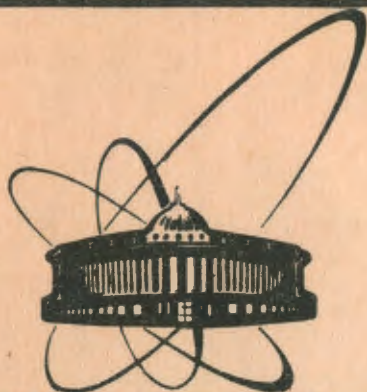


89-518



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

В 18

P13-89-518

Г.А.Вареник, Д.Георгиев, В.Н.Замрий,
В.Н.Крючков, В.В.Нитц, А.Б.Роганов,
А.П.Сиротин, Б.Н.Соловьев, В.А.Трепалин,
В.К.Широков, А.А.Яковлев

ИМПУЛЬСНАЯ МАГНИТНАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

1989

1. Введение

Импульсная магнитная установка (ИМУ-2) входит в состав спектрометра СНИМ-2, предназначенного для нейтронных исследований на ИБР-2 фазовых переходов, индуцированных магнитным полем в магнитоупорядоченных веществах.

В отличие от изучения магнитных свойств кристаллов "классическими" методами (намагниченность, магнитострикция, магнитный резонанс), нейтронные исследования в магнитном поле с реальными потоками нейтронов предъявляют значительно более суровые требования к импульсной магнитной установке. Даже при работе на реакторе ИБР-2 с частотой повторения импульсов поля несколько раз в секунду получение нейтронограммы одного дифракционного пика при одном значении амплитуды поля обычно связано с непрерывным измерением в течение нескольких часов. Получение полных данных о состоянии вещества возможно только в условиях проведения многосуточного физического эксперимента. Поэтому импульсная магнитная установка должна обладать сравнительно большой мощностью и высокой стабильностью в работе.

Принцип действия ИМУ-2, описываемой в данной работе, одинаков с ранее используемой на реакторе ИБР-30 установкой /1/; конденсаторная батарея с помощью высоковольтного выпрямителя периодически заряжается до заданного напряжения и быстро, синхронно со вспышками реактора, разряжается через катушку импульсного магнита. Общая блок-схема ИМУ-2 представлена на рис.1. В сравнении с прежней установкой ИМУ-2 обладает рядом преимуществ: значительно, по крайней мере на порядок, больше мощность, повышение точности значений магнитного по-

ля, более высокая степень автоматизации управления, полупроводниковое силовое оборудование.

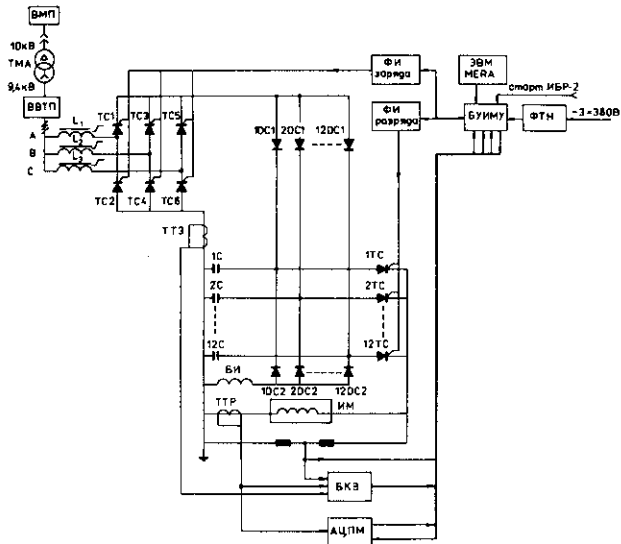


Рис.1. Блок-схема импульсной магнитной установки. ВМП - масляный выключатель, ВВТП - вакуумный выключатель, ТТЗ - трансформатор тока зарядных импульсов, ТТР - трансформатор тока разрядных импульсов, БИ - балластная индуктивность, ИМ - импульсный магнит, БУИМУ - блок управления магнитной установки, ФТН - фазизирующие трансформаторы, БКЗ - блок контроля и защиты, АЦПМ - блок измерения формы разрядных импульсов.

