

УДК 534.08;53.087

БЫСТРОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЛАЙНЕРА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ВИГГЛЕРА ПРИ ПЕРЕХОДЕ МАГНИТОВ В НОРМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

© 2013 г. А. В. Зорин, Н. А. Мезенцев, В. М. Цуканов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

E-mail: a.v.zorin@ngs.ru

Лайнер сверхпроводящего вигглера представляет собой тонкостенную эллипсообразную медную трубку, расположенную внутри вакуумной камеры, и служит в качестве теплового экрана. При переходе магнитов вигглера в нормальное состояние на лайнер действуют силы в вертикальном направлении, способные деформировать его. В работе описана система быстрого измерения деформации лайнера, приведены результаты измерений с тремя различными лайнерами.

DOI: 10.7868/S036767651309055X

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящий вигглер представляет собой последовательность знакопеременных сверхпроводящих магнитов, расположенных вдоль траектории пучка электронов, движущихся внутри вакуумной камеры ускорителя, и предназначен для генерации мощного синхротронного излучения. Институт ядерной физики СО РАН – мировой лидер по созданию сверхпроводящих вигглеров с высоким полем. Сверхпроводящие магниты вигглера находятся в сосуде с жидким гелием. Вакуумная камера, по которой пролетает пучок электронов, изготовлена из нержавеющей стали и является частью этого сосуда. Отсутствие теплового экрана между пучком и вакуумной камерой привело бы к значительному выделению тепла в камере из нержавеющей стали и, как следствие, к интенсивному испарению жидкого гелия. Для уменьшения тепловых потерь от наведенных токов пучка внутрь вакуумной камеры помещают так называемый лайнер – тонкостенную эллипсообразную медную трубку, внутри которой и летит пучок (рис. 1). Сопротивление меди, как электрическое, так и тепловое, значительно меньше, чем у нержавеющей стали. Тепло, выделяемое в лайнере, отводится к криокулерам, имеющим тепловой контакт с лайнером на его концах при температуре около 10–20 К [1].

Переход сверхпроводящих магнитов в нормальное (несверхпроводящее) состояние нетипичен для экспериментов с вигглерами, однако практика их эксплуатации показывает, что это случается. При переходе вигглера в нормальное состояние лайнер подвергается действию огромных сил, что может привести к его деформации в вертикальном направлении и дорогостоящему ремонту. Цель

данной работы – получение информации о деформации различных лайнеров во время перехода магнитов в нормальное состояние и разработка конструкции лайнера, устойчивого к остаточным деформациям.

ТЕОРИЯ ДЕФОРМАЦИИ ЛАЙНЕРА

Появление нормальной зоны в некотором магните приводит, согласно закону Джоуля–Ленца, к нагреванию участка обмотки. За счет теплообмена нормальная зона быстро распространяется по всей обмотке и соседним полюсам. Весь процесс перехода магнита в нормальное состояние занимает время порядка секунды (рис. 2).

При этом в связи с увеличением сопротивления уменьшаются ток в обмотках и магнитный поток в пространстве между магнитами, где находится лайнер. Согласно закону электромагнит-

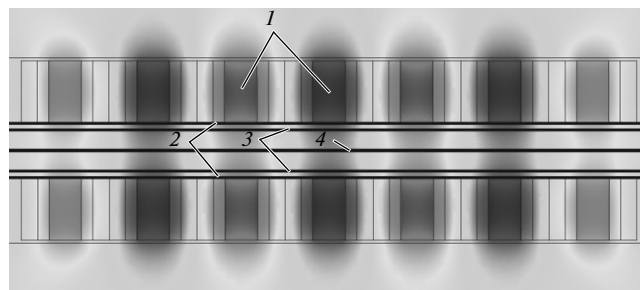


Рис. 1. Вигглер в разрезе. 1 – сверхпроводящие магниты (верхний и нижний магнит каждой пары создают поле в одном направлении, соседние пары – в противоположном); 2 – вакуумная камера; 3 – лайнер; 4 – траектория движения электронов и синхротронного излучения.

