

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В СХЕМЕ ПИТАНИЯ БЕТАТРОНА ОДНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА

В. В. Ивашин, Э. Г. Фурман

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

При расчете схем питания бетатронов однополярными импульсами тока с импульсным вводом энергии в колебательный контур необходимо знать величину энергии потерь Q_R за один импульс тока в электромагните ускорителя. Величина энергии Q_R определяет параметры цепи подзаряда накопителя, мощность источника питания, тепловой режим элементов схемы и т. д.

Использование однополярных импульсов тока синусоидальной формы для возбуждения электромагнита приводит к тому, что за один цикл перемагничивания меняется по сравнению с синусоидальным режимом соотношение потерь в стали на гистерезис и вихревые токи.

Известно также, что работа конденсаторной батареи в однополярном режиме приводит к уменьшению потерь в конденсаторе по сравнению с синусоидальным режимом работы [2]. Уменьшение потерь в конденсаторах позволяет применять в схемах питания не дорогие косинусные конденсаторы, а более дешевые и малогабаритные конденсаторы, например конденсаторы типа ИМ-3-100.

В общем случае потери в колебательном контуре подсчитываются как

$$P_{об} = \sum P_i \quad (1)$$

где P_i — потери в элементах колебательного контура.

Если потери в активных элементах подсчитываются достаточно просто и точно, то подсчет потерь в стали магнитопровода и в конденсаторной батарее с имеющимся режимом работы электромагнита и накопителя представляет значительную трудность.

В данной работе проведено экспериментальное исследование степени уменьшения потерь энергии в электромагните бетатрона и в конденсаторной батарее при напряжении на конденсаторе до 1000 в при переходе от синусоидального режима работы к однополярному по току в магните и напряжению на конденсаторах.

На рис. 1 показаны схемы для проведения эксперимента и кривые изменения тока и напряжения в них при синусоидальном (а) и однополярном (б) режиме работы.

На рис. 2 приведены огибающие амплитудных значений напряжений при однополярном и синусоидальном питании электромагнита L от конденсаторной батареи емкостью $400 \cdot 10^{-6}$, составленной из четырех

