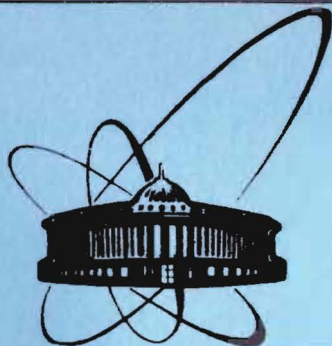


6158/85

Р5-568



Объединенный
институт
ядерных
исследований
Дубна

С3933

P9-85-568

В.М.Лачинов, В.П.Саванеев, А.М.Стариков,
В.П.Филин

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ
МАГНИТОКАЛИБРОВОЧНЫЙ СТЕНД ОНМУ
Система электрического питания, управления
и защиты

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

1985

В Отделе новых методов ускорения ОИЯИ создан сверхпроводящий магнитокалибровочный стенд (СМС), используемый при создании и эксплуатации магнитометрической аппаратуры для ускорительной техники ^{/1-3/}. Стационарные магнитные поля до ~ 5 Т при комнатной температуре получаются с помощью сверхпроводящего соленоида (СПС) внутри цилиндрического антикриостата с диаметром ~ 8 см. В рабочем объеме СПС на длине ~ 5 см по его оси обеспечивается однородность поля $\sim 10^{-5}$ /см. Возможен режим "замороженного" магнитного поля со спадом во времени менее 10^{-4} /ч.

Ниже рассмотрена система электрического питания, управления и защиты, которая обеспечила как особые требования при вводе в СПС тока питания и его стабилизации, так и надежность работы СПС, включая устройства защиты и эвакуации большей части энергии из СПС при переходах его обмотки в нормальное состояние.

Введение в систему стабилизации тока СПС широкодиапазонного датчика тока на основе магнитного компаратора постоянного тока ^{/4/} с повышенным быстродействием и низкими выходными пульсациями ^{/5/} позволило улучшить режим ввода и стабилизации тока (длительная ~ 6 ч стабильность тока достигает $\sim 5 \cdot 10^{-5}$).

БЛОК-СХЕМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ СМС

На рис. 1. представлена блок-схема системы электрического питания, управления и защиты СМС. Источник питания представляет собой компенсационного типа стабилизатор с обратной связью по току и последова-

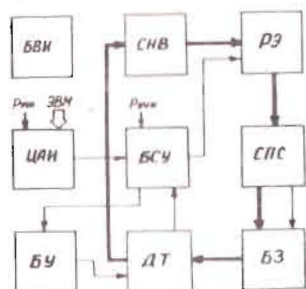


Рис. 1. Блок-схема системы электрического питания, управления и защиты сверхпроводящего магнитокалибровочного стенда. СМВ - высокоточный низковольтный выпрямитель, РЭ - регулирующий элемент, СПС - сверхпроводящий соленоид; БЗ - блок защиты, ДТ - датчик тока, БУ - блок управления, БСУ - блок стабилизации и управления, ЦАИ - цифровой автоматический интегратор, БВИ - вспомогательные источники питания.

тельным включением регулятора и нагрузки. Сильноточный низковольтный выпрямитель СМВ через регулирующий транзисторный элемент РЭ питает нагрузку СПС с индуктивностью ~ 9 Гн и омической составляющей промежуточных соединений $\sim 0,003$ Ом. Последовательно с СПС включен блок



защиты БЗ, который содержит детектор нормальной зоны (НЗ) обмотки СПС, тиристорный силовоточный ключ и сопротивление для рассеяния запасенной в СПС энергии (до ~ 90 кДж) в процессе ее эвакуации. Выходная шина СПС через БЗ и датчик тока ДТ подключается на второй вывод СНВ, замыкая контур силового питания. Управление ДТ осуществляется блоком управления БУ. Блок стабилизации и управления БСУ замыкает петлю обратной связи по току системы авторегулирования. Управление величиной стабилизируемого тока может осуществляться от блока цифрового автоматического интегратора ЦАИ, имеющего режим ручного управления и режим управления от ЭВМ. Блок вспомогательных источников БВИ обеспечивает напряжениями питания ± 6 В, ± 12 В, ± 24 В все блоки электрической системы СМС.

