

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

6174/2-80

22/12-80

9-80-577

Л.Н.Беляев, Х.Бёме, К.Дёге, Б.Кнауер, Х.Кёлер,
В.Куриц, Г.Ландграф, Х.Лёбль, Х.Оертнер,
Б.Рёле, В.П.Саранцев, С.Титтель, Р.Халлер

ДАЛЬНЕЙШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АДГЕЗАТОРА КУТИ
ДЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ
Часть 1. Анализ тепловой нагрузки
и описание новой системы

1980

ВВЕДЕНИЕ

Адгезатор представляет собой, как известно, один из основных узлов коллективного ускорителя тяжелых ионов /1/. В нем осуществляется необходимое для коллективного ускорения сжатие электронных колец с помощью нарастающего по времени импульсного магнитного поля. Конечное значение магнитной индукции составляет около 2 Т и создается при помощи магнитной системы адгезатора. В состав этой системы входят четыре пары катушек, расположенных рядом с камерой адгезатора. По ним протекает импульсный ток порядка кА в соответствующие моменты времени /рис.1/. Техническая реализация этой системы предъявляет высокие требования как на точность изготовления катушек и их монтажа на стапеле адгезатора, так и на электрическую и механическую прочность применяемых материалов. При работе ускорителя с цикличностью порядка $20 \div 50 \text{ с}^{-1}$, из-за омических потерь возникают в проводниках катушек существенные тепловые нагрузки, которые могут приводить к недопустимо высоким температурам внутри катушек.

Существующий в настоящее время прототип КУТИ /и его магнитная система/ был опробован только до цикличности $0,5 \div 1 \text{ с}^{-1}$ с паузой комплекса через некоторые сотни импульсов. Поэтому возникла задача проверить, может ли применяться существующее конструктивное решение магнитной системы при повышенной цикличности, и если нет, то переработать ее таким образом, чтобы она отвечала этим требованиям.

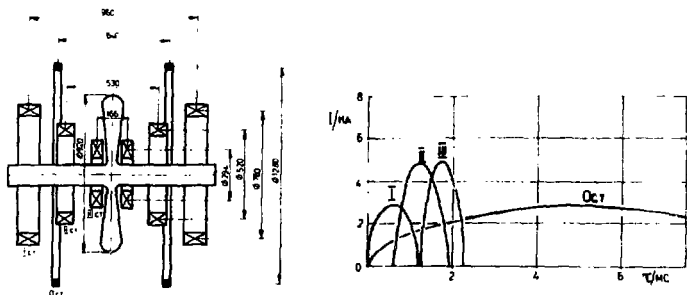


Рис.1. Магнитная система и токовая нагрузка, предположенная в расчете теплового режима.

Таблица

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ НА ПРОТОТИПЕ СИСТЕМЫ

Катушка /ступень/	Число витков в катушке	Средний диаметр /см/	Сечение по меди /мм ² /	Активн.сопр. катушки /мОм/	Длина провода /м/	Длительность импульса /мс/	Амплитуда тока /кА/	Выделяемая тепловая мощность в един. длин. при 50 с ⁻¹ и 100°С темп. проводн. /Вт·см ⁻¹ /
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	6	128	106 отв.8	1,5	24	11	3	2
I	32	76	106 отв.8	4,6	76	1	5	0,5
II	48	52	44 отв.5,5	36	78	1	5	3,8
III	70	29,4	40	31	65	1	5	3,9

СУЩЕСТВУЮЩИЙ ВАРИАНТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Катушки магнитной системы закрепляются в жестком корпусе из стеклотекстолита, - так называемом стапеле, который окружает камеру адгезатора. Обмотки катушек состоят из медного проводника, обмотанного стеклолентой и залитого эпоксидной смолой.

Обмотки нулевой, первой и второй ступеней сжатия состоят из массивного проводника, причем в двух последних есть отверстие для осуществления потока охлаждающего средства, а обмотка третьей ступени из-за требования минимального искажения магнитного поля во время сжатия состоит из многопроволочного проводника.

В настоящей работе мы исходили из технических параметров катушек существующей системы /прототип/, приведенных в таблице /ср. с работой^{1/}/. Из опыта наладки прототипа КУТИ можно сделать вывод о том, что катушки были сконструированы достаточно надежно с точки зрения их механической и электрической прочности. Поэтому анализ нагрузки катушек при повышенной цикличности проводился только по тепловому режиму в обмотках.