Использование ИМУ-2 в сочетании с дифрактометром НД-3 /2/, имеющим значительный, по сравнению с установкой на ИБР-30, поток нейтронов на образце, обеспечивает качественный скачок в эффективности физических измерений.

2. Зарядная система

Основными элементами этой системы являются анодный трансформатор ТМА-1600/35 (номинальная мощность 1600 кВА, соединение треугольник-звезда, на первичных обмотках - 10 кВ, на вторичных - 9,4 кВ), высоковольтный выпрямитель, разделительные диодные столбы, формирователи импульсов управления, дроссели насыщения.

Выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме с фазовым управлением. Состоит из шести тиристорных столбов (ТС1-ТС6) по десять последовательно соединенных таблеточных тиристоров Т630-24 (номинальный ток 630 А, максимальное напряжение 2,4 кВ) в каждом столбе. Схема столба с дополнительными элементами показана на рис. 2а. Выравнивающий резистивный делитель состоит из десяти резисторов ТВО-20, 68 кОм. Каждый тиристор зашунтирован двумя ограничителями напряжения ОНС-10/12, соединенными встречно, и снабжен индикатором рабочего состояния (неоновые лампы ТН-0,2). Каждый тиристорный столб снабжен размножающим трансформатором, с помощью которого импульсы управления передаются на управляющие электроды. Трансформаторы изготовлены на основе ферритовых колец 600НН диаметром 100 мм. Импульсы управления (на управляющих электродах) имеют синусоидальную форму, амплитуда импульсов 50 А, длительность (по основанию) 25 мкс. Каждый блок формирователя импульсов управления (всего шесть блоков) включает в себя емкостный накопитель заряда, разряжаемый через первичную обмотку размножающего трансформатора с помощью тиристорного ключа. Работают блоки формирователей попарно (1/4; 1/6; 3/6; 3/2; 5/2; 5/4), открывая соответствующие тиристорные столбы.

Максимальный эффективный ток выпрямителя 160 А, диапазон фазовых углов управления 100-176 эл.град.

На входе высоковольтного выпрямителя размещены дроссели насыщения, выполненные в виде кольцевых сердечников из трансформаторной стали с узкой петлей гистерезиса и обмоток из медной шины. Они предназначены для предотвращения проникновения во внешнюю высоковольтную сеть высокочастотных гармоник, возникающих при переходных процессах в выпрямителе.

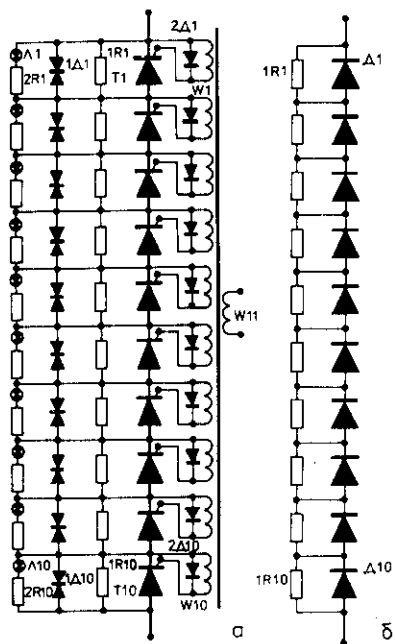


Рис.2. Принципиальная схема:

- а - тиристорного столба;
- б - диодного столба.

Заряжаемая батарея конденсаторов общей емкостью $6 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$ разделена на двенадцать секций (1С-12С). Каждая секция состоит из 10 конденсаторов ИС5-200У2 (номинальное напряжение 5 кВ, емкость $2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$). Конденсаторы в секциях соединены в пять параллельных ветвей по два последовательно соединенных конденсатора в каждой ветви.