БЛОК СИЛВОТОЧНОГО НИЗКОВОЛЬТНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Выпрямитель (рис.2а) состоит из цепей с последовательно соединенными трехфазным трансформатором и мостом, выходы которых включены параллельно. Трансформаторы подключены к сети 220В/380В один (Tr_1)

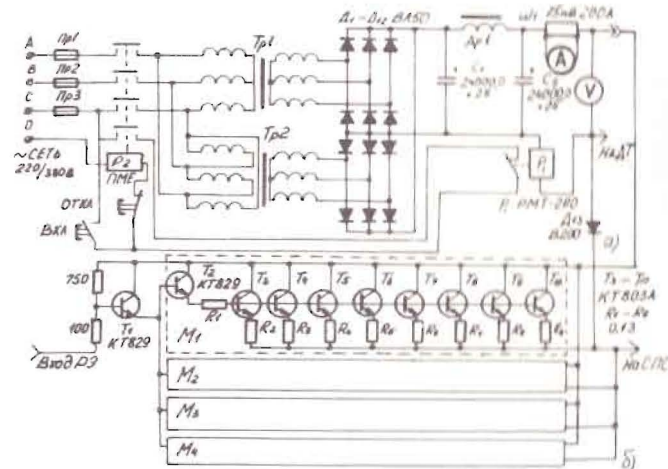


Рис.2. Схема силовоточного низковольтного выпрямителя и регулирующего элемента.

по схеме звезда - звезда, второй (Tr_2) - треугольник-звезда. Выпрямители работают на общую нагрузку через LC -фильтр (Dr_1 ; $C_{1,2}$). Повышенная частота пульсации 600 Гц позволяет при меньших габаритах фильтра эффективно подавить пульсации выходного напряжения.

Для защиты блока СНВ от перегрузки по току и коротких замыканий

в выходную цепь включено реле R_1 максимального тока типа РМТ, с током срабатывания ~ 220 А. Включение блока СНВ производится через магнитный пускатель ПМЕ - 0,5Т, а контроль выходного напряжения и тока осуществляется по стрелочным приборам, установленным на передней панели блока.

ТРАНЗИСТОРНЫЙ РЕГУЛИРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

В качестве силового регулятора выходного тока стабилизатора служит транзисторный РЭ, который представляет собой повторитель на составном транзисторе. Последний состоит из четырех параллельно включенных групп транзисторов (M_1+M_4) и управляющего ими транзистора T_1 с большим усилением по току, что уменьшает нагрузку на предшествующий блок БСУ. Непосредственно выходным током управляют 32 транзистора типа КТ803 с включенными в их эмиттеры сопротивлениями ($\sim 0,13$ Ом), выравнивающими токи через транзисторы. Частотные характеристики используемых в РЭ транзисторов позволили получить полосу пропускания РЭ ~ 10 кГц. Конструктивно РЭ выполнен на медной плате с размерами 410 x 366 x 8 мм, имеет водяное охлаждение и расположен в блоке стабилизатора тока.

ДАТЧИК ТОКА И ЕГО БЛОК УПРАВЛЕНИЯ

В качестве датчика тока в стабилизаторе использован магнитный компаратор постоянного тока ^{4/}. Подобные измерительные компараторы имеют ряд преимуществ - высокую стабильность преобразования, относительно небольшие габариты и малую потребляемую мощность, высокую чувствительность и отсутствие гальванической связи с измеряемой цепью. Данный компаратор отличается тем, что имеет пропорциональную выходную характеристику с двусторонним ограничением во всем рабочем диапазоне токов, которая обеспечивает удобство функционирования в системе авторегулирования. Схема компаратора приведена на рис.3, а описана в работе ^{4/}. Ниже описан усовершенствованный вариант ^{5/} магнитного компаратора, который обеспечивает лучшие эксплуатационные характеристики.