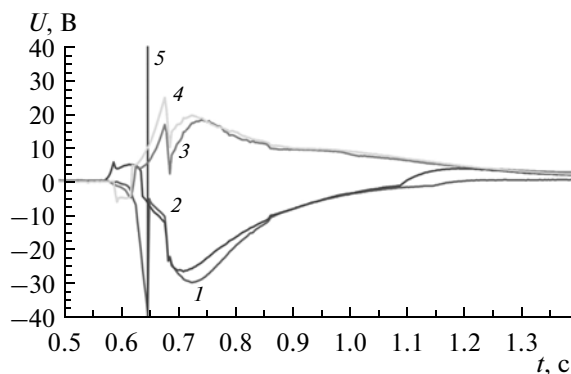


Рис. 2. Напряжение на обмотках полюса во время перехода в нормальное состояние. Обмотки: 1 – верхняя внутренняя; 2 – нижняя внутренняя; 3 – верхняя внешняя; 4 – нижняя внешняя. 5 – срабатывание детектора перехода.

ной индукции, в лайнере возникают электродвижущие силы, приводящие к появлению в нем токов. Для расчета сил, действующих на лайнер, в каждом вертикальном сечении вигглера, перпендикулярном его оси, можно выделить четыре тока: два в верхнем и нижнем магнитах и еще два в верхней и нижней частях лайнера. Взаимодействие этих токов описывается законом Ампера и приводит к появлению интересующих нас вертикальных сил, действующих на лайнер. Было проведено компьютерное моделирование, результат которого представлен на рис. 3. Предполагается, что потеря сверхпроводимости произошла в верхней магните. Из моделирования видно, что верхняя сторона лайнера сначала тянется вверх, а потом вниз. Нижняя же сторона все время тянется вниз. В конце концов лайнер должен схлопнуться и согнуться вниз.

КОНФИГУРАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментов использовался прототип вигглера с полем 7.5 Тесла, состоящий из семи магнитов с каждой стороны. Три центральных магнита создавали полное поле 7.5 Тесла, а две крайние пары – 3/4 и 1/4 от основного поля. Длина каждого полюса 100 мм. Магниты погружались в вертикальный криостат глубиной 4 м, наполняемый жидким гелием, вакуумная камера отсутствовала, поэтому лайнер тоже находился в гелии. Ширина щелей между лайнером и магнитами около 2 мм, и в них требовалось поместить датчики деформации.

Нельзя предсказать заранее, в каком именно из центральных полюсов начнется переход в нормальное состояние, поэтому требовалось как минимум семь датчиков на каждую сторону: три в центрах полюсов и четыре между полюсами. Датчики должны быть механически прочными, рабо-

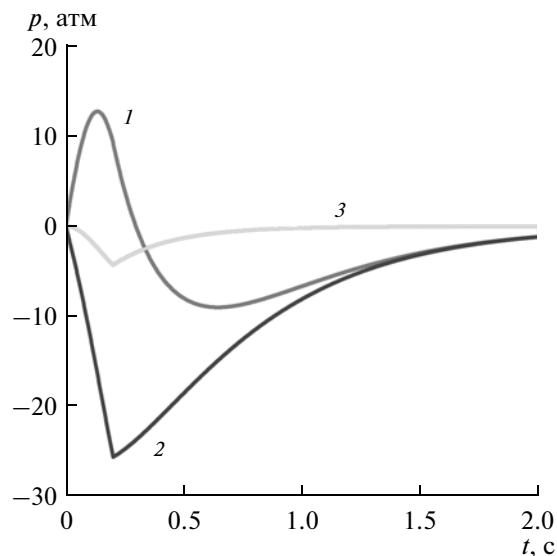


Рис. 3. Компьютерное моделирование давлений на лайнер. 1 – давление на верхнюю сторону; 2 – на нижнюю; 3 – между токами лайнера.

