

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПРИ СМЕШАННОМ ПИТАНИИ БЕТАТРОНОВ

Л. М. АНАНЬЕВ, С. Ф. ВАСИЛЕВСКИЙ, Ю. П. ЯРУШКИН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института ядерной физики электроники и автоматики при ТПИ)

Смешанное питание бетатронов (постоянное плюс переменное поле) применяется для улучшения характеристик ускорителя. Как показано в работе [1], подпитка постоянным полем облегчает режим работы электромагнита, улучшает условия инжекций, повышает экономическую эффективность установки и уменьшает фазовую неоднородность магнитного поля.

При смешанном питании бетатронов момент прохождения магнитного поля через нулевое значение смещается на участок, где скорость изменения напряженности поля $\dot{H}_{\text{ом}}^1$ мала. Можно показать, что $\dot{H}_{\text{ом}}^1$ в момент перехода поля через нуль связана со степенью подмагничивания $c_{\text{п}}$ следующим образом:

$$\dot{H}_{\text{ом}}^1 = \omega H_{\text{ом}}' \sqrt{1 - c_{\text{п}}^2}, \quad (1)$$

где $H_{\text{ом}}^1$ — амплитуда напряженности переменного поля при подмагничивании,

ω — угловая частота поля,

$c_{\text{п}} \leq 1$ — степень подмагничивания.

Отсюда видно, что при увеличении $c_{\text{п}}$ скорость $\dot{H}_{\text{ом}}^1$ изменения напряженности в момент перехода поля через нулевое значение уменьшается и стремится к нулю при $c_{\text{п}} \rightarrow 1$, стремящемся к 1. Кроме того, при $c_{\text{п}}$, близких к единице, момент прохождения магнитного поля через нуль находится на участке, где кривизна κ_0 синусоидального поля (следовательно, и нелинейность) наибольшая. Кривизну κ_0 синусоидального поля определяем по известной формуле [2].

$$\kappa_0 = \frac{\omega^2 H_{\text{ом}}' c_{\text{п}}}{[1 + (\omega H_{\text{ом}}')^2 (1 - c_{\text{п}}^2)]^{3/2}}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что при $c_{\text{п}} \rightarrow 1$, стремящемся к 1, кривизна κ_0 стремится к максимальному значению

$$\kappa_{0\text{макс}} = \omega^2 H_{\text{ом}}'. \quad (3)$$

Эти особенности магнитного поля вблизи нулевого значения при смешанном питании бетатронов (уменьшение скорости изменения напряженности $\dot{H}_{\text{ом}}^1$ и увеличение кривизны κ_0) проявляются при измерении фазовой неоднородности электромагнитов. В случае, когда измерение фазовой структуры магнитного поля осуществляется компенсационным

методом с подпиткой пик-трансформаторных датчиков нуля поля [3], при уменьшении $H_{\text{ом}}^1$ амплитуда импульсов датчиков уменьшается.

Кроме того, уменьшение $H_{\text{ом}}^1$ вызывает увеличение длительности импульсов датчиков, что приводит к увеличению нижнего порога чувствительности и погрешностей измерения.

Увеличение нелинейности вблизи нуля поля сказывается особенно сильно на зависимости результатов измерений фазовой неоднородности от нестабильности поля, приводящей к непостоянству степени подмагничивания c_n . Эта зависимость получается путем логарифмического дифференцирования известной из [1] формулы, связывающей фазовую неоднородность в системе с подмагничиванием ΔH_n и без подмагничивания ΔH ,

$$\Delta H_n = \frac{\Delta H \cdot \sqrt{1 - c_n^2}}{1 + c_n}. \quad (4)$$

Из (4) получим относительное изменение фазовой неоднородности в режиме смешанного питания при изменениях степени подмагничивания из-за нестабильности постоянной и переменной составляющих напряженности магнитного поля.

$$\delta(\Delta H_n) = \frac{\Delta(\Delta H_n)}{\Delta H_n} = \delta(\Delta H) + \frac{\Delta c_n}{1 - c_n^2}, \quad (5)$$

где $\delta(\Delta H)$ — относительное изменение ФН в режиме без подпитки, Δc_n — абсолютное изменение степени подмагничивания.