ТЕМПЕРАТУРА ВНУТРИ ОБМОТОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦИКЛИЧНОСТИ

Анализ теплового режима внутри обмоток проводился по методике тепловой схемы^{2/}. Благодаря этой методике можно получить, с небольшими затратами, средние значения температуры проводника и окружающей среды, например, изоляции, охлаждающего средства и т.д. Из данных, приведенных в таблице, и ориентировочных оценок, следует, что внутри обмотки катушки III ступени существует самый неблагоприятный тепловой режим, потому что в этом случае с одной стороны возникают самые высокие омические потери в проводниках, а с другой - отвод возникающей теплоты может осуществляться только сквозь эпоксидную изоляцию и поверхность обмотки. В противоположность этому в обмотках I и II ступеней тепло может отводиться дополнительно за счет внутреннего охлаждения проводника. Поэтому расчет температуры проводился сначала только для обмоток третьей ступени. Обмотка этих катушек, расположение которых показано на рис.2а, состоит из пяти слоев по 14 витков/рис.2б/. Теплота отводится по обмотке за счет теплопроводности, а с ее поверхности с помощью излучения и конвекции - в окружающую среду. Вследствие различного расположения отдельных витков теплота распределяется неравномерно, что приводит, в свою

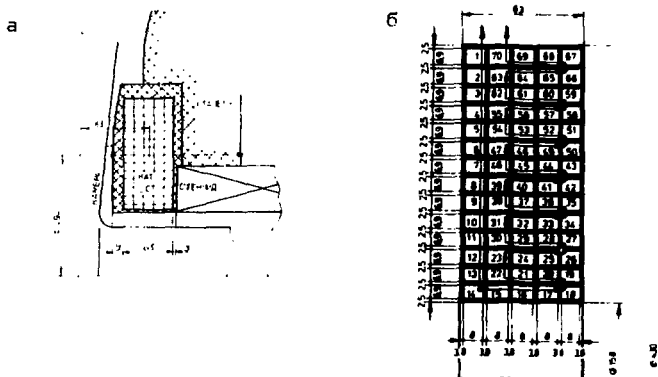


Рис.2. Расположение катушек III ступени /а/ и их витков /б/.

очередь, к различному нагреву отдельных элементов обмотки. Поэтому температура должна рассчитываться только для тех витков, в которых ожидаются, по геометрическим причинам, самые высокие температурные значения.

Если предположить, что теплота не отводится по внутренней поверхности катушки, ограниченной ускорительной трубкой, то теплопередача может осуществляться только по двум боковым и верхней поверхностям. Если предположить, кроме того, что теплота в незначительной мере отводится и по боковой поверхности, которая соприкасается с соленоидом, то получается самый неблагоприятный тепловой режим для витков №16 и 18 /см. рис.2б/.

Для обоих случаев приведена эквивалентная тепловая схема, учитывающая различную теплопередачу * /рис.3/. Отдельные элементы этой схемы рассчитаны по следующим выражениям /3/:

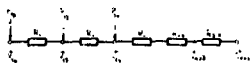
Сопротивление теплопроводности

$$R'_{Lg}, R'_L = \frac{\Delta x_{1,2}}{\lambda \cdot A} \quad //$$

где $\Delta x_{1,2}$ - толщина эпоксидной смолы поверхностного слоя,

* Тепловое сопротивление проводника здесь не учитывается.

а Отвод теплоты через обе боковые поверхности



б Отвод теплоты через одну боковую поверхность

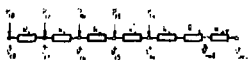


Рис. 3. Эквивалентная тепловая схема для расчета теплопередачи по обмотке катушек III ступени.

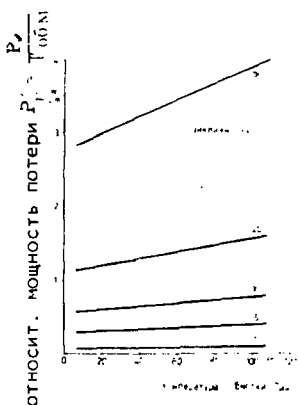


Рис. 4. Электрические потери в обмотке катушек III ступени в зависимости от температуры проводника.