В магнитный компаратор введен дополнительный "быстрый" канал, который параллелен основному и передает на выход переменные составляющие стабилизируемого тока в диапазоне частот более 100 кГц. При этом в основной канал, передающий сигналы постоянного и медленноменяющегося тока, возможно ввести более эффективное (на порядок) подавление выходных пульсаций. В результате расширена полоса пропускания ДТ на несколько порядков при сниженном более чем на порядок уровне выходных пульсаций, что значительно увеличивает возможности применений ДТ.

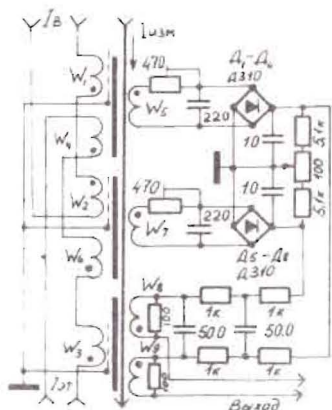


Рис.3. Схема датчика тока.

Быстрый канал ДТ (рис.3) и схема управления ДТ (рис.4) работают следующим образом. В ДТ добавлен трансформаторный преобразователь на третьем кольцевом магнитном сердечнике из пермаллоя, который охватывает шину с измеряемым током. На сердечнике имеются три обмотки W_8 и W_9 (по 500 вит. и W_3 (1000 вит. как и W_4, W_6). Обмотка W_3 включена последовательно с обмотками компенсации W_4, W_6 в цепь эталонного тока ДТ. Таким образом, этот сердечник размагничен при нормальном режиме ДТ, когда

$$I_{ЭТ} \cdot W_3 = I_{ИЗМ} \cdot W_{10} \quad (I)$$

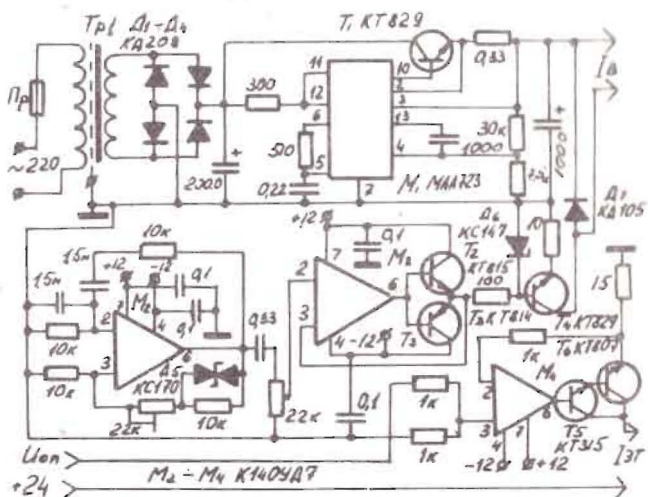


Рис.4. Схема блока управления датчиком тока.

и трансформаторный преобразователь передает переменные составляющие из первичной обмотки W_{10} , через которую протекает измеряемый ток $I_{ИЗМ}$, на выходы обмоток W_8 и W_9 . Эти обмотки включены последовательно - согласно в выходную цепь ДТ так, что их "быстрый" сигнал складывается с постоянным и "медленным" сигналом ДТ. При этом пульсации на выходе ДТ, вызванные его модуляцией, снижены более чем на порядок RC -фильтром ($R_6 + R_9, C_5, C_6$). Для согласования амплитудно-частотных характеристик обоих каналов обмотки W_8 и W_9 нагружены на резисторы $\sim 100 \text{ Ом}$.