Из выражения (5) видно, что при c_n , близком к 1, небольшие изменения степени подмагничивания приводят к резкому изменению фазовой неоднородности и, следовательно, к резким изменениям результатов повторных измерений.

В режиме без подпитки ввиду значительной линейности начального участка синусоидального поля разница фазовой неоднородности ΔH_0 , измеренной на нулевом уровне и на уровне инъекции ΔH_i , настолько мала, что ею пренебрегают. В режиме смешанного питания увеличение нелинейности участка поля вблизи нулевого значения приводит к тому, что результаты измерения фазовой структуры на уровне нулевого поля не могут характеризовать фазовую структуру на уровне инъекции H_i .

Путем несложных математических вычислений можно получить следующее выражение, связывающее фазовую неоднородность на уровне инъекции ΔH_i и на уровне нуля поля ΔH_0 ,

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta H_0} = \frac{\sin(\Theta_n \pm \varphi - \varphi_i) - \sin(\Theta_n - \varphi_i)}{\sin(\Theta_n \pm \varphi) - \sin \Theta_n}, \quad (6)$$

где Θ_n — угол подмагничивания,

φ_i — фаза инъекции,

φ — фазовый сдвиг из-за неоднородности поля.

Отсюда следует, что для получения значений фазовой структуры магнитного поля в момент инъекции необходимо выводить измерительный датчик нуля поля на уровень инъекции путем дополнительной подпитки.

Рассмотренные особенности затрудняют измерение фазовой структуры электромагнитов при смешанном питании их. Целесообразно измерение фазовой неоднородности производить в режиме питания электромагнита без подпитки постоянным полем и полученные результаты пересчитывать по формулам.

При этом, если амплитуда чисто переменного поля

$$H_{\sim} = H_{\text{ом}} = H_{\text{ом}}'(1 + c_n),$$

то пересчет осуществляется по выражению

$$\Delta H_n = \Delta H \frac{\sqrt{1 - c_n^2}}{1 + c_n}. \quad (7)$$

Если $H_{\sim} = H'_{\text{ом}}$ (постоянная подпитка просто отключена), то

$$\Delta H_n = \Delta H' \frac{1}{\sqrt{1 + c_n}}. \quad (8)$$

Как видно из выражений (7, 8), для пересчета результатов измерения в режиме без подпитки в значения фазовой неоднородности при смешанном питании необходимо знать степень подмагничивания.

$$c_n = \frac{H_0}{H'_{\text{ом}}}.$$

Легче всего измерить c_n с помощью осциллографа без измерения постоянного H_0 и переменного $H'_{\text{ом}}$ полей.

Если на вход осциллографа подать сигналы пик-трансформаторного датчика нуля поля, помещенного в электромагните со смешанным питанием, то на экране осциллографа будет видна картина, подобная изображенной на рис. 1. Синусоидальная кривая соответствует э.д.с., наведенной в витках обмотки датчика, а резкие выбросы соответствуют перемагничиванию пермаллового сердечника в момент прохождения поля через нуль. Расстояние L отражает в некотором масштабе период изменений магнитного поля, а длина l зависит от степени подмагничивания c_n . Измерив эти длины L и l , степень подмагничивания легко определить по формуле

$$c_n = \cos \pi \frac{l}{L}. \quad (9)$$

Таким образом, при смешанном питании бетатронов измерение ФН целесообразно проводить в режиме без подпитки постоянным током той же аппаратурой, что и для измерения ФН при чисто синусоидальном поле с соответствующим пересчетом по измеренному значению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Ярушкин. Кандидатская диссертация. Томск, ТПИ, 1965.
2. М. Я. Выгодский. Справочник по высшей математике. Гостехтеориздат. М., 1956.
3. Л. М. Ананьев и др. Индукционный ускоритель электронов-бетатрон. Госатомиздат. 1961.