Максимальное напряжение на конденсаторной батарее 10 кВ и, следовательно, максимальная запасаемая энергия 300 кДж.

Диодные столбы 1ДС1-12ДС1 (по десять таблеточных диодов Д200-14 в каждом, см. рис. 26) служат для ограничения токов в случае электрического пробоя в одной из секций конденсаторов.

Вакуумный выключатель ВВТП обеспечивает быстрое, за время, меньшее, чем 20 мс, автоматическое отключение напряжения в аварийных ситуациях.

Величина и форма зарядных импульсов измеряется с помощью трансформатора тока ТТ3 (типа ТНШЛ-0,66-1000/5). Измерение напряжения на каждой из секций осуществляется с помощью делителя напряжения с точностью 0,5%.

3. Разрядная система

Разрядная система включает в себя двенадцать импульсных коммутаторов тока, малоиндуктивную кабельную линию, соединяющую конденсаторные секции и коммутаторы с импульсным магнитом, балластную индуктивность, двенадцать диодных столбов, через которые присоединена балластная индуктивность, и формирователь импульсов управления коммутаторами.

Каждый коммутатор представляет собой тиристорный столб (1ТС-12ТС), полностью аналогичный тиристорным столбам выпрямителя (см. рис. 2а). В данном случае используются таблеточные тиристоры Т500-12, а в качестве ограничителей напряжения используются варисторы СН-2-2А-820В. Амплитуда импульсов управления (на каждом тиристоре) 5 А, длительность по основанию около 10 мкс. Коммутаторы рассчитаны на пропускание импульсов разрядного тока синусоидальной формы с амплитудой до 10 кА (через каждый коммутатор), длительностью до 10 мс с частотой повторения несколько раз в секунду.

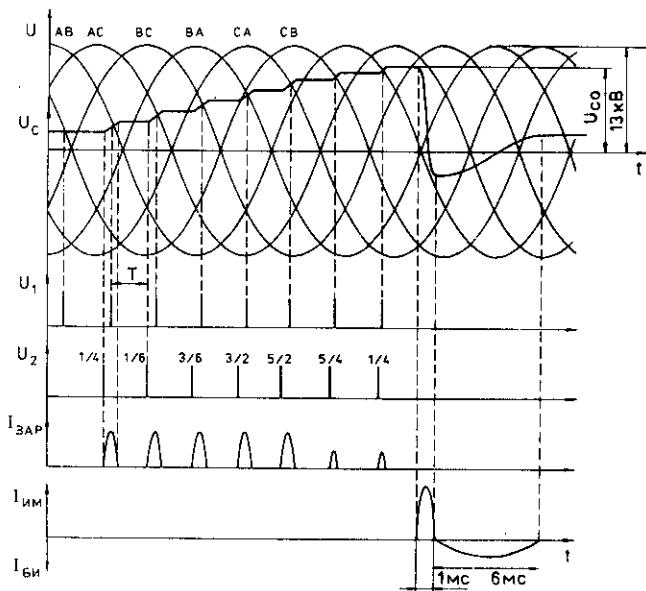


Рис. 3. Временные диаграммы работы ИМУ-2. U - последовательность синусоид анодного напряжения выпрямителя, сфазированных с шестью синусоидами управления, получаемыми из блоков ФТН; U_c - напряжение конденсаторной батареи; U_1 - импульсы фазировки; U_2 - импульсы управления выпрямителя; $I_{зар}$ - зарядные импульсы; $I_{им}$ - импульсы разряда через магнит; $I_{би}$ - импульсы обратной перезарядки. T - задержка импульсов управления выпрямителя.

Разрядная кабельная линия состоит из 144 отрезков кабеля (по 12 на каждую конденсаторную секцию) РК-50-11-13 длиной около 30 м со специальными токосборниками в начале и конце линии. Полная индуктивность разрядной цепи, не включая индуктивность магнита,

составляет 2 мкГн. Активное сопротивление разрядной цепи (без магнита), определяющее скорость затухания колебательного процесса, равно $8 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Балластная индуктивность (БИ) используется для автоматической обратной перезарядки конденсаторной батареи, следующей сразу за импульсом разряда через магнит. БИ представляет собой 12 витков кабеля с медными жилами сечением 2x75 мм и резиновой изоляцией, намотанного на каркас диаметром около 200 см. Длительность синусоидальных импульсов перезарядки (см. рис. 3) около 6 мс.