тать при температуре жидкого гелия; желаемая точность – 100 мкм на ширине щели от 0 до 10 мм, а частота дискретизации – порядка 10 кГц, так как помимо интересующих нас колебаний из-за потери сверхпроводимости возможны колебания лайнера звуковой частоты.

В качестве датчиков расстояния использовались конденсаторы с изменяемым зазором. Одной обкладкой, общей для всех каналов, являлся сам лайнер, имеющий общую точку с землей. Другие обкладки размером 50 × 50 мм каждая прикреплялись к магниту. Девять таких обкладок на каждую сторону лайнера были выполнены на двусторонней печатной плате, а с другой стороны каждой платы была сделана общая обкладка для подключения генератора. Помимо печатных плат внутри криостата располагались только соединительные провода, все остальное находилось снаружи.

Были рассмотрены более десяти схем, позволяющих измерять емкость конденсаторов, в том числе описанные в книгах [2, 3]. Но данный эксперимент выдвигал жесткие требования: необходимо одновременно измерять 18 гальванически связанных каналов, сигналы идут по близко расположенным проводам длиной 5 м с емкостью, сравнимой с емкостью датчиков, внутрь криостата нельзя поместить электронику из-за низких температур. В итоге подходящими были признаны лишь три схемы: потенциометрическая, мостовая и схема с диодным мостом; все они описаны в [3]. Недостатком схемы с диодным мостом являются небольшая чувствительность, а также необходимость дифференциального вольтметра; мостовая схема наиболее чувствительна, но она

