

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОМАГНИТЕ БЕТАТРОНА ТИПА ПМБ-6 С ИМПУЛЬСНЫМ ПИТАНИЕМ ТОКОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В. С. ЛОГИНОВ, А. А. ГЕЙЗЕР, В. Л. ЧАХЛОВ

(Представлена научно-исследовательским институтом
ядерной физики, электроники и автоматики)

В [1] показана возможность эффективного использования импульсного режима питания малогабаритных бетатронов. Переход от возбуждения электромагнита переменным током частотой 50 гц к питанию однополярными импульсами тока позволяет довести частоту следования импульсов тока до 200 гц в сек, а следовательно, и увеличить мощность дозы тормозного излучения, генерируемого бетатроном в 4 раза.

При применении импульсного питания бетатронов важной задачей является решение вопроса о распределении электрических потерь в активных частях электромагнита. Наличие добавочных потерь, которые обусловлены значительными магнитными потоками рассеяния, приводит к нагреву активных частей и конструктивных деталей электромагнита. Теоретическое рассмотрение этого вопроса связано с определенными трудностями, так как учет всех факторов ведет к усложнению расчетных формул, затрудняющих общий анализ.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка электрических потерь в электромагните бетатрона на основе тепловых измерений.

Экспериментальная бетатронная установка изготовлена на базе бетатрона типа ПМБ-6, работающего в непрерывном режиме от сети в 50 гц [2]. Параметры импульсов возбуждения следующие: длительность импульсов тока 2500 мксек, скважность следования равна 2, амплитуда тока $I_m = 376$ а. Обмотка выполнена из прямоугольной шинки $2 \times 3,05 \times 10$ сечением 60 мм² с количеством витков, равным 36. Магнитопровод набран из пластин электротехнической стали Э330 толщиной 0,35 мм. Измерение температур было проведено по методу встраиваемых температурных индикаторов. В качестве датчиков температур служили медь-константановые термопары $\varnothing 0,2$ мм и предварительно проградуированные от 0° до 150°С (рис. 1). Величина термоэдс измерялась потенциометром постоянного тока типа ПП в пределах от 0 до 5 мв. Погрешность измерений не превышала $\pm 0,1$ мв при температуре окружающего воздуха $20 \pm 2^\circ$ С и относительной влажности от 30 до 80%. Относительная ошибка измерения медь-константановой термопары вследствие тепловой инерционности равна [3]

$$\delta = \frac{T_0 t_0}{1 + T_0 t_0}, \quad (1)$$

здесь T_0 — постоянная нагрева бетатрона,
 $t_0 = \frac{mc}{\alpha F}$ — постоянная нагрева термопары.

При импульсном возбуждении электромагнита бетатрона и отсутствии его охлаждения оценка теплообразования в единице объема проведена по следующей зависимости:

$$q_{v_0} = \left[\left(\frac{1}{k} - 1 \right) \frac{\gamma_n}{\gamma_m} C_n + C_m \right] [(\gamma_m - \gamma_n)k + \gamma_n] \frac{\partial v}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где

k — коэффициент заполнения меди (стали),
 γ_m, γ_n — удельный вес меди и изоляции,
 C_m, C_n — удельная теплоемкость меди и изоляции,
 $\frac{\partial v}{\partial \tau}$ — скорость изменения температуры во времени.

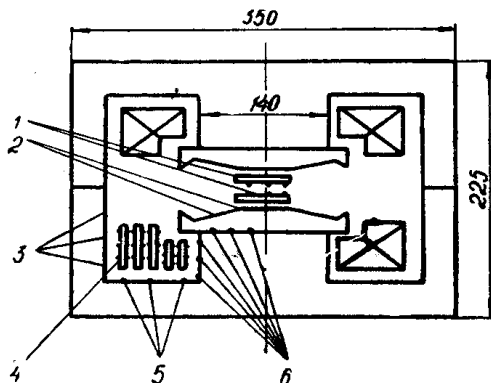


Рис. 1. Расположение термопар в электромагните бетатрона

Зная тепловыделение и объем тела, можно найти потери в нем

$$P = q_v \cdot V. \quad (2 \text{ а})$$

С другой стороны, подсчет основных потерь в обмотке при возбуждении электромагнита синусоидальным током производится по формуле

$$P_m = I_{\text{эфф}} \cdot R_0, \quad (3)$$

здесь

$$R_0 = \rho \frac{l}{s},$$

ρ — удельное сопротивление материала проводника обмотки;
 l — длина проводника, м;
 s — поперечное сечение проводника, мм.

Изменение температуры проводника связано с изменением электропроводности, поэтому сопротивление обмотки, выполненной из меди, находится по соотношению:

$$r = r_0(1 + \alpha'v), \quad (4)$$

где α' — температурный коэффициент сопротивления.

Эффективное значение тока находится по известной зависимости

$$I_{\text{эфф}} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}, \quad (5)$$

где

I_0 — постоянная составляющая тока;

I_1, I_2, \dots, I_n — действующие значения тока отдельных гармоник, или по соотношению [4]

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2S}}, \quad (6)$$

где

S — скважность импульсного процесса.