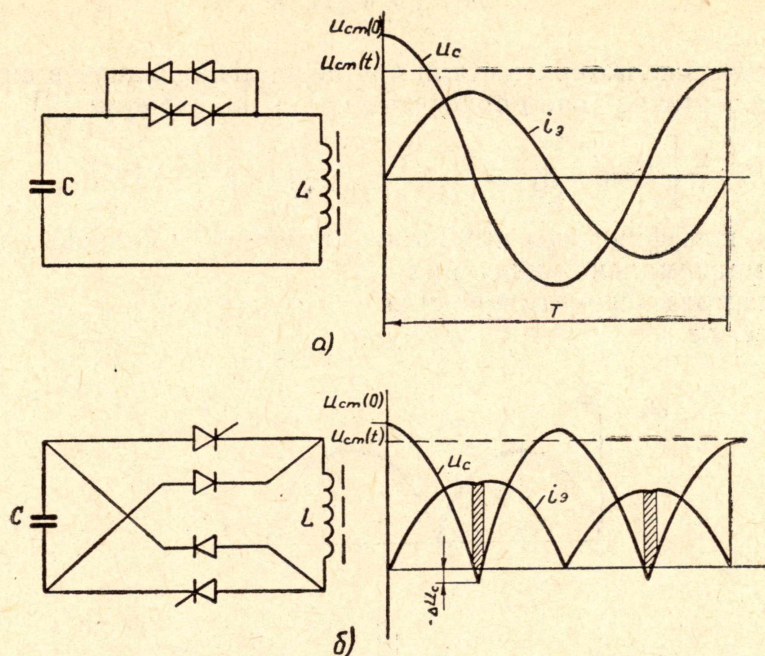


Рис. 1. Схемы для проведения экспериментов и кривые изменения тока и напряжения

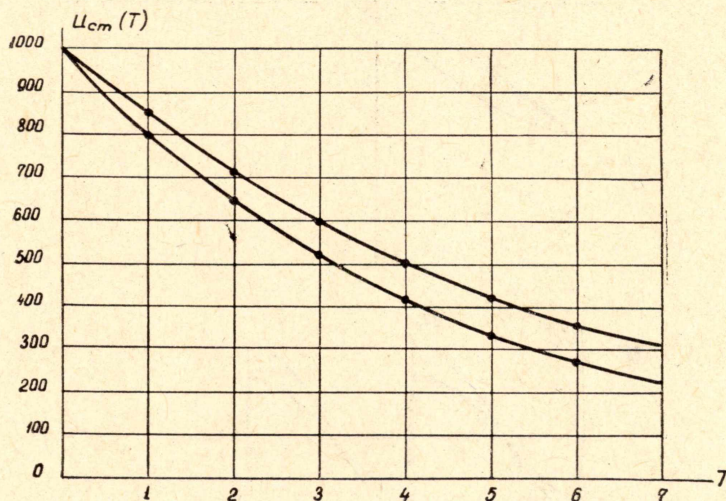


Рис. 2. Графики огибающих амплитудных значений напряжения на емкости при однополярном (верхняя) и синусоидальном режиме

импульсных масляно-бумажных конденсаторов типа ИМ-3-100. Собственная частота контура в обоих режимах равна 50 гц. Из рис. 2 видно, что при однополярном режиме работы схемы потери существенно меньше, чем при синусоидальном. Так как потери в меди и в коммутирующих приборах при работе контура в однополярном режиме равны потерям в этих же элементах при синусоидальном режиме (за исключением заштрихованного участка рис. 1), то уменьшение потерь в схеме происходит за счет уменьшения их в электромагните и конденсаторной батарее.

Потери в стали

Динамические потери в стали при перемагничивании в синусоидальном поле достаточно точно подсчитываются по формуле [3]

$$P_{ст} = \left[aB_m^2 \frac{f}{50} + b \cdot B_m^2 \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] \cdot G \quad (\text{вт}), \quad (2)$$

где a и b — коэффициенты потерь на гистерезис и вихревые токи, вт/кг ;
 B_m — максимальная индукция,
 f — частота перемагничивания,
 G — вес, кг .

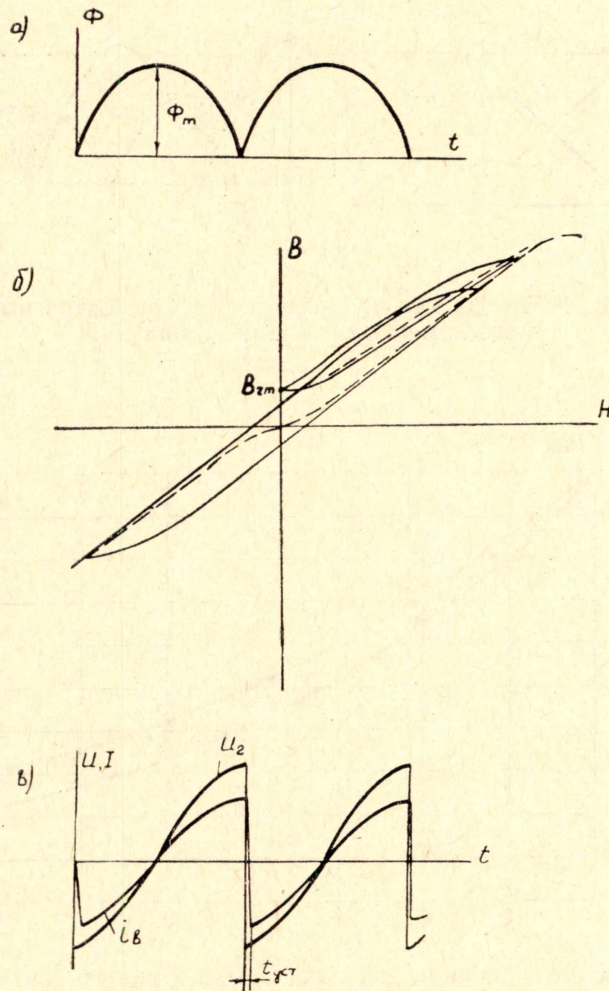


Рис 3. Магнитный поток (а), динамическая петля гистерезиса (б) и наводимые вихревые токи при однополярном перемагничивании ферромагнетика (в)

