерений можно сделать вывод, что нестабильности в напряженности магнитного поля возникает в основном из-за колебаний скорости нарастания поля на уровне инжекции. Следовательно, целесообразно принять более жесткий допуск на нестабильность скорости нарастания напряженности магнитного поля до $\pm 1\%$.

Таким образом в качестве стабилизируемого параметра была принята скорость нарастания напряженности магнитного поля на уровне инжекции, которая связана с остальными параметрами поля зависимостью:

$$H_u = \omega \sqrt{\hat{H}^2 - (H_n - H_u)^2};$$

и нестабильность:

$$\Delta \dot{H}_u / \dot{H}_u = \frac{\Delta \omega}{\omega} + \left(\frac{1}{\sin^2 \omega t_u} \right) \cdot \left(\frac{\Delta \hat{H}}{\hat{H}} \right) - \left(\text{ctg}^2 \omega t_u \right) \left(\frac{\Delta H_n}{H_n} \right); \quad (I)$$

Рассмотрим случай стабилизации интервала времени T_0 путем авто-регулирования \dot{H} .

Тогда:

$$\Delta T_0 / T_0 = -\frac{\Delta \omega}{\omega} + \left(\frac{2}{\omega T_0} \operatorname{ctg} \omega \frac{T_0}{2} \right) \left(\frac{\Delta \dot{H}}{\dot{H}} \right) - \left(\frac{2}{\omega T_0} \operatorname{ctg} \omega \frac{T_0}{2} \right) \left(\frac{\Delta H_n}{H_n} \right) \quad (2)$$

При стабилизации интервала T_0 , $\Delta \dot{H} / \dot{H}$ и $\Delta \omega / \omega$ у нас свя-заны условием $\frac{\Delta T_0}{T_0} \rightarrow 0$ и в этом случае:

$$\Delta \dot{H}_u / \dot{H}_u = \left[1 + \left(\omega T_0 / 2 \right) \left(1 / \sin^2 \omega t_u \right) \operatorname{tg} \omega \frac{T_0}{2} \right] \frac{\Delta \omega}{\omega} + \left[\left(1 / \sin^2 \omega t_u \right) - \operatorname{ctg}^2 \omega t_u \right] \frac{\Delta H_n}{H_n} \quad (3)$$

Теперь рассмотрим стабилизацию с помощью датчика скорости нарастания напряженности магнитного поля некоторого другого интервала времени:

$$\tau = t_H - t_{\dot{H}} = (1/\omega) \cdot \left(\arccos \frac{H_0 - H_{\text{зад}}}{H} - \arcsin \frac{\dot{H}_{\text{зад}}}{\omega H} \right), \quad (4)$$

где t_H - момент прохождения поля через некоторое заданное значение $H_{\text{зад}}$, а $t_{\dot{H}}$ - момент прохождения скорости поля через заданное значения $\dot{H}_{\text{зад}}$ (в нашем случае $\dot{H}_{\text{зад}} = \dot{H}_u$).

Тогда:

$$\Delta \tau / \tau = \left(1 / \omega \tau \right) \left(\operatorname{ctg} \omega t_H + \operatorname{tg} \omega t_{\dot{H}} \right) \left(\frac{\Delta \dot{H}}{\dot{H}} \right) + \left(1 / \omega \tau \right) \left(\operatorname{tg} \omega t_H - \omega \tau \right) \left(\frac{\Delta \omega}{\omega} \right) - \left(1 / \omega \tau \right) \left(\cos \frac{\omega T_0}{2} / \sin \omega t_H \right) \left(\frac{\Delta H_n}{H_n} \right);$$

При условии $\Delta \tau / \tau = 0$:

6

$$\Delta \dot{H} / \dot{H} = \left(\frac{\omega \tau - \operatorname{tg} \omega t_H}{\operatorname{ctg} \omega t_H + \operatorname{tg} \omega t_{\dot{H}}} \right) \frac{\Delta \omega}{\omega} + \frac{\left(\cos \omega \frac{T_0}{2} \right) \frac{\Delta H_n}{H_n}}{\sin \omega t_H (\operatorname{ctg} \omega t_H + \operatorname{tg} \omega t_{\dot{H}})}$$

