

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ИМПУЛЬСНОГО БЕТАТРОНА ПРИ КВАЗИТРЕУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСАХ ТОКА

Б. А. БАГИНСКИЙ, Ю. А. ОТРУБЯННИКОВ

(Представлена кафедрой промышленной и медицинской электроники)

Проведенные в последние годы исследования в области конструирования малогабаритных бетатронов [1, 2, 3] доказали преимущества различных способов импульсного питания по сравнению с непрерывным. При этом структура систем стабилизации питания электромагнитов существенно изменилась и потребовала специальных исследований и разработок.

Настоящая работа посвящена стабилизации магнитного поля ускорителя при квазитреугольной форме тока в обмотках электромагнита [2]. Для таких схем может быть применен известный способ стабилизации поля, заключающийся в регулировке величины вводимой энергии. Однако такие системы стабилизации являются САР по отклонению по отношению к максимальному значению индукции. При этом [4] для получения высокой стабильности необходим большой коэффициент усиления цепи обратной связи. В данном случае стабилизация максимальной величины магнитного поля может осуществляться необходимым моментом коммутации соответствующих вентилей. Привязка момента коммутации к заданному уровню поля определяет потребляемую контуром электромагнита энергию $W_{\text{п}}$ (энергию потерь). Количество же вводимой энергии $W_{\text{вв}}$ зависит от напряжения питающей сети, параметров цепи ввода и без стабилизации может изменяться в широких пределах. Если энергия потерь за импульс тока меньше вводимой энергии, то это приведет к увеличению напряжения на контурной емкости, увеличению скорости нарастания тока в обмотке электромагнита, на которую разряжается емкость, и к увеличению потерь. Переходный процесс окончится при равенстве $W_{\text{вв}} = W_{\text{п}}$. Увеличение напряжения может привести к аварийному режиму. Для определения величины перенапряжения необходимо провести энергетический анализ и сформулировать требования к способу стабилизации. Потери энергии в бетатроне складываются из потерь в конденсаторах и потерь в электромагните. Потери энергии в конденсаторах в диапазонах частот и напряжений, в которых работают большинство импульсных бетатронов, определяются в основном величиной переменной составляющей напряжения [3]. При увеличении напряжения на контурной емкости переменная составляющая при постоянстве индукции B_m уменьшается, поэтому потери в конденсаторах не возрастут.

Суммарные потери в магните складываются из потерь в меди и потерь в стали:

$$P = R_m + P_{ст}. \quad (1)$$

При квазитреугольных импульсах тока в намагничивающей обмотке [5]

$$P_m = \frac{2\pi R}{\sqrt{3S}} \rho j I_m w \left[1 + \frac{n^2 - 1}{9} \left(\frac{d}{\Delta} \right)^4 \right]. \quad (2)$$

где R — средний радиус обмотки;

w — число витков обмотки;

d — радиальный размер провода обмотки;

n — число слоев обмотки;

$\Delta = \frac{68}{\sqrt{f_y}}$ — глубина проникновения тока в меди;

f_y — эквивалентная частота импульсов тока;

$S = \frac{f_y}{f_n}$ — скважность импульсов тока;

f_n — частота повторения циклов ускорения.

Величиной, зависящей от напряжения на контурной емкости, в нашем случае является скважность S . Для анализа выражение (2) упростим:

$$P_m = l \frac{1}{\sqrt{3S}} (1 + mS^2). \quad (3)$$

Коэффициент m учитывает влияние добавочных потерь за счет поверхностного эффекта, эффекта близости, а также за счет вихревых токов. Такая запись возможна, так как все указанные составляющие зависят от квадрата частоты, а следовательно, и от скважности. Разлагая (3) в ряд Тейлора и ограничиваясь двумя членами, найдем относительные изменения величин:

$$\frac{\Delta P_m}{P_m} = K_s \frac{\Delta S}{S}; \quad K_s = \frac{2mS^2}{1+mS^2} - \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Потери в стали слагаются из потерь на вихревые токи и на гистерезис:

$$P_{ст} = P_{ст.в} + P_{ст.г} = \frac{1}{3S} \gamma f_y^2 \delta^2 B_m^2 V + \frac{1}{2} \eta f_n B_m^2 \quad (5)$$

где

γ — удельная проводимость материала,

δ — толщина листа,

V — объем листа,

η — коэффициент,

B_m — максимальная индукция в электромагните.