Диодные столбы (1ДС2-12ДС2) обратной перезарядки - такие же, как диодные столбы ДС1 (см. рис. 2б).

Формирователь импульсов управления для коммутаторов аналогичен формирователям импульсов управления выпрямителя, но содержит еще дополнительный трансформатор, размножающий импульс управления на двенадцать коммутаторов.

Охлаждение выпрямительных и коммутаторных тиристоров и силовых диодов осуществляется дистиллированной водой, прогоняемой через полые плоские радиаторы, между которыми зажаты таблетки тиристоров и диодов.

4. Импульсный магнит (МИТ)

Один из предназначенных для использования импульсных магнитов представляет собой двухсекционный соленоид с диэлектрическим зазором между секциями, в котором имеются каналы для пропускания нейтронного пучка и для ввода конца криостата с исследуемым образцом. Внутренний диаметр соленоида 20 мм. Зазор между секциями в случае магнита с вертикальным направлением поля равен 12 мм, для магнита с горизонтальным полем - 17 мм. Обмотка магнита выполняется из

медной трубки квадратного сечения 5,1 x 5,1 мм с толщиной стенки 1,3 мм. Каждая секция состоит из 15 витков. Межвитковая изоляция и бандажирование обмотки обеспечивается стеклотканью и компаундом на основе эпоксидной смолы. Неоднородность магнитного поля в рабочем объеме, равном $\sim 1 \text{ см}^3$, не превышает 1%. Коэффициенты между значениями магнитного поля и тока равны 4,5 Э/А и 3,8 Э/А соответственно для магнитов с зазорами 12 и 17 мм. Индуктивность их около 16 мкГн. Охлаждение магнита осуществляется пропусканием дистиллированной воды с давлением на входе 6 атм. Длительность импульсов около 1100 мкс. (длительность полупериода синусоиды). При работе с магнитом при амплитуде тока 28 кА и частоте $5/2 \text{ с}^{-1}$ вода нагревается на 50° . Число импульсов, выдерживаемых магнитом при амплитуде 25-28 кА, варьируется в широких пределах для различных экземпляров, достигая в лучших случаях $5 \cdot 10^5$ имп. Опыта длительной работы с магнитом при больших токах пока нет, но проводились успешные недолговременные испытания его при токе до 50 кА.

5. Система управления

В состав ИМУ-2 входят электрическая система сигнализации, управления и защиты (СУЗ) и электронная система управления (ЭСУ). СУЗ выполнена на основе стандартного оборудования, включающего коммутирующие аппараты, устройства релейной защиты, электроавтоматики и телемеханики с набором световых табло и электроизмерительных приборов.

ЭСУ предназначена для управления зарядным процессом для синхронизации разрядных импульсов с работой реактора, для блокировки и сигнализации в случае выхода из зарядного режима, для измерения и контроля зарядных импульсов, изменения напряжения на конденса-

торной батарее и импульсов разряда. В состав ЭСУ входят блоки формирования шести синусоид управления (ФТН), блок управления импульсной установки (БУИМУ), блок контроля и защиты (БКЗ), блок измерения формы импульсов разрядного тока (АЦПМ), ЭВМ типа MER A-60 с периферийными устройствами (см. рис. 1).