Блок управления ДТ (рис.4) включает генератор импульсов тока возбуждения $I_{В}$ и управляемый опорным напряжением источник эталонного тока $I_{ЭТ}$. Генератор синусоидальных сигналов на ОУ (M_2) с мостом Вина в цепи обратной связи задает частоту возбуждения $\sim 1 \text{ кГц}$ со стабильностью лучше $0,2\%$. Амплитуда колебаний генератора поддерживается постоянной за счет введения в цепь обратной связи двуханодного стабилитрона D_5 (КС 170 А). С помощью повторителя (M_3, T_2, T_3) и выходного каскада на T_4 формируются колоколообразные импульсы тока возбуждения $I_{В}$ с амплитудой до $\sim 0,5 \text{ А}$. Питание выходного каскада (60 В) выполнено на интегральном стабилизаторе M_1 и T_1 .

Источник эталонного тока (M_4, T_5, T_6) преобразует опорное напряжение в ток $I_{ЭТ}$. При совпадении ампервитков компенсационной и измерительной цепей, согласно (I), на выходе ДТ напряжение равно 0. Стабильность нуля ДТ в течение 6 часов в диапазоне комнатных температур лучше $5 \cdot 10^{-5} \text{ В}$. Крутизна преобразования тока достигает $\sim 0,1 \text{ В/А}$ при отсутствии "ложных" нулей в выходной характеристике.

БЛОК СТАБИЛИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Блок БСУ включает усилитель на ОУ, компаратор, источник опорного напряжения и аналоговый интегратор (рис.5). Сигнал с ДТ, показывающий отклонение стабилизируемого тока от опорного сигнала, усиливается ОУ ($M_2 + M_4$) в ~ 1000 раз и управляет РЭ. Для уменьшения статизма системы авторегулирования на неинвертирующий вход оконечного повторителя (M_4, T_1, T_2) подана часть опорного напряжения. Малый температурный дрейф использованных ОУ способствует достижению высокой долговременной стабильности выходного тока.

В блоке имеется ОУ (M_1), который можно использовать при работе с обычным шунтом в качестве датчика тока, а M_2 как компаратор для получения сигнала ошибки.

Высокостабильный источник опорного напряжения необходим для задания величины стабилизируемого тока в СПС и управления эталонным током в БУ датчика тока. Регулируемое гелипотом R_4 в диапазоне $0 \div 5 \text{ В}$

постоянное опорное напряжение, получаемое от прецизионного параметрического стабилизатора на $D_{1,2}$ (Д818Е) и T_3+T_6 ^{7/3}, поступает на неинвертирующий вход компаратора (M_5). На его инвертирующий вход подается выходное напряжение интегратора, являющееся опорным для стабилизатора тока.

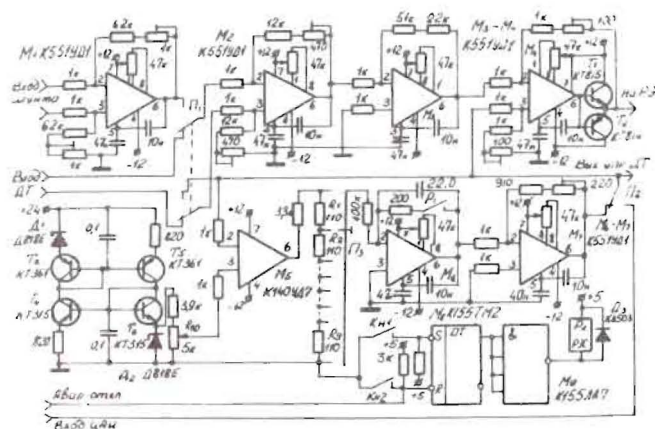


Рис.5. Схема блока стабилизации и управления.