и в этом случае:

$$\Delta \dot{H}_u / \dot{H}_u = \left[1 + \frac{\omega \tau - \operatorname{tg} \omega t_H}{\sin^2 \omega t_u (\operatorname{ctg} \omega t_H + \operatorname{tg} \omega t_{\dot{H}})} \right] \frac{\Delta \omega}{\omega} + \left[-\operatorname{ctg}^2 \omega t_u + \frac{\cos \omega \frac{T_0}{2}}{\sin^2 \omega t_u \cdot \sin \omega t_H (\operatorname{ctg} \omega t_H + \operatorname{tg} \omega t_{\dot{H}})} \right] \frac{\Delta H_n}{H_n}; \quad (5)$$

При $t_{\dot{H}} = 0$ и $\tau = T_0/2$ выражение (5) переходит в (3). Можно так подобрать параметры, что коэффициент в (5) перед $\frac{\Delta \omega}{\omega}$ окажется равным нулю. Во всяком случае при τ близком к нулю, он намного меньше, чем коэффициент перед $\frac{\Delta \omega}{\omega}$ в выражении (3).

Это особенно существенно при питании кольцевого электромагнита ЭКУ, где частота переменного тока вообще не стабилизируется и может колебаться в пределах $\pm 1,5\%$. Это может привести к неустойчивости скорости поля до $\pm 5\%$ при стабилизации интервала T_0 . Очевидно, что целесообразно стабилизировать непосредственно скорость нарастания напряженности поля на уровне инжекции, либо интервал τ .

Можно также непосредственно стабилизировать магнитные характеристики электромагнита по изменению напряженности магнитного поля в характерных точках авторегулированием \dot{H} . Однако такой способ более сложен и практически труднее осуществим чем осуществление системы непосредственной стабилизации \dot{H}_u в электромагните ЭКУ.

7

Система стабилизации H_u представляет собой обычную систему авторегулирования, где измерительным элементом является преобразователь скорости нарастания напряженности магнитного поля в регулирующее напряжение ($\Delta H_u - \Delta U$).

Преобразователь $\Delta H_u - \Delta U$

Работа преобразователя для системы питания стенда калибровки блоков основана на принципе широтно-импульсной модуляции, т.е. преобразуется текущее значение скорости нарастания напряженности магнитного поля в длительность импульсов постоянной амплитуды, с дальнейшим преобразованием их в напряжение регулирования (рис.1,3). В момент переходов напряженности магнитного поля через ноль, пермалловый датчик, помещенный в зазор электромагнита, вырабатывает импульс, который после усиления опрокидывает триггер T_{PT} по сетке левого триода. При достижении скорости нарастания напряженности магнитного поля заданной величины, датчик скорости вырабатывает импульс, который возвращает триггер T_{PT} по сетке правого триода в исходное состояние. Сформированный импульс на выходе триггера с помощью генератора пилообразного напряжения и пикового детектора преобразуется в напряжение пропорциональное

$\tau = t_0 - t_{H_u}$. Разрядом ёмкости "C29" пикового детектора в конце каждого цикла магнитного поля, с помощью мультивибратора и ключа на триоде, обеспечивается практическая безынерционность преобразователя. Датчик скорости состоит из индукционной катушки, помещенной в зазор электромагнита и дискриминатора (триггер Шмитта). При уровне дискриминации 40В погрешность работы датчика скорости не превышает $\pm 0,25\%$. Крутизна характеристики преобразо-

зователя не менее $\delta = \Delta U / \Delta H_u = 0,5 \frac{mV \cdot sec}{G}$. Схема авторегулирования с разработанным преобразователем работала в системе питания стенда калибровки блоков в течении года и обеспечивала мгновенную стабильность H_u не хуже $\pm 0,8\%$, а длительную - $\pm 0,6\%$.

Стабилизация скорости нарастания напряженности магнитного поля на уровне инжекции в кольцевом электромагните, в отличие от стенда калибровки блоков, осуществляется многоконтурной системой авторегулирования. Преобразователь для системы питания кольцевого электромагнита должен реагировать на медленные уходы H_u от номинального значения и отличается от предыдущего в основном оконечными каскадами (рис.2,4).

Изменение скорости поля определяется путем измерения интервала времени между импульсами номинального значения H_u , вырабатываемого датчиком скорости, и моментом инжекции (рис.5). Момент инжекции фиксируется импульсом пермаллового датчика, имеющего обмотку подмагничивания. При опережении или отставании одного импульса относительно другого срабатывает соответствующий триггер максимума или минимума, что приводит к срабатыванию поляризованного реле, тем самым регулируется амплитуда переменной составляющей тока электромагнита. Преобразователь имеет релейную характеристику и срабатывает при изменении H_u от заданного на $\pm 0,25\%$. Эта величина регулируется в зависимости от величины линии задержки в пределах от 0,1% до 1%.

