



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»**

Препринт 2023–1

**А.П. Мещанин**

**Источник питания магнита поляризованной мишени  
ЗШИМ-200М эксперимента СПАСЧАРМ  
ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2023

**Аннотация**

Мещанин А.П. Источник питания магнита поляризованной мишени ЗППМ-200М эксперимента СПАСЧАРМ ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 2023-1. – Протвино, 2023. – 9 с., 5 рис., библиогр. 5.

В работе в деталях рассматривается система питания магнита замороженной протонной поляризованной мишени ЗППМ-200М в эксперименте СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 ИФВЭ, который в будущих спиновых экспериментах дает возможность увеличить размеры рабочего образца мишени до  $\varnothing 20 \times 400$  мм с источником питания её магнита. В нагрузке сопротивлением 0.14 Ом и индуктивностью 20 мГн её источник обеспечивает постоянный ток до 1500 А при коэффициенте пульсаций тока на основной частоте 300 Гц  $\pm 0.01\%$  и с долговременной стабильностью  $\pm 0.01\%$  при рабочем магнитном поле в районе расположения образца мишени 2.4 Т при накачке поляризации протонов и 0.4 Т в режиме удержания поляризации при раздвижки магнитных полюсов до зазора 24 см для охранной системы при наборе физической статистики на пучке.

**Abstract**

Meshchanin A.P. The power source of the magnet of the polarized target of the ZPPM-200M experiment of the SPASCHARM of the acceleration complex U-70 IHEP: Preprint NRC «Kurchatov Institute» - IHEP Preprint 2023-1. – Protvino, 2023. – p. 9, figs. 5, refs.: 5.

The paper considers in detail the complex of a frozen proton polarized ZPPM-200M target in the SPASCHARM experiment at the U-70 IFVE accelerator complex, which in future spin experiments makes it possible to increase the size of the working sample of the target to  $\varnothing 20 \times 400$  mm with its magnet power source. In a load with a resistance of 0.14 Ohm and an inductance of 20 mH, its source provides a constant current of up to 1500 A with a current ripple coefficient at the main frequency of 300 Hz  $\pm 0.01\%$  and with a long-term stability of  $\pm 0.01\%$  with an operating magnetic field in the area of the target sample 2.4 T when pumping proton polarization and 0.4 T in the polarization retention mode at sliding magnetic poles up to a gap of 24 cm for the security system when typing physical statistics on the beam.

## **Введение**

В эксперименте СПАСЧАРМ ИФВЭ [1] по систематическому исследованию поляризационных явлений в области энергий ускорителя У-70 ИФВЭ используется комплекс замороженной протонной поляризованной мишени [2]. Мишенный комплекс состоит из горизонтального криостата, дипольного магнита «ДИНОЗАВР -2.4 Т» с рабочим полем 2.4 Т, системы СВЧ на частоту от 66.17 до 67.17 ГГц, созданного в ИФВЭ тиристорного стабилизированного сильноточного источника на 1500 А с долговременной стабильностью  $\pm$  до 0.01 %, а также электронной системы измерения накачанной поляризации вещества мишени (пентанол с добавкой радикала ТЕМПО).

### **1. Основные характеристики магнита «Динозавр -2.4 Т» поляризованной мишени ЗППМ-200М и требования к его источнику силового питания**

Электромагнит мишенного комплекса ЗППМ-200М ДИНОЗАВР-2.4 Т представляет собой диполь, в котором вертикальное поперечное поле создается током 1440 А с однородностью  $\pm 0.01\%$  величиной 2.4 Т.

Он состоит из двух симметричных автономных магнитных полюсов с обмотками, которые могут раздвигаться на расстояние между ними до 25 см при помощи специального привода (редуктор с электродвигателем мощностью 5 кВт и цепной передачи силовых стоек) с общим передаточным числом 700. В сомкнутом состоянии рабочие размеры зазора апертуры магнита: горизонталь 80 мм и вертикаль 75 мм для аппендикса мишени при длине 100 см. В раздвинутом состоянии вертикальный размер апертуры увеличивается до 25 см между магнитными полюсами, в который вводится аппендикс с рабочим образцом мишени и veto система. Сопротивление обмотки магнита равно 0.14 Ом, индуктивность в сомкнутом состоянии составляет порядка 20 мГн (50 Гц), а в раздвинутом состоянии порядка 10 мГн из-за соотношения магнитных объемов в сдвинутом и раздвинутом состояниях.