Аналоговый интегратор (M_6, M_7) управляется выходным сигналом с компаратора M_5 через делитель и переключатель Π_3 . Уровень этого сигнала определяет скорость нарастания - спада выходного напряжения интегратора. При достижении последнего значения, равного заданному опорному напряжению, интегратор переходит в следящий режим работы и поддерживает выходное напряжение равным опорному. Управление интегратором осуществляется кнопками $K_{Н1}$ (пуск) и $K_{Н2}$ (сброс). Первая включает режим интегрирования и запускает систему питания, а вторая используется при аварийных ситуациях или при работе СИС в "замороженном" режиме для сброса тока стабилизатора. Интегратор обеспечивает изменение тока в нагрузке от 0 до 200 А со скоростью нарастания - спада от 0,1 до 0,9 А/с, которое изменяется дискретно с шагом 0,1 А/с с помощью Π_3 .

ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ИНТЕГРАТОР

Для управления током стабилизатора разработан более совершенный блок цифрового автоматического интегратора (ЦАИ) в стандарте КАМАК, который имеет ручной режим управления, а также режим управления от ЭВМ.

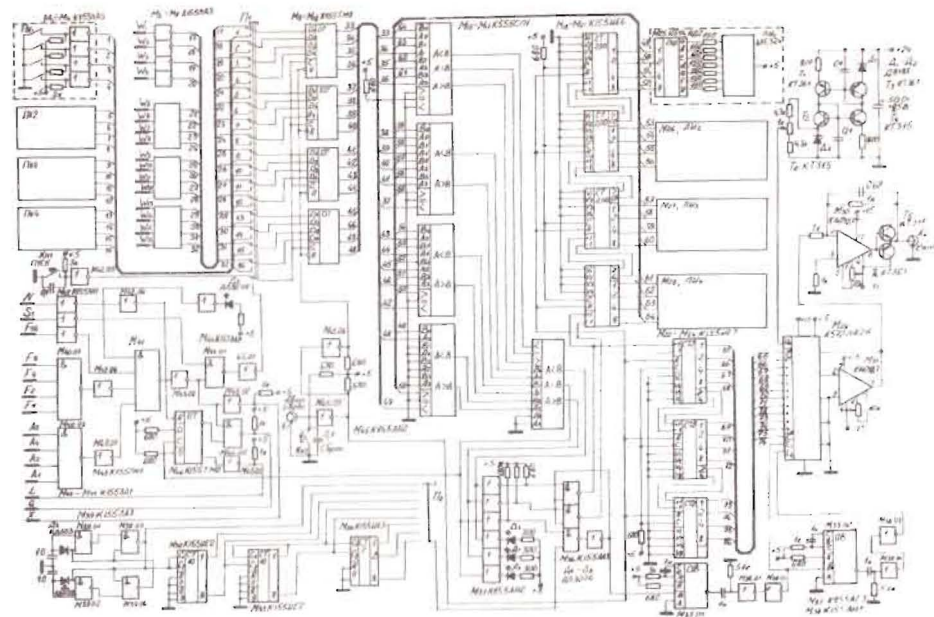


Рис.6. Схема цифрового автоматического интегратора.

ЦАИ (рис.6) обеспечивает опорное напряжение в диапазоне 0+5 В, используя цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с двоичным 12-разрядным входным кодом ($M_{29}, K5721A2A$). Дискретность установки опорного напряжения составляет $\sim 1,25$ мВ, а скорости его изменения равны 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1 А/с.

При работе с ЭВМ управление величиной опорного напряжения происходит следующим образом. По команде NAF и стробимпульсу S_1 цифровой код с шин $W1 \div W16$ записывается в буферный регистр на Д-триггерах (M_9+M_{12}) и сравнивается на цифровом компараторе ($M_{13}+M_{17}$) с цифровым кодом 4-декадного двоично-десятичного реверсивного счетчика ($M_{18}+M_{21}$). На выходах компаратора возникает сигнал равенства или различия кода на буферном регистре - А и на счетчике - В ($A=B, A > B; A < B$). Эти сигналы управляют работой упомянутого выше двоично-десятичного счетчика, имеющего визуальную индикацию на десятичном 4-значном табло ($M_{25}+M_{28}$), а также работой параллельного ему 12-ти - разрядного двоичного реверсивного счетчика, непосредственно связанного с входом ЦАП. Управление осуществляется через устройство на M_{36}, M_{37} , которое обеспечивает запуск счетчиков импульса-