При перемагничивании сердечника в однополярном поле (рис. 3 а, б) петля гистерезиса устанавливается на частном цикле и начинается с максимальной остаточной индукции $B_{гм}$. Петля гистерезиса при однополярном режиме идет более полого, т. е. уменьшается средняя динамическая проницаемость ферромагнита, что хорошо видно на рис. 3, б.

Как показали эксперименты, при однополярном перемагничивании сердечника потери на гистерезис за один импульс тока примерно в четыре раза меньше, чем потери за один цикл перемагничивания при синусоидальном поле той же величины. Потери на вихревые токи при частотах до 500 гц при однополярном и синусоидальном перемагничивании ферромагнетика практически равны, так как время установления вихревых токов $t_{уст}$ (рис. 3, в) значительно меньше длительности импульса тока $t_{и}$ через электромагнит бетатрона.

Эксперименты проводились на электромагните весом 170 кг, изготовленном из стали марки Э12, с практически равномерным распределением индукции по сечению магнитопровода и меняющимся воздушным зазором. Потери в магнитопроводе при максимальной индукции 1,02 тл и однополярном перемагничивании составили 350 вт, а при синусоидальном режиме — 554 вт, т. е. уменьшились в 1,6 раза.

Проведение исследования показывают, что при однополярном питании электромагнита потери в стали можно определить по формуле

$$P_{ст} = \left[\frac{a}{2} B_m^2 \cdot \frac{f}{50} + b \cdot B_m^2 \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] \cdot G \cdot \frac{N}{2f} \quad (\text{вт}), \quad (3)$$

где f — собственная частота колебательного контура,

N — число импульсов тока в секунду.

Частота f_0 колебательного контура LC при однополярном режиме может быть увеличена по этой причине примерно в K раз по сравнению с синусоидальным режимом при прежних потерях в электромагните контура LC, имеющего частоту f_c .

$$K = \frac{f_0}{f_c} = \sqrt{\frac{625}{4b^2 f_c^2} + 50 \frac{a}{b f_c} + 1} - \frac{25a}{2b f_c}. \quad (4)$$

Коэффициент K в общем случае зависит от соотношения потерь в стали на вихревые токи и гистерезис. Например, для стали Э12 (для которой

$a = 2,4 \frac{\text{вт}}{\text{кг}}$, $b = 0,8 \frac{\text{вт}}{\text{кг}}$) частоту контура можно увеличить при од-

нополярном питании в 1,4 раза по сравнению с синусоидальным режимом, что дает увеличение частоты повторения циклов ускорения в ускорителе \sim в 2,8 раза.

Потери в конденсаторах типа ИМ-3-100

Потери энергии в конденсаторе в общем случае складываются из следующих составляющих:

- а) потери в диэлектрике;
- б) потери в металлических частях,

и при синусоидальном режиме подсчитываются по формуле [4]

$$P_c = 2\pi f U_c^2 \cdot C \cdot \text{tg} \delta + P_m \quad (\text{вт}), \quad (5)$$

где U_c^2 — эффективное значение напряжения на емкости, в,

C — величина емкости ф,

$\text{tg} \delta$ — угол диэлектрических потерь,

P_m — потери в металлических частях конденсатора.

Значение $\text{tg} \delta$ для масляно-бумажных конденсаторов колеблется в

пределах от $(30 \div 100) \cdot 10^{-4}$ и имеет сложную зависимость от величины приложенного напряжения [5].