Испытания системы стабилизации скорости нарастания напряженности магнитного поля в кольцевом электромагните показали, что она обеспечивает стабильность H_u не хуже $\pm 0,4\%$.

Применение системы стабилизации H_k увеличило стабильность магнитных характеристик электромагнита ЭКУ и обеспечило надежную работу системы контроля магнитного поля кольцевого электромагнита и систем синхронизации и управления ускорителем.

$$\Delta H = f_1(H_i); \quad H_{разм} = const;$$

Таблица № 1

№ режима	$\Delta H\%$ (измерение)	$I_n [a]$	$\hat{I} [a]$	$f_{[эм]} [мксек]$	$T_0 [мксек]$	$H_i [эв]$	$H_{раз}$ [э]	$\Delta H\%$ (расчет)	$\Delta H_{раз}\%$ (расчет)
1	-0,06	1330	1370	50	1543	404988	128	+1,92	0
2	-0,042	1310	1350	50	1554	401789	128	+1,11	0
3	-0,03	1300	1340	50	1562	401641	128	+1,07	0
4	-0,15	1290	1330	50	1568	398777	128	+0,35	0
5	0	1280	1320	50	1573	397375	128	0	0
6	+0,025	1255	1295	50	1588	393358	128	-1,01	0
7	+0,07	1225	1265	50	1606	388694	128	-2,18	0
8	+0,088	1200	1240	50	1623	384750	128	-3,17	0

$$\Delta H = f_2(H_{разм}); \quad H = const;$$

Таблица № 2

№	$\Delta H\%$	$I_n [a]$	$\hat{I} [a]$	$f_2 [мксек]$	$H_{разм}$	$\Delta H\%$	$\Delta H_{разм}\%$
1	+0,027	1278,5	1320	49,5	1617	397992	132,8
2	+0,012	1279	1320	49,6	1601	397419	131,2
3	0	1280	1320	50	1573	397373	128,0
4	-0,016	1281	1320	50,4	1542	397383	124,8
5	-0,031	1281,5	1320	50,5	1530	396387	123,2