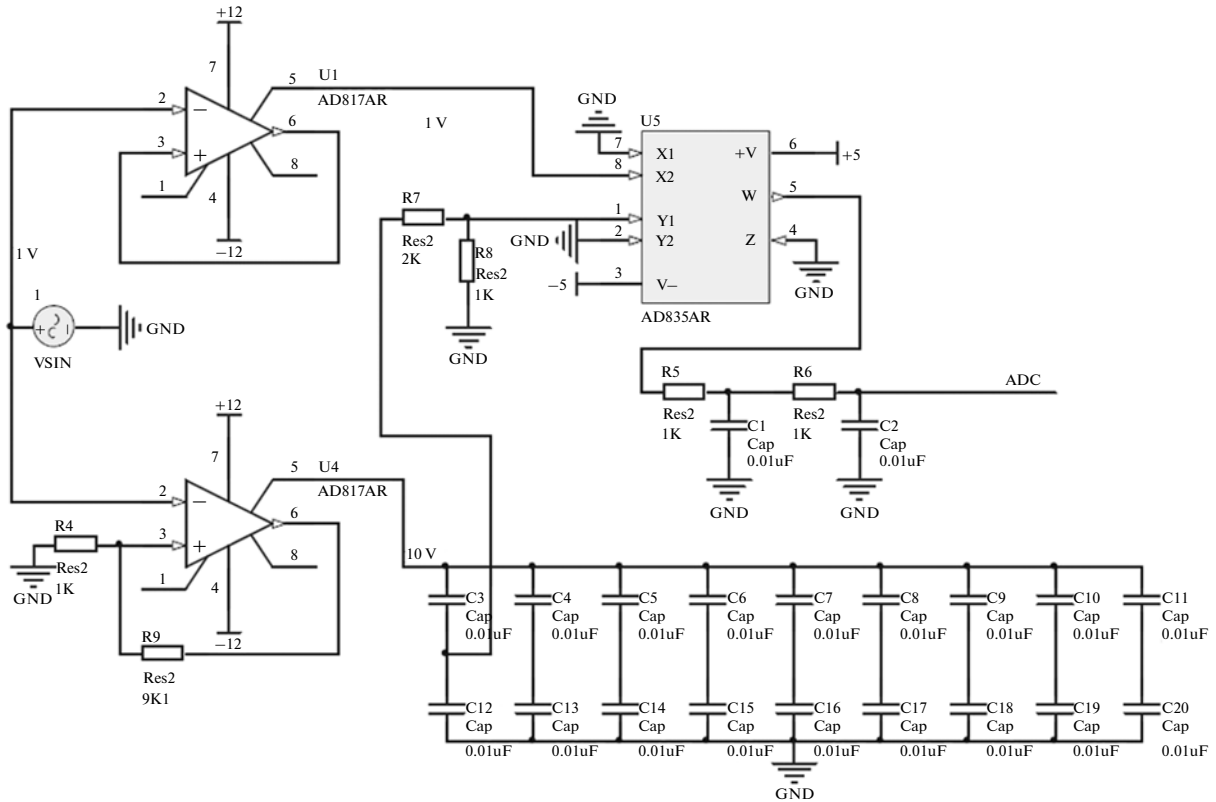


Рис. 4. Показан генератор, эквивалентная схема одной стороны лайнера с печатной платой, один измерительный канал.

годится лишь для небольшого изменения емкости, а также не сообщает абсолютное положение лайнера; поэтому была выбрана потенциометрическая схема (рис. 4). Гармонический сигнал частотой 100 кГц создавался генератором ГЗ-112, усиленный по току операционными усилителями AD817 и подавался на общие обкладки, а также на один из входов 18 перемножителей AD835. На второй вход этих микросхем подавались сигналы со средних обкладок, т.е. происходило синхронное детектирование. Полученные сигналы проходили через сглаживающие RC-цепочки и оцифровывались подключенным к компьютеру АЦП NI USB-6218 с частотой дискретизации 5 кГц на каждый канал.

Если пренебречь сдвигом фаз, несложно найти зависимость напряжения на выходе схемы от расстояния между обкладками. Она выражается формулой $U(x) = k_1 U_0^2 / \left(k_2 + \frac{1}{x} \right)$. Квадрат напряжения генератора U_0 возникает из-за синхронного детектирования, коэффициент k_1 связан с уменьшением амплитуды сигнала на резистивном делителе, а k_2 – с соотношением емкостей конденсаторов и соединительных проводов. При нулевом зазоре напряжение также должно быть нулевое, а максимума достигать при бесконечном x . При калибровке системы оказалось, что необходимо вве-

сти еще как минимум один коэффициент – сдвиг напряжения k_3 . Формула приобретает следующий

вид: $U(x) = \frac{k_1 U_0^2}{k_2 + \frac{1}{x}} + k_3$. Мы не занимались исследова-

нием физического смысла этого коэффициента, а ввели его феноменологически.

Чувствительность системы огромна при малых зазорах и мала при больших. При калибровке относительная погрешность расстояния тем меньше, чем больше его величина, поэтому достаточно точно можно было измерить лишь две точки: нулевое и бесконечное расстояние, что дало два коэффициента для каждого канала: k_1 и k_3 . Таким образом, калибровка не дала нам численную зависимость расстояний от измеряемых напряжений. Чтобы получить хоть какое-то представление о зазорах, проводилась следующая обработка экспериментальных данных: полагая k_2 одинаковым для всех каналов и учитывая найденные k_1 и k_3 , проведено линейное преобразование графиков $U(t)$. После этого графики 9 нижних каналов были отражены относительно оси времени, чтобы для всех каналов верх и низ оси напряжения соответствовал верху и низу вивглера, а не увеличению и уменьшению расстояния между лайнером и магнитом; далее графики были сдвинуты по