Последовательность цикла работы ИМУ-2 иллюстрируется диаграммами на рис. 3. Разряд конденсаторной батареи через магнит осуществляется с заданной временной задержкой 10-70 мс относительно стартового импульса реактора с точностью в несколько мкс. Сразу после окончания разрядного импульса происходит обратная перезарядка конденсаторов через балластную индуктивность. Высоковольтный выпрямитель включается в зарядный процесс через 20 мс после импульса разряда. Частота зарядных импульсов 300 с^{-1} , длительность зарядного процесса при частоте следования циклов 5 с^{-1} составляет около 150 мс. Зарядный процесс прекращается при достижении заданного напряжения U_{co} на конденсаторной батарее, после чего с заданной задержкой следует новый разряд и цикл повторяется.

Предусмотрена работа ИМУ-2 с длительностью цикла "заряд-разряд", превышающей период работы ИБР-2 (200 мс) в два, три и большее число раз. При этом соответственно увеличивается длительность зарядного процесса.

Равномерность зарядного процесса, т.е. одинаковость зарядных импульсов, обеспечивается временной привязкой к моменту пересечения кривой изменения напряжения U_c с синусоидой анодного напряжения (см. рис. 3) и постоянством временной задержки T импульсов управления. Перед достижением заданного напряжения U_{co} величины T автоматически увеличиваются, приводя к соответствующему уменьшению зарядных импульсов. Благодаря этому при $U_{co} > 200 \text{ В}$ разброс

значений напряжения на конденсаторной батарее не превышает 0,3%. Устройство и подробное описание работы программно управляемого блока БУИМУ приведено в работе /3/.

БКЗ обеспечивает защиту установки при превышении предельно допустимых значений импульсов зарядного тока или напряжения на какой-либо из конденсаторных секций, при выходе из строя какого-либо коммутатора, при срабатывании защиты в электрической системе управления. БКЗ снабжен световыми индикаторами, позволяющими быстро идентифицировать характер неисправности. Ряд существенных защитных функций обеспечивается блоком БУИМУ.

Блок АЦПМ работает в автоматическом режиме по заданной программе с выводом информации на дисплей (и цифropечать) и обеспечивает измерение амплитуды и формы разрядных импульсов, поступающих с токового трансформатора ТНШЛ-0,66-5000/5. Ширина временного канала - 8, 16, 32 или 64 мкс, число каналов - до 1024, точность измерения величины тока в пределах 0,5%.

Серьезной проблемой явилось устранение влияния наводок, связанных с переходными процессами в высоковольтном выпрямителе и коммутаторах, на работу ЭСУ и детекторной аппаратуры дифрактометра НД-3 и других физических установок, используемых на ИБР-2. Достижение точности значений напряжения U_{c0} в 0,3% потребовало снижения паразитных пульсаций потенциалов в компараторе до милливольта. Еще более жесткие условия пришлось обеспечивать для детекторной аппаратуры.

Проблема была решена реализацией следующих дополнительных мер.

1. Высоковольтный зарядно-разрядный контур установки снабжен отдельным очагом заземления.

2. Вся высоковольтная часть ИМУ-2, включая и формирователи импульсов управления, размещена в экранированном со всех сторон помещении (листовая сталь толщиной 3 мм).
3. В цепи управления и контроля, связывающие оборудование высоковольтного помещения с пультовой, кроме цепей с импульсным управлением, введены помехоподавляющие фильтры (80 дБ в диапазоне 0,15-100 МГц).
4. Используются уже упомянутые дроссели насыщения на входе высоковольтного выпрямителя.
5. Предусмотрен ряд блокировок в БУИМУ.
6. Нейтронные детекторы, используемые на ИД-3, снабжены дополнительными металлическими экранами.
7. Блокировка работы высоковольтного выпрямителя на время регистрации нейтронов, рассеянных на образце.

Управление работой ИМУ-2 производится в интерактивном режиме, т.е. для каждого значения поля в программу микропроцессорных блоков БУИМУ и АЦПМ вводятся все необходимые параметры и число импульсов поля. После выполнения измерения и записи нейтронного спектра в файл задаются параметры режима для следующего значения поля и т.д. Предусмотрена диагностика работы ИМУ-2, т.е. вывод на терминал и на печать значений основных параметров измерений при остановке и указание на причины, вызвавшие непредусмотренные прекращения работы.