а Δx_2 - толщина эпоксидной смолы между слоями обмотки;
 А - поверхность, через которую отводится теплота, на единицу длины проводника;
 λ - коэффициент теплопроводности эпоксиды ($0.5 \cdot 10^{-1} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$).
 Сопrotивление теплопередачи с поверхности

$$R'_{s,k} = \frac{1}{\alpha_{s,k} A} \quad /2/$$

где $\alpha_{s,k}$ - коэффициент теплопередачи для излучения и конвекции.

Соответственно данным рис. 2 и таблицы, с помощью /1/ и /2/ получаются значения $R'_L = 100 \text{ K Bt}^{-1}$, $R'_{Lg} = 250 \text{ K Bt}^{-1}$ и $R'_{s,k} = 1000 \text{ K Bt}^{-1}$ на единицу длины проводника. В расчете надо учитывать, что электрическая мощность P_v , эквивалентная отводимой теплоте, зависит не только от электротехнических параметров, таких, как, например, ток, сопротивление, но и от температуры проводника θ , т.е.

$$P' = P'(f, \theta) = P'(1 + \alpha_T \Delta \theta) \quad /3/$$

где для синусоидальных токовых импульсов

$$P' = \frac{I^2 R'_{20} r}{20} f \quad /4/$$

* В расчете одновременно рассмотрена теплопередача за счет излучения и конвекции.

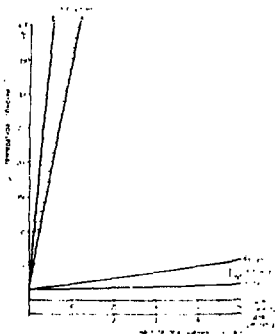


Рис.5. Нагрев обмотки катушек I, II, III ступеней в зависимости от цикличности. /а - теплоотвод через две боковые поверхности, б - через одну боковую поверхность катушек/.

где α_T - коэффициент температуры проводника;

I - амплитуда тока;

τ - длительность импульса;

R'_{20} - активное сопротивление проводника при 20°C на единицу его длины.

По данным, приведенным в таблице, и выражениям /3/, /4/ можно получить семейство кривых, изображенных на рис.4, для электрической мощности в зависимости от температуры и цикличности f . С помощью этих кривых и приведенной тепловой схемы рассчитываются средние значения температуры интересующих нас витков 16, 18. По данным рис.3 получается для рассмотренных случаев:

а - теплопередача через обе боковые поверхности,

б - теплопередача через одну боковую поверхность, а также соответствующие выражения:

$$а - \theta_{16} = 4.5P'_v R'_L + 2.5P'_v (R'_{s,k} + R'_{L_g}) + \theta_{окр} \quad /5/$$

$$б - \theta_{18} = 15P'_v R'_L + 5P'_v (R'_{s,k} + R'_{L_g}) + \theta_{окр} \quad /6/$$

Из зависимости температуры витков 16, 18 от цикличности, изображенной на рис.5, видно, что в обоих случаях "а" и "б" температура превосходит предельное для эпоксидной смолы значение $\theta_{пред} = 100^\circ\text{C}$ уже при $f \sim 0,5 \text{ с}^{-1}$ в установившемся рабочем режиме.

Аналогичным образом можно рассчитать температуру нагрева обмоток I и II ступени*. Однако, с учетом существования внутреннего охлаждения, теплопередача осуществляется, в основном, с помощью охлаждающего средства /обычно воды/.

* Тепловой режим обмотки катушки нулевой ступени из-за относительно малой нагрузки не рассматривается.

В этом случае при расчете надо учитывать теплоотвод от проводника в охлаждающее средство и его параметры /проток, входная температура/.

Предполагая турбулентный режим в жидкости и при наличии давления Δp , проток D определяется из выражения /см. /4./ /

$$D = 6 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} d^5, \quad /7/$$

где d - внутренний диаметр, l - длина проводника.

В соответствии с отводом теплоты, т.е. P_v , получаем разницу температуры между входом и выходом охлаждающей жидкости, $\Delta\theta_{a,e}$ при данном протоке D и, в связи с этим, давлении в жидкости,

$$\Delta\theta_{a,e} = \theta_{\text{вых}} - \theta_{\text{вх}} = \frac{P_v}{C_p \rho D}, \quad /8/$$

где C_p - теплоемкость, ρ - плотность.