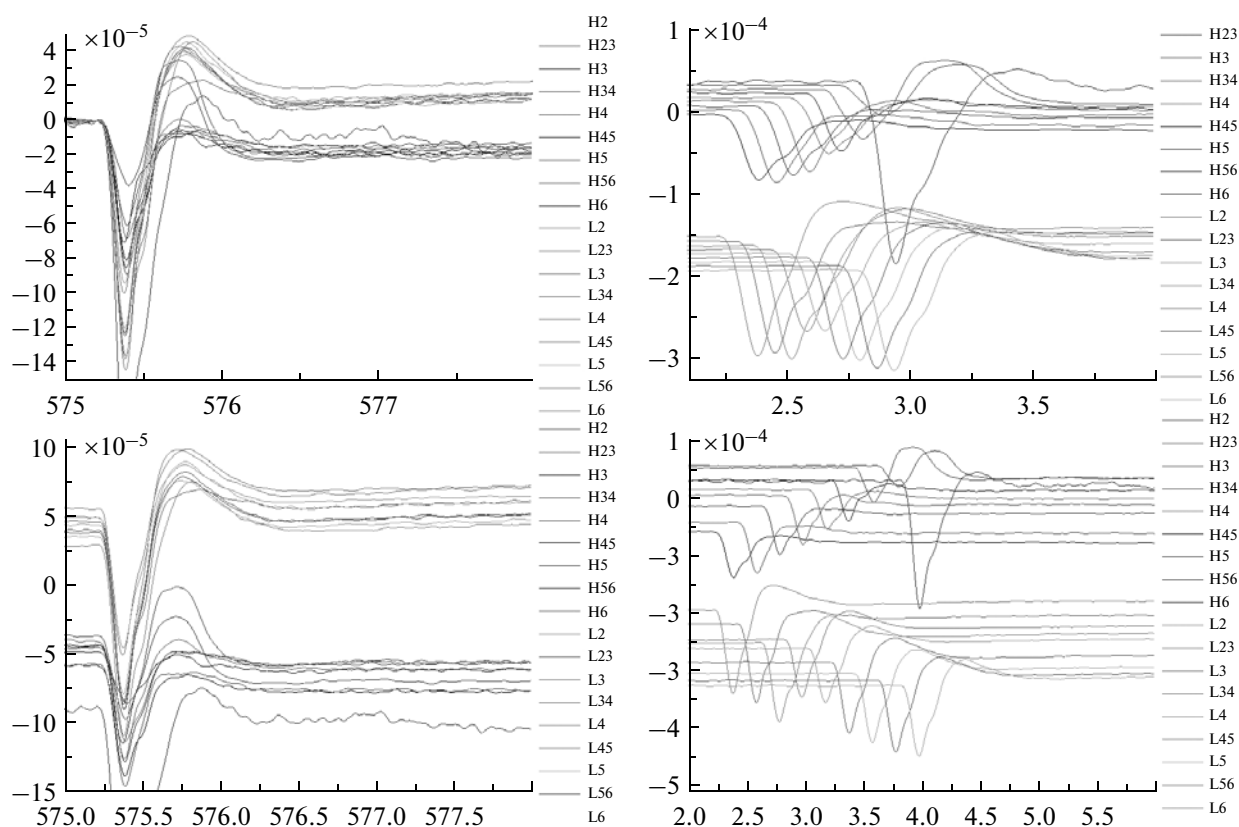


Рис. 5. Вверху начальная деформация предполагается нулевой; внизу начальная деформация соответствует концу предыдущего измерения. Справа рисунки трехмерные: каждый следующий канал сдвинут относительно предыдущего как по времени, так и по напряжению. Горизонтальная ось – время в секундах; вертикальная – напряжение в вольтах. Легенда – измерительные каналы: Н – верхняя сторона, L – нижняя, цифры – номер полюса (двойные – межполюсные области).

оси напряжения так, чтобы непосредственно перед потерей сверхпроводимости все они проходили через одну точку (как будто там деформация нулевая). Для следующих переходов в нормальное состояние в каждом эксперименте были сделаны два варианта графиков, также проходящие через одну точку и начинающиеся там, где закончились предыдущие графики. После этого был сделан еще один вариант визуализации: разные каналы были сдвинуты друг относительно друга как по времени, так и по напряжению, картинка приобрела трехмерность. Ввиду большого количества графиков и отсутствия качественных различий между ними мы приводим данные лишь одного измерения. На рис. 5 представлены обработанные результаты последнего перехода в нормальное состояние в третьем эксперименте.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Были проведены эксперименты с тремя лайнерами: обычным (медным), медным с нихромовым напылением для придания упругости и медным с

продольными прорезями для уменьшения наведенных токов.