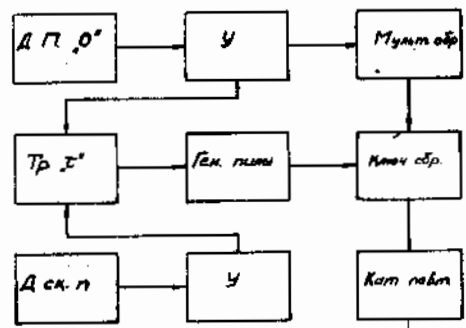


Рис. 1 К БТ-4

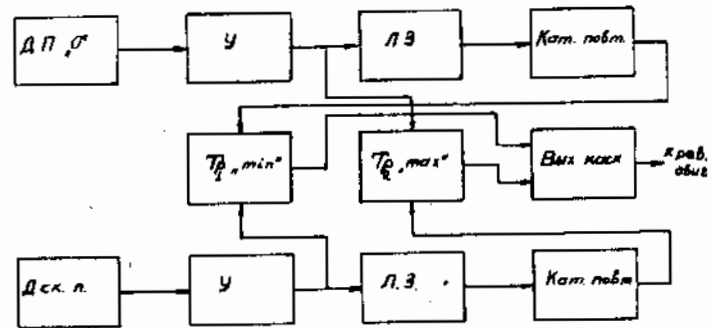


Рис. 2

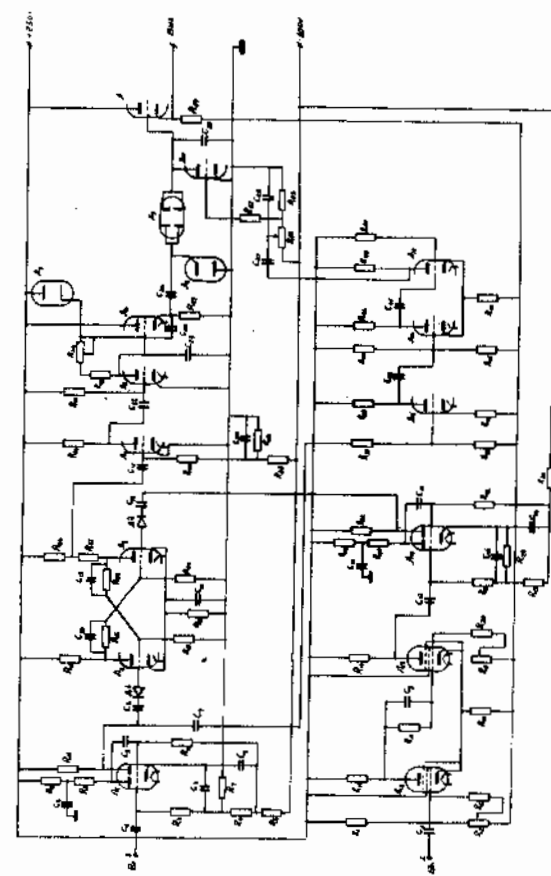


Рис. 3

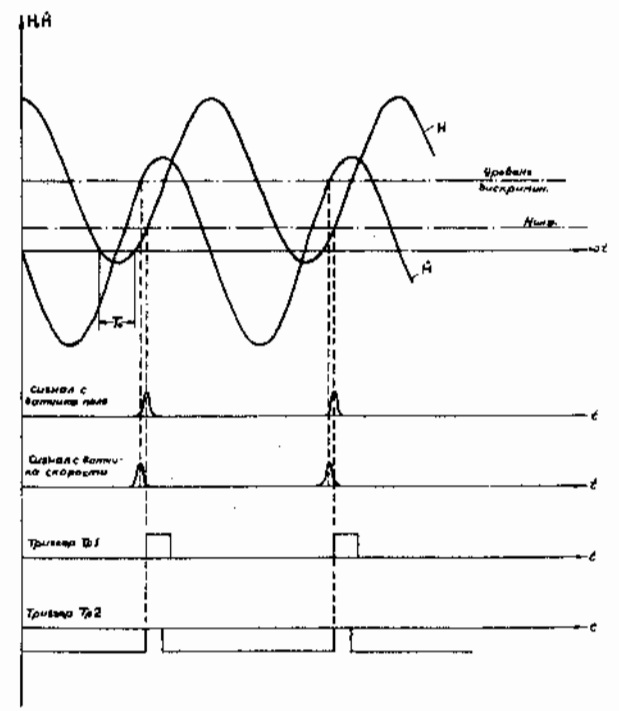
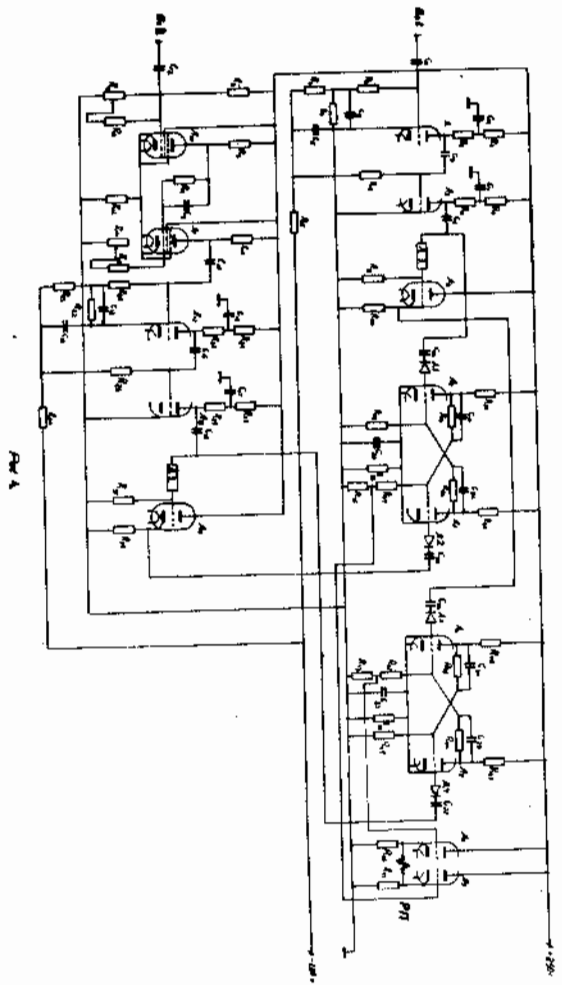


Рис. 5

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ю.Г.Агбалян, А.И.Алиханян и др.
"Труды международной конференции по ускорителям".
Атомиздат, Москва, 1964 г.
2. Я.С. Ицхоки
"Импульсные устройства"
Москва, 1959 г.

Рукопись поступила 6-го февраля 1969г.