Если учитывать теплопередачу с проводника в жидкость коэффициентом α_k /5./

$$\alpha_k = Nu \frac{\lambda_{ж}}{d_{\text{экв}}}, \quad /9/$$

где

$$Nu = 0,021 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{\text{нож}}} \right)^{0,25}, \quad /10/$$

Re - число Рейнольдса, Pr - число Прандтла, $\theta_{\text{нагр}}$ температура нагрева проводника будет

$$\bar{\theta}_{\text{нагр}} = \frac{P_v}{\alpha_k A} + \bar{\theta}_{ж}. \quad /11/$$

С учетом линейной зависимости $P_v = f^*(f)$ и данных таблицы можно рассчитывать среднее значение температуры нагрева обмотки катушек I и II ступени в зависимости от цикличности f /рис.5/. Из рисунка видно, что при цикличности $f = 50 \text{ с}^{-1}$ средний нагрев этих обмоток не превосходит предельное температурное значение для изоляции.

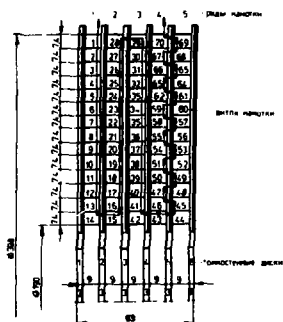


Рис. 12-51 Схема расположения витков в катушке III ступени.

Рис. 6. Схема расположения витков в катушке III ступени.

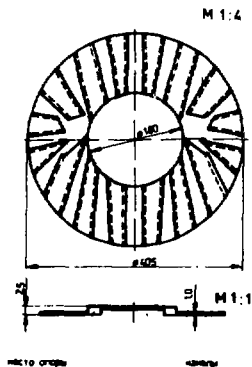


Рис. 7. Опорный диск с каналами для охлаждения.

Полученные таким образом результаты показывают, что катушки I и II ступени в случае соответствующего протекания охлаждающей жидкости могут применяться без конструктивного изменения также до цикличности $f = 50 \text{ с}^{-1}$.

В противоположность этому обмотка катушки III ступени перегружается по тепловому режиму уже при $f = 0,5 \text{ с}^{-1}$ в установившемся режиме. По этой причине для требуемого повышения цикличности до $f = 20 \div 50 \text{ с}^{-1}$ необходима конструктивная переработка катушки.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ. ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Как указано выше, для работы системы с цикличностью порядка $20 \div 50 \text{ с}^{-1}$ катушки третьей ступени должны конструироваться таким образом, чтобы они могли выдержать возникающую в них повышенную тепловую нагрузку.

При разработке учитывались измененность геометрических размеров и расположение катушек в стапеле.

Использованная до сих пор в качестве изоляции эпоксидная смола хотя и обладает малой теплоустойчивостью /класс Б/, но имеет довольно хорошую теплопроводность $\lambda = 0,3 \div 0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Этот факт означает, что тепловой режим в обмотке изменится незначительно, если применить другие, более теплоустойчивые твердые материалы, которые обладают сравнимой теплопроводностью, из чего следует, что улучшение теплопередачи и, в связи с этим, повышение допустимой тепловой на-

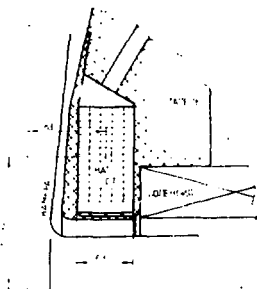


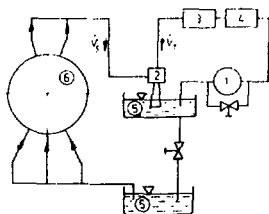
Рис. 8. Новое конструктивное выполнение комплекса катушки III ступени /стапель/.

Грузки обмотки может быть достигнуто только в случае охлаждения катушки протекающей жидкостью, которая должна обладать хорошей изоляционной и охлаждающей способностью. На первом этапе использовалось в качестве охлаждающей жидкости трансформаторное масло, однако применение другой жидкости с такими же качествами не исключается.

ОХЛАЖДАЕМАЯ КАТУШКА

С учетом указанных требований протекание через катушку охлаждающей жидкости можно реализовать только в том случае, если занимаемый эпоксидным компаундом объем используется для каналов охлаждения. При этом каналы расположены на тонких диэлектрических дисках, которые выполняют функцию эпоксидного компаунда в катушках старой конструкции. Однако для этого требуется изменение до сих пор применяемой схемы намотки катушки /см. рис. 2/.