Потери на гистерезис определяются площадью петли и числом циклов перемагничивания в единицу времени и, следовательно, от скважности не зависят. Анализируя (5), имеем:

$$\frac{\Delta P_{ст}}{P_{ст}} = \frac{\Delta S}{S}. \quad (6)$$

Таким образом, при увеличении вводимой энергии ее компенсация при $B_{max} = \text{const}$ должна произойти за счет изменения потерь в меди и потерь на вихревые токи стали:

$$\Delta P_{\text{вв}} = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст.в.}}$$

Используя выражения 4 и 6, получим

$$\frac{\Delta W_{\text{вв}}}{W_{\text{вв}}} = \frac{\Delta P_{\text{вв}}}{P_{\text{вв}}} = (aK_s + b) \frac{\Delta S}{S}, \quad (7)$$

где

$$a = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\Sigma \text{пот}}} ; b = \frac{P_{\text{ст.в.}}}{P_{\Sigma \text{пот}}}.$$

Считая контурную емкость источником напряжения (что не вносит существенную погрешность при работе с малым уровнем пульсаций и при малом угле коммутации), можно записать

$$I_m = \frac{U_{\text{ск}}}{L_k} \cdot t_y; \quad (8)$$

отсюда

$$\frac{\Delta U_{\text{ск}}}{U_{\text{ск}}} = \frac{\Delta S}{S}. \quad (9)$$

Из уравнений (7,9)

$$\frac{\Delta U_{\text{ск}}}{U_{\text{ск}}} = \frac{\Delta W_{\text{вв}}/W_{\text{вв}}}{aK_s + b}. \quad (10)$$

Отсюда видно, что превышения напряжения на контурной емкости могут быть существенными. Так, при $m=0,1$; $a=0,4$; $b=0,2$ (примерные данные для МИБ-6) для $\frac{\Delta W_{\text{вв}}}{W_{\text{вв}}} = 25\%$ напряжение на контурной емкости C_k увеличится вдвое. Чем меньшую долю от P_{Σ} составляют потери в меди и чем меньше $P_{\text{ст.в.}}$, тем больше будет возможное превышение $U_{\text{ск}}$ при данном способе стабилизации B_{max} . Приведенные выше приближенные вычисления и полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что строить систему уравнения генератора импульсов тока при нестабилизированном вводе и точной фиксации максимума поля практически нельзя. Это может привести к недопустимо большим перенапряжениям на контуре и к выходу коммутирующих приборов из строя. Если даже увеличение потерь скомпенсирует избыток вводимой энергии на допустимом для примененных коммутирующих приборов (тиристоров и диодов) уровне по напряжению, то такой режим нежелателен из-за неоправданного увеличения потерь.

Для получения высокой стабильности поля и исключения возможных аварийных режимов необходимо импульс на запуск тиристоров коммутации формировать, как и указывалось, по полю, однако при этом необходимо стабилизировать величину вводимой энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Отрубяников. Некоторые вопросы импульсного питания электромагнитов индукционных ускорителей. Диссертация. Томск, 1967.

2. В. В. И в а ш и н. Коммутация тока в схемах получения магнитных полей и электрических машинах. Диссертация. Томск, 1968.
 3. Э. Г. Ф у р м а н. Разработка и исследование схем импульсного питания электромагнитов ускорителей. Диссертация. Томск, 1972.
 4. М. В. Ме е р о в. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. М., «Наука», 1967.
 5. Ю. П. Я р у ш к и н и др. Разработка и исследование систем импульсного питания малогабаритного бетатрона. Научный отчет НИИ ЯФЭА при ТПИ, 1972.
-