Величина дополнительных потерь в обмотке может быть оценена по простой формуле

$$P_{\text{доп}} = |P| - P_m. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены значения потерь в обмотке бетатрона, найденные из тепловых измерений.

Таблица 1

Обмотка электромагнита бетатрона ПМБ-6, выполненная из прямоугольной шинки (импульсное питание $f=200$ гц, $t_{\tau=0}=25,4^\circ\text{C}$)

Ряды*	$V_{\text{об}}, 10^{-4}, \text{вт/м}^2$	$qv_0, 10^4, \text{вт/м}^2$ по (2)	$P, \text{вт}$ по (2а)	$P_{\text{доп}}, \text{вт}$ по (7)
1	1,210	45,32	54,84	38,99
2	1,395	43,74	61,02	42,75
3	2,122	51,29	108,84	81,05
4	2,375	34,17	81,15	50,04
5	2,625	34,72	91,14	56,75
6	1,210	45,58	55,15	39,30
7	1,395	43,86	61,18	42,91
8	2,122	51,80	109,92	82,13
9	2,375	33,82	80,56	49,45
10	2,625	34,78	91,30	56,91
Итого...	19,454	—	795,10	540,28

* Нумерация рядов показана на рис. 1.

Величина потерь в обмотке, рассчитанная по (3), составила $P_m = 254,82$, а в действительности 795,10 вт. В этом случае добавочные потери равны 540,28 вт. Таким образом, в обмотке из прямоугольной шинки при импульсном питании током повышенной частоты ($f = 200$ гц) потери, найденные по соотношению (3), в 3,12 раза меньше, чем наблюдается в действительности.

Для снижения дополнительных потерь в обмотке прямоугольная шинка была заменена многожильным кабелем, который состоял из 90 параллельных проводников сечением 0,442 мм². Число витков в катуш-

ке было 36. В табл. 2 приводятся данные электрических потерь в обмотке из многожильного кабеля.

Потери, рассчитанные по соотношению (3), равны 613,8 вт, а из теплового опыта — 907,2 вт. При этом добавочные потери составляют 293,4 вт.

Таблица 2

Обмотка бетатрона ПМБ-6, изготовленная из многожильного кабеля

Ряды	$V_{об}, 10^4, м^3$	$q_{в}, 10^4, вт/м^3$	$P, вт$ по (2а)	$P_{дп}, вт$ по (7)
1	3,47	23,40	81,1	16,6
2	13,05	28,60	372,5	130,1
3	3,47	23,40	81,1	16,6
4	13,05	28,60	37,5	130,1
Итого...	33,04	—	907,2	293,4

* Расчеты для рядов шинок № 3, 4 проведены при допущении одинакового распределения температур в нижней (ряды № 1, 2) и верхней части электромагнита. Такое допущение справедливо для многостоечных бетатронов.

Как видно из табл. 2, величина коэффициента дополнительных потерь $(K_{дп} = \frac{P_{опыт}}{P_m})$ в обмотке, выполненной из многожильного кабеля ($K_{дп} = 1,48$), в 2,1 раза меньше, чем в обмотке, изготовленной из прямоугольного провода ($K_{дп} = 3,12$) (табл. 1). Кроме того, из этих таблиц видно, что потери распределены неравномерно. Сравнение потерь при импульсном питании (табл. 1, 2) с потерями при непрерывном питании электромагнита током частотой 50 гц (табл. 3) показывает, что

Таблица 3

Обмотка промышленного бетатрона ПМБ-6, выполненная из прямоугольной шинки ($f=50$ гц, $t_{э=0} = 21,5^\circ C$, $I=25$ а)

Ряды	$V_{об}, 10^{-4}, м^3$	$q_{в}, 10^4, вт/м^3$ опыт	$P, вт$ по (2а)	$P_{дп}, вт$ по (7)
1	3,29	30,06	98,89	25,79
2	3,55	33,97	120,59	41,69
3	3,52	29,95	105,42	27,22
4*	1,66	20,50	34,03	8,83
5	3,29	29,97	98,60	25,50
6	3,55	33,90	120,35	41,45
7	3,52	29,88	105,53	27,33
8*	1,66	20,30	33,69	8,49
Итого...	24,04	—	717,10	206,63

* Ряды относятся к первичной (возбуждающей) обмотке. Для этих рядов коэффициент заполнения медью $k_m = 0,804$, а в остальных рядах — $k_m = 0,751$.

в первом случае добавочные потери имеют более решающее значение, чем во втором случае. Это позволяет заключить, что наибольшие потоки рассеяния сосредоточены у полюсов и на обмотку из прямоугольной шинки они оказывают большее влияние, нежели при питании частотой $f=50$ гц. Такой подход к оценке теплообразования в тепловыделяющихся элементах бетатронов позволяет при известных геометрических размерах оценить величину потоков рассеяния.