Проблема была решена путем использования методики так называемой "цилиндрической намотки без мест спайки" /см. рис. 6/. Обмотка здесь более технологична, вследствие отсутствия таких операций, как резка проводника, сварка и т.д. Конструктивное решение каналов осуществлялось с учетом следующих требований: необходимо обеспечить, с одной стороны, чтобы охлаждающая жидкость, несмотря на малую протяженность каналов /порядка 2 мм/, протекала через катушку равномерно и беспрепятственно, с другой - чтобы она протекала продольно диаметру катушки. Форма каналов, изображенная на рис. 7, удовлетворяет этим требова-



1 - ведущий насос
2 - струйный насос
3 - фильтр
4 - теплообменник
5 - масляный насос
6 - катушка III ступени

Рис. 9. Принципиальная схема циркуляции охлаждающей жидкости.

ниям. Направление потока определяется конфигурацией каналов и наличием камеры ввода и вывода жидкости. Применение охлаждающей жидкости требует расположения катушки в герметичном баке, стенки которого должны выдерживать возникающую механическую и электрическую нагрузку. Кроме того, должно измениться механическое крепление катушки в стапеле. Необходимая в этом случае новая конструкция стапеля приведена на рис. 8, причем в качестве материала использовался полиэфир со стекло-текстолитом и полиуретаном. Из ориентировочных оценок по механической и электрической прочности в районе минимальной толщины стенки следует, что конструкция при ожидаемой нагрузке $F_{\max} \sim 8000$ кг, $U \sim 30$ кВ довольно надежна.

Передача с помощью вынужденной конвекции тепловой мощности с обмотки в охлаждающую жидкость потребует перепада температуры между поверхностью проводника и охлаждающей жидкостью, значение которого становится тем меньше, чем больше проток жидкости, т.е. чем выше скорость охлаждающей жидкости. Отводимая тепловая мощность P_v , проток охлаждающей жидкости D и перепад температуры между входом и выходом жидкости $\Delta\vartheta_{н,е}$ связаны между собой выражением /8/. Максимальное значение температуры в жидкости, существующее у ее выхода, равно значению температуры поверхности проводника и получается из суммы перепадов температуры между проводником и жидкостью, а также между входом и выходом охлаждающей жидкости. Допустимое значение этой температуры определяется предельной температурой охлаждающей жидкости, составляющее в случае применения трансформаторного масла 80°C .

Эти проблемы обсуждаются более подробно в части II.

Протекание жидкости через катушку не может осуществляться под давлением, так как возникает нежелательная дополнительная нагрузка на тонкие стенки бака. Этого можно избежать, если перейти к режиму высасывания масла из катушки, что в данных условиях решено применением струйного насоса. Система состоит из двух насосов /рис.9/. Ведущим насосом P_T создается проток \dot{V}_T из масляного бака через струйный насос P_C , с помощью которого возникает в насосе P_S некоторое разрежение ($\sim 0,1$ атм), и масло (\dot{V}_S) может протекать через катушку без существенного дополнительного давления. Значение протока \dot{V}_T , определяющего теплопередачу протока \dot{V}_S , ограничено, так как выше предельного протока /зависящего от конструкции насоса/ возникает явление кавитации, которое может привести к прерыванию протока и, в связи с этим, к аварийной ситуации.

ВЫВОДЫ

Изложенные выше результаты показывают, что в случае применения охлаждаемых катушек III ступени магнитная система работоспособна до цикличности $f = 20 \div 50 \text{ с}^{-1}$. Реализация такого охлаждения потребовала, в основном, нового конструктивного решения самих катушек, а также стапеля, что и явилось предметом рассмотрения настоящей работы. Параметры технических и конструктивных решений из-за сложности системы были определены с помощью многочисленных модельных испытаний, результаты которых представлены в части II.

Авторы признательны З.А.Тер-Мартirosяну, В.Г.Новикову, В.С.Швецову и А.М.Хохлову за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
2. Michejev M.A. Grundlagen der Wärmeübertragung. Berlin, vt, 1962.
3. Löbl H., Stoye H.-J. Erwärmungsverhältnisse in Schaltund Verteilungsanlagen, Proj-Vorschrift, Vubaea, 17/11/78.
4. Монтоммери Д. Получение сильных магнитных полей соленоидами. "Мир", М., 1971.
5. Костерев Ф.М., Кушнырев В.И. Теоретические основы теплотехники. Энергия, М., 1978.