ЭКСПЕРИМЕНТ С ОБЫЧНЫМ ЛАЙНЕРОМ

Для первого эксперимента использовался немодифицированный медный лайнер. Его окончательное состояние: сплющивание и прогиб – было известно заранее, так что целью эксперимента являлась прежде всего проверка системы измерения деформации. Были проведены два измерения, оба раза система показала как колебания лайнера при переходе в нормальное состояние, так и остаточную деформацию.

ЭКСПЕРИМЕНТ С ЛАЙНЕРОМ С НИХРОМОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

Для второго эксперимента на внешнюю поверхность лайнера был напылен слой нихрома толщиной 300 мкм (толщина меди в самом узком месте составляет 500 мкм). Удельная электропроводность нихрома на порядки меньше, чем меди,

поэтому силы, действующие на лайнер, не должны были значительно увеличиться. В то же время предполагалось, что механическая прочность лайнера сильно возрастет. Эксперимент, состоящий из трех измерений, показал, что это не так: деформация оказалась примерно такой же, как и в первый раз.

ЭКСПЕРИМЕНТ С ЛАЙНЕРОМ С ПРОРЕЗЯМИ

В третьем эксперименте участвовал медный лайнер, с каждой стороны которого были сделаны две параллельные прорези длиной 500 мм на расстоянии 40 мм друг от друга. Таким образом, наведенный поперек лайнера ток разделялся на три независимые области, что должно было многократно уменьшить действующие на лайнер силы.

Всего было проведено пять измерений. Качественно картина была такой же, как и в предыдущих экспериментах: каждый раз наблюдалась некоторая деформация. Разборка вигглера показала, что остаточная деформация гораздо меньше, чем в предыдущих экспериментах. В основном изменение формы пришлось на полосы между прорезями, в целом же лайнер практически не прогнулся, сквозное сечение лишь слегка уменьшилось. В предыдущих экспериментах оно исчезало полностью.

ВЫВОДЫ

Быстрое измерение деформации лайнера сверхпроводящего вигглера при переходе в нормальное состояние является новым для Института ядерной физики и имеет большое значение для создания лайнеров, более устойчивых к жестким условиям эксплуатации вигглеров. Была разработана измерительная система, позволяющая проводить эксперименты с прототипом вигглера в погружном криостате. К сожалению, удалось получить лишь качественную картину деформации, однако она совпала с теоретическими расчетами.

Установлено, что на элемент лайнера, ближайший к перешедшему в нормальное состояние магниту, действуют две противоположно направленные силы Ампера: сначала преобладает сила притяжения к магниту, так как именно изменение силы тока в нем наводит ток в элементе лайнера; со временем эта сила ослабевает, и лайнер начинает схлопываться за счет взаимодействия токов в двух его половинках. Конечная деформация всего лайнера зависит от многих факторов: местоположения магнита, с которого начался переход в нормальное состояние; характера распространения нормального состояния на остальные магниты вигглера; конструкции самого лайнера, его предыдущей деформации. Общим, однако, является то, что лайнер всегда стремится схлопнуться по крайней мере в районе полюса, вызвавшего переход в нормальное состояние.

Всего были испытаны три лайнера: обычный медный, медный с нихромовым напылением и медный с продольными прорезями. Первые два лайнера деформировались примерно одинаково и недопустимо сильно; таким образом, нихромовое напыление не оказало существенного влияния на механическую прочность лайнера. Третий лайнер испытал лишь незначительную деформацию; значит, продольные щели, являющиеся бесконечным сопротивлением для наведенных токов, значительно улучшили устойчивость лайнера к переходам магнитов в нормальное состояние.

Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ и финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khruschev S.V. и др. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A. 2009. V. 603. № 1/2. P. 7.*
2. *Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники (в 2 т.). Изд. 3-е. М.: Мир, 1986. Т. 2. 590 с.*
3. *Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем (в двух книгах). М.: Мир, 1992. Книга 1. 480 с.*