Электрические потери в стали при синусоидальном изменении индукции могут быть вычислены по формуле Штейнмеца:

$$P = [K_1 f B_m^n + K_2 f^2 B_m^2] G, \quad (8)$$

где первое слагаемое в скобках представляет собой удельные потери на гистерезис, а второе — потери от вихревых токов. Показатель степени n для электротехнических сталей лежит в пределах 2—2,5. Известно, что полные потери в стали, определяемые опытным путем, больше потерь на гистерезис и вихревые токи. Тогда суммарные потери определяем по формуле

$$P_{ст} = P_{г} + P_{в} + P_{доп}. \quad (9)$$

В табл. 4 приведены значения потерь в магнитопроводе, полученные из тепловых испытаний и рассчитанные по (8).

Таблица 4

Магнитопровод промышленного бетатрона ПМБ-6 ($f=50$ гц)

Наименование	Коэф. заполнения стали $K_{ст}$	Объем стали $V_{ст}$, м ³	Вес стали $G_{ст}$ кг	$q_{ст}$, 10 ⁴ , вт/м ³ по (2)	P , вт по (8)	P , вт по (2a)
Центральные вкладыши	0,87	0,616	0,48	1,60	0,864	0,985
Стойки*	0,90	19,30	24,70	1,66	34,750	41,00
Ярма	0,90	11,00	14,10	1,69	19,92	23,80
Сердечник	0,85	19,55	24,89	1,63	36,20	40,56
Итого . . .	—	50,23	64,30	—	91,63	106,34

* Магнитный поток направлен под углом 90° к направлению проката.

Для импульсного питания потери в магнитопроводе определяем по соотношению

$$P = [K_1 B_m^n + K_2 B_m^2 f] \frac{N}{2} G. \quad (10)$$

В табл. 5 приведены значения потерь в магнитопроводе, найденные опытным путем и подсчитанные по (9) при $f=200$ гц и $N=200$ импульсов в секунду.

Анализ полученных результатов (табл. 5) показывает, что при импульсном питании наблюдается увеличение дополнительных потерь в полюсном сердечнике и полюсном наконечнике вследствие перетекания потока поперек пластин. Увеличение дополнительных потерь, обусловленных этим явлением, в бетатроне с непрерывным питанием (табл. 4) наблюдается в ярмах магнитопровода, однако это увеличение значительно меньше.

Таблица 5

Наименование	Коэф. заполнения сталью $K_{ст}$	Объем стали $V_{ст}$ $10^{-4}, м^3$	Вес стали $G_{ст}, кг$	$q_{ст}, 10^4$ $вт/м^3$ опыт	$P, вт$ опыт	$P, вт$ по (10)
Центральные вкладыши	0,87	0,616	0,48	10,78	6,64	5,9
Стойки	0,90	24,70	19,30	10,92	271	238
Ярма*	0,90	14,10	11,00	16,51	232,5	202
Полюсный сердечник	0,85	18,80	14,70	15,76	298,0	181,0
Полюсный накопечник	0,85	6,09	4,75	13,09	79,6	58,5
Итого . . .	—	64,31	50,23	—	887,74	685

* Магнитный поток направлен под углом 90° к направлению проката.

Суммарные потери в электромагните бетатрона определяются по формуле

$$P_{эм} = P_m + P_{ст.} \quad (11)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 6.

Таблица 6

Суммарные потери в электромагнитах бетатронов

Наименование	Частота тока $f, гц$	Ток $I, а$ опыт	$P_{эм} вт$ опыт	$P_{эм} вт$ по (11)	$P_{дп} вт$ по (7)
Промышленный бетатрон ПМБ-6	50	25	823,44	702,43	221,01
Бетатрон ПМБ-6И					
а) обмотка из шинки	200	376	1682,84	939,82	642,62
б) обмотка из кабеля	200	376	1794,94	1298,80	295,74

Выводы

1. На основе тепловых измерений проведена оценка электрических потерь в отдельных тепловыделяющих элементах электромагнитов бетатрона.

2. При частоте питаемого тока $f=50 гц$ добавочные потери невелики. Это позволяет проводить расчеты электрических потерь по обычной методике, принятой в трансформаторостроении.

3. При импульсном питании бетатронов током частотой $f=200 гц$ и со скважностью импульсов, равной двум, величина действительных потерь в обмотке, выполненной из медного проводника прямоугольного сечения, в 2—3 раза выше потерь, рассчитанных по соотношению (3).

4. Замена медной шинки на равноценное сечение многожильного кабеля приводит к уменьшению добавочных потерь, а следовательно, к снижению максимального температурного перепада в обмотке при одинаковых условиях их охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ананьев, Ю. А. Отрубянников. Некоторые вопросы импульсного питания электромагнитов индукционных ускорителей. «Приборы и техника эксперимента», 1967, № 3.
 2. Л. М. Ананьев и др. Малогабаритные бетатроны и их применение в дефектоскопии. «Дефектоскопия», 1968, № 5.
 3. Я-В. И. Костырко. Учет основных погрешностей медно-константановых микротермопар при исследовании нагрева электрических машин. Изв. вузов, сер. электро-механика, 1971, № 6.
 4. Ю. А. Отрубянников. Кандидатская диссертация. Томск, 1967.
-