ми от задающего генератора ($M_{39}, M_{32}+M_{34}, P_2$). Поскольку ЦАП имеет два внутренних информационных регистра, запись входных кодов в них идет синхронно со счетными импульсами по сигналам на входах C_1 и C_2 (M_{29}). При этом сигналы на C_1 задержаны на 0,5 мкс относительно счетных, а на C_2 на 0,5 мкс относительно сигналов на C_1 . На выходе ЦАП установлены усилитель на M_{31} и повторитель на M_{30}, T_5, T_6 , которые обеспечивают формирование выходного линейно нарастающего или спадающего опорного напряжения. Скорость изменения этого напряжения устанавливается переключателем P_2 . Стабильность опорного напряжения обеспечивается прецизионным эталонным напряжением с параметрического стабилизатора $1/3$ на $D_{1,2}, T_1+T_4$, поступающего на ЦАП. При завершении операции установки на выходе ЦАП заданного в цифровом коде опорного напряжения сигнал ($A=B$) компаратора вырабатывает с помощью $M_{44}+M_{46}$ на шине L сигнал запроса последующей операции.

Ручное управление ЦАП осуществляется с помощью кодовых переключателей $K_{K1}+K_{K4}$, на которых набирается в десятичной форме код задаваемого опорного напряжения и кнопкой K_{H1} (пуск) заносится в буферный регистр. При этом начинается операция установки заданной величины опорного напряжения. Кнопка K_{H2} (сброс) или сигнал "аварийный сброс" устанавливает нулевое значение опорного напряжения. Переход от ручного режима работы на автоматический производится переключателем P_1 (на плате).

БЛОК ЗАЩИТЫ (БЗ)

Блок защиты (рис.7) обеспечивает детектирование нормальной зоны (НЗ) в обмотке СПС, отключение источника питания от СПС, на котором возникают перенапряжения до ~ 500 В, и эвакуацию запасенной в СПС энергии на внешнее балластное сопротивление (~ 4 Ом).

Детектирование НЗ в обмотке СПС осуществляется с помощью мостовой схемы, образованной полуобмотками СПС и резисторами $R_1 \div R_3$. Мост балансируется по ИП при вводе тока в СПС с помощью R_3 .

Сигнал с диагонали моста усиливается ОУ (M_1) и через интегрирующий элемент R_{10}, C_1 подается на вход компаратора M_2 (K521CA1), который имеет зону нечувствительности в пределах $\pm 1,5$ В для входного сигнала, что соответствует порогу срабатывания защиты при сигнале с датчика НЗ, равном ± 100 мВ. Кроме того, тот же сигнал с ОУ подается на второй компаратор M_3 , зона нечувствительности которого меньше ($\pm 1,3$ В). Этот компаратор раньше срабатывает и запускает мультивибратор M_4 , который запрещает на время длительности его выходного импульса (~ 2 мс) выдачу сигнала с первого компаратора (после M_5, M_6). Такая обработка сигнала по временным и амплитудным характеристикам значительно умень-

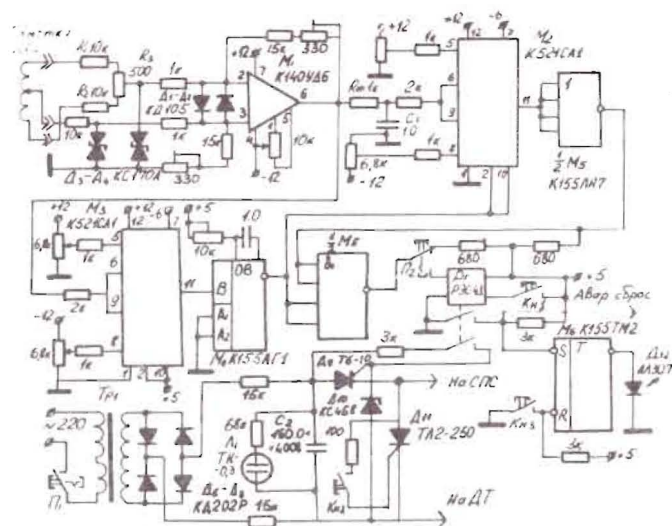


Рис.7. Схема блока защиты СПС.