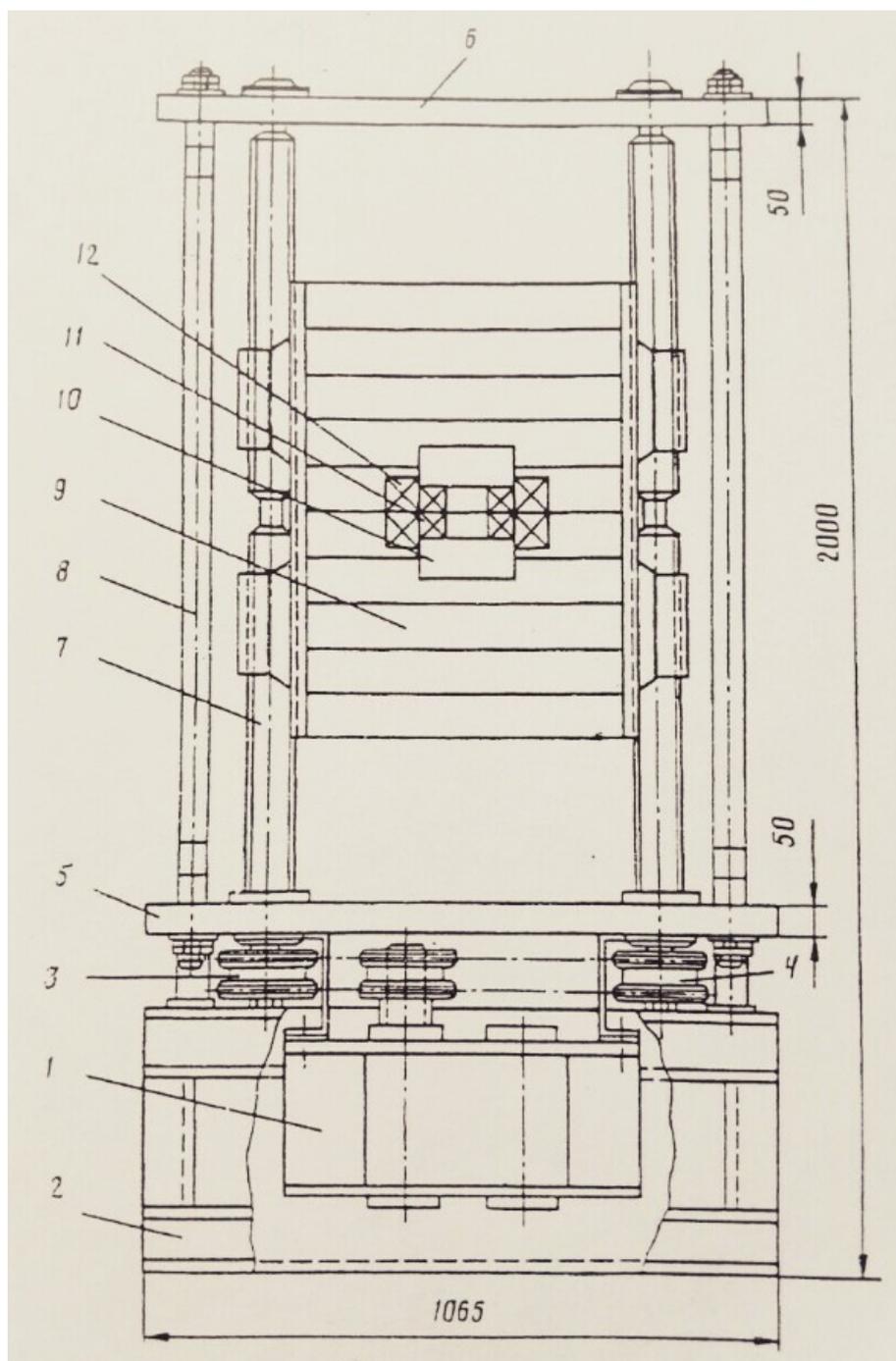


Рис. 1. Конструкция магнита ДИНОЗАВР-2.4 Т с раздвижными магнитопроводами [3]:  
 1 - двухступенчатый редуктор; 2 - подставка; 3,4 - цепная передача; 5, 6 - стальные плиты; 7 - стальные винты с право-левой трапецидальной резьбой; 8 - стойки силовые; 9 - нижний и верхний магнитопроводы; 10 - магнитные полюса (49-КФ); 11 - формирующие обмотки; 12 - основные катушки.