Потери в диэлектрике при переменном напряжении в основном обуславливаются ионизационными процессами, которые происходят в прослойках жидкого диэлектрика [4, 5] при напряженности электрического поля в диэлектрике свыше 5 кВ/мм .

В [5] приведены осциллограммы активных бросков тока через стандартную секцию конденсатора типа ИМ при синусоидальном напряжении и наложенной на него постоянной составляющей. Броски активного тока происходят при перемене знака напряжения на передней части полусинусоид.

Рядом авторов [2, 4, 5] отмечалось, что если поле в конденсаторе незначительно меняет знак или совсем не меняет, то потери в них уменьшаются по сравнению с синусоидальным полем той же частоты.

Эксперименты по определению потерь в конденсаторах типа ИМ-3-100 проводились на схемах рис. 1, а, б при однополярном и синусоидальном режимах при собственной частоте контуров 50 гц .

Эксперимент заключался в следующем: были измерены общие потери в колебательном контуре и определены потери в элементах контура, причем потери в стали были измерены экспериментально.

Таблица 1

$U_m(t)[\text{В}]$	1000	900	800	100	600
$Q_{co}(\text{дж})$	0,95	0,76	0,60	0,43	0,367
$Q_{cs}(\text{дж})$	4,02	3,21	2,50	1,80	1,02

В табл. 1 приведены результаты измерения потерь в конденсаторе ИМ-3-100 при однополярном Q_{co} за один импульс тока в электромагните, при этом отрицательный выброс ΔU_c составлял $0,12 U_{ст}$ (рис. 1, б) и за период при синусоидальном режиме работы Q_{cs} .

Так как потери в конденсаторе практически линейно зависят от частоты, то при однополярном режиме потери можно подсчитать по формуле

$$P_{co} = Q_{co} \cdot N \quad (\text{вт}) \quad (6)$$

В (4) показано, что время жизни конденсатора определяется потерями в диэлектрике, следовательно, при однополярном режиме можно значительно увеличить напряженность электрического поля в конденсаторе по сравнению с синусоидальным режимом или увеличивать частоту повторения циклов ускорения ускорителя.

Так, при максимальном напряжении на емкости 1000 в (электрическая напряженность поля $12,5 \text{ кВ/мм}$) частоту контура при однополярном режиме можно увеличить, в нашем случае, в $2,1$ раза по сравнению с синусоидальным режимом, не уменьшая срока службы конденсаторной батареи, что приведет к увеличению циклов ускорения примерно в $4,2$ раза.

В дальнейшем для получения полной картины изменения потерь в конденсаторах следует измерить потери в конденсаторах при более высоких напряженностях электрического поля диэлектрика.

Выводы

1. При однополярном перемагничивании сердечника потери в стали меньше, чем при синусоидальном режиме перемагничивания, что позволяет увеличить собственную частоту колебательного контура ускорителя при непрерывном режиме работы, не ухудшая теплового режима электромагнита.

2. При однополярном напряжении на конденсаторной батарее потери в конденсаторах типа ИМ в два-три раза меньше, чем при синусоидальном режиме. Это приводит к значительному увеличению срока службы накопителя и позволяет в ряде случаев применять в схемах питания бетатронов малогабаритные импульсные конденсаторы большой емкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. И в а ш и н. Экономичная тиристорная схема питания малогабаритного бетатрона. Доклад на VII Межвузовской конференции по электронным ускорителям. Томск, 3—7 сентября 1968 г.
 2. Carruthers R. «Energy storage for thermonuclear research». Proc IUSTZ ELECTZ Eucs A-106, suppl, № 2, 1959.
 3. В. В. Д р у ж и н и н. Магнитные свойства электротехнических сталей. Госэнергоиздат, 1962.
 4. В. Т. Р е н е. Расчет и конструкция электрических конденсаторов. Киев, 1966.
 5. Г. С. К у ч и н с к и й. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях. Госэнергоиздат, 1967.
-