шает ложные срабатывания системы защиты от внешних помех. Если же сигнал с датчика НЗ превысил уставки по амплитуде и времени, происходит срабатывание реле P_1 , которое выключает тиристорный ключ и генерирует с помощью M_6 импульс аварийного сброса опорного напряжения в БСУ или ЦАП, инициируя начало эвакуации энергии из СПС.

Тиристорный сильноточный ключ D_{11} установлен между СПС и шиной "-" источника питания. Его выключение происходит за счет снижения анодного тока тиристора до нуля, пропуская через D_{11} ток другой полярности от разряда C_2 при включении D_9 контактом реле P_1 . Лампа L_1 индицирует необходимый заряд C_2 до ~ 200 В. Включение тиристора D_{11} осуществляется кнопкой K_{H2} . Ручное выключение D_{11} производится ключом K_{H1} .

КОНСТРУКЦИЯ

Система электрического питания, управления и защиты СМС выполнена в виде двух отдельных блоков: блока сильноточного низковольтного выпрямителя и блока стабилизатора тока с системой защиты. Последний блок выполнен в стандартном крейте КАМАК, что позволило применить в нем модульную конструкцию. Сильноточный тиристорный ключ и датчик тока смонтированы на задней стенке крейта, где расположены и клеммы для подсоединения шин от СПС. Наиболее мощные узлы системы охлаждаются водой. Контроль выходного тока стабилизатора производится

измерением опорного напряжения по внешнему цифровому вольтметру. Блок ЦАИ должен устанавливаться в крейте, связанном с ЭВМ, при автоматическом режиме работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная выше система электрического питания, управления и защиты сверхпроводящего магнитокалибровочного стенда многократно использовалась в сеансах запуска СМС, показала свою эффективность, надежность и удобство в эксплуатации. Этому способствовало применение оригинального датчика тока на основе магнитного компаратора, а также управляемых источников опорного напряжения на основе аналоговых интеграторов. Получены следующие основные характеристики стабилизатора тока:

диапазон выходных токов	0+200 А
долговременная стабильность тока	лучше 0,005%
коэффициент стабилизации	2500
скорость ввода тока	0,1+10 А/с

Система позволит в качестве последующего шага осуществить автоматизацию процесса калибровки соответствующих магнитометров на стенде. Созданный для стабилизатора датчик тока с высокими техническими и метрологическими характеристиками может быть с успехом реализован и в других системах, где, например, используются достаточно быстрые нестационарные режимы работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманова Л.Н., Лачинов В.М., Маковеев В.К., Сабасев А.А. ОИЯИ, Р9-10621, Дубна, 1977.
2. Лачинов В.М., Маковеев В.К., Клоков Н.В., ОИЯИ, Р9-12442, Дубна, 1979.
3. Лачинов В.М., Маковеев В.К., Стариков А.М. ОИЯИ, Р9-12517, Дубна, 1979.
4. Ахманова Л.Н., Лачинов В.М., Саванеев В.П., Стариков А.М., Филин В.П. ОИЯИ, 13-81-806, Дубна, 1981.
5. Саванеев В.П., Лачинов В.М. Авторское свидетельство № 913353 от 15.03.82. МКИ G 05F 1/56. Бюллетень ОИПОТЗ № 10, 1982, с.225.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июля 1985 года.

Внимание организаций и лиц, заинтересованных в получении публикаций Объединенного института ядерных исследований

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.