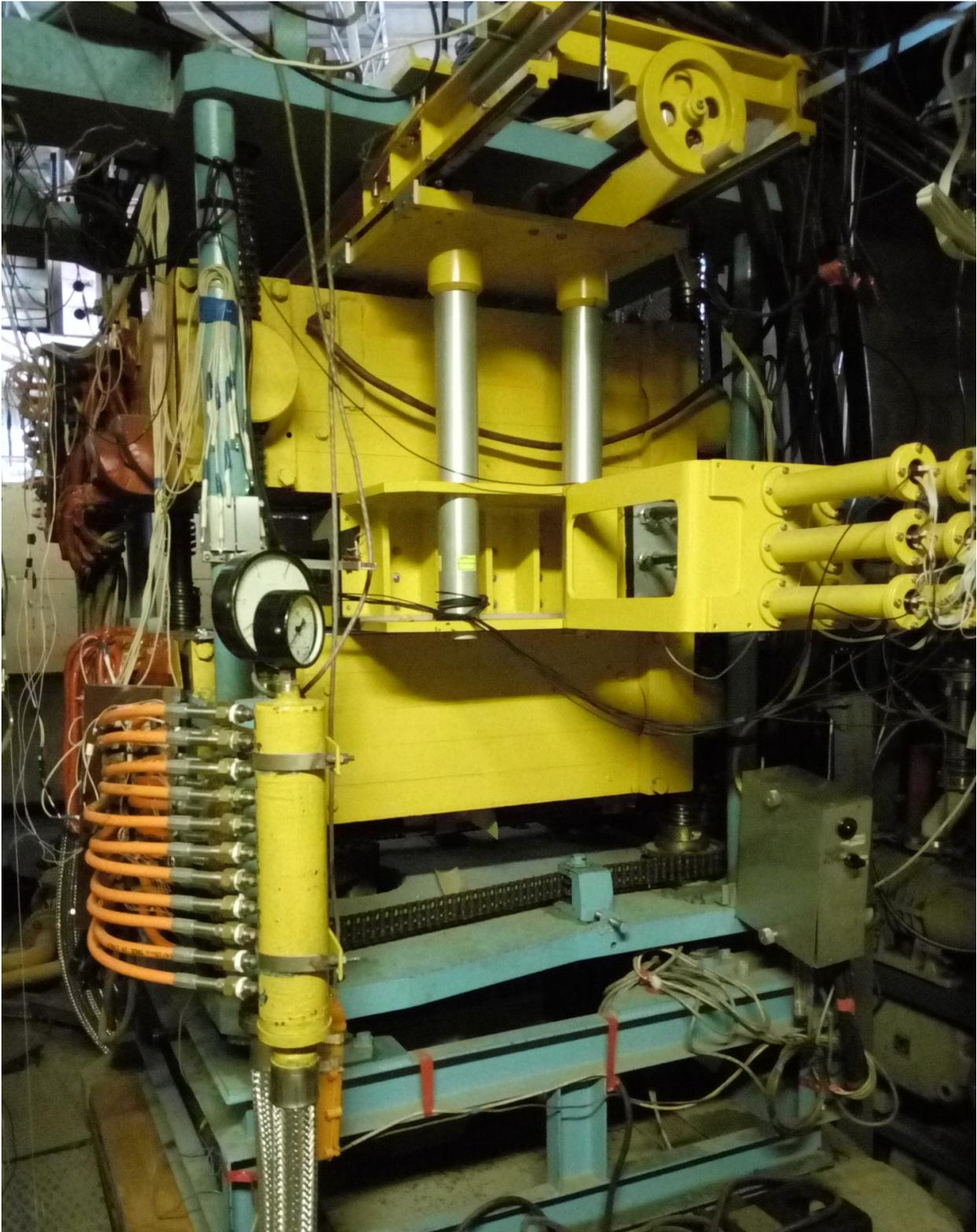


Рис. 2. Общий вид магнита «ДИНОЗАВР-2.4 Т» ЗППМ-200М установки СПАСЧАРМ на канале 14П ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ.

Высокие временно-температурные требования на условия работы криостата мишени и магнита в температурных интервалах криостата комплекса поляризованной мишени ЗППМ-200М потребовали создания специализированного высокостабильного сильноточного источника питания в ИФВЭ. Рассмотрим более детально временно-температурную динамику совместной работы комплекса криостата, источника сильноточного питания и магнита ДИНО-ЗАВР-2.4 Т поляризованной мишени ЗППМ-200М эксперимента СПАСЧАРМ.

**А) Стартовый режим.** Сделана комплексная наладка магнита, магнитные полюса сомкнуты, криостат находится в тёплом состоянии при температуре около 100 мК. Рабочий ток в магните 500 А вводится в быстром режиме из-за особенности работы источника питания. В итоге рабочий интервал магнита по току 500-1440 А. Криостат и магнит готовы к совместной работе.

**Б) Режим накачки поляризации мишени** продолжительностью, обычно, 4-