6. Резервные возможности ИМУ-2

В таблице показано соотношение между возможностями ИМУ-2 и параметрами, достигаемыми с реальными импульсными магнитами. В первой колонке - предельные параметры ИМУ-2. Во вто-

рой - соответствующие параметры режима, в котором использовались до настоящего времени магниты МИТ в физических измерениях. В третьей колонке приведен режим, который, по-видимому, является предельным для магнитов этого типа, во всяком случае, если для накопления необходимой информации требуется не меньше, чем 10^2-10^3 импульсов поля. Указанные значения частоты импульсов для МИТ соответствуют нагреву охлаждающей воды на 60°C . Два значения амплитуды поля, приводимые для МИТ, соответствуют двум рассмотренным модификациям магнита (зазор 12 мм и 17 мм).

Таблица

Параметры ИМУ-2	ИМУ-2 - реализо- вано	МИТ - реали- зовано	МИТ пре- дель- ное	M2	ИМУ-2 (ТБ253-1000)
Выпрямленный ток, А	160	15	15	36	160
Напряжение конденса- т. батареев, U_{ω} , кВ	10	1,8	3,0	2,4	10
Частота разрядных импульсов, C^{-1}	5	$\frac{5}{2}$	1	5	5
Амплитуда разрядных импульсов, кА	120	30	50	120	285
Амплитуда импульсов поля, кЭ	-	135/115	225/190	85	-
Длительность импуль- сов поля, мкс	-	1100	1100	350	-
Крутизна импульсов тока, $(dI/dt)_{\text{max}}$, А/мкс	700	90	150	1000	9600

Как видно, остается значительный резерв, допускающий существенное развитие конструкций магнитов без изменения основных узлов установки.

В зависимости от характера конкретных физических исследований могут требоваться импульсы магнитного поля как с меньшей, так и с большей, чем 1000 мкс, длительностью. В дальнейшей работе на ИМУ-2 предусматривается использование целого набора импульсных магнитов с различными конструкциями и параметрами. В четвертой колонке приведены параметры для гипотетического магнита М2 с индуктивностью, значительно меньшей, чем индуктивность разрядных цепей, равная 2 мкГн. Возможно, это одновитковый или двухвитковый магнит. Длительность импульса в этом случае имеет минимальную для нашей установки величину 350 мкс. Повышенная при этом крутизна изменения тока может быть обеспечена заменой используемых сейчас тиристоров Т500 с допустимой крутизной 60 А/мкс на тиристоры такого же типа с увеличенной крутизной (выпускаются до 400 А/мкс).

Импульсные возможности установки могут быть существенно улучшены использованием в коммутаторах быстродействующих тиристоров типа ТБ253-800 или ТБ253-1000. Согласно паспортным данным, максимальная амплитуда импульсов тока для них равна соответственно ^{/4/} 22 кА и 24 кА, а допустимая крутизна тока 800 А/мкс. Получаемые при этом предельные параметры установки приведены в пятой колонке.

В заключение авторы благодарят А.В.Андросова, Б.И.Воронова, Г.П.Жукова, Ким Чир Сена, Б.Киселева, М.Кочурова, С.Низиола, Ю.М.Останевича, Ю.В.Полубояринова, В.П.Попова и других сотрудников лаборатории за полезные советы при создании ИМУ-2 и за обеспечение работоспособности различного оборудования установки.

Литература

1. Андросов А.В., Анцупов П.С., Вареник Г.А., Крючков В.Н., Лапшинов В.Н., Нитц В.В., Попов В.П., Соловьев Б.Н., Яковлев А.А., ОИЯИ, Р13-11559, Дубна, 1978.
2. Ананьев Б.Н. и др., ОИЯИ, Р13-89-517, Дубна, 1989.
3. Вагов В.А. и др. ОИЯИ, 13-89-133, Дубна, 1989.
4. Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Петухов В.М.
Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры. Справочник,
М.: Радио и Связь, 1988, стр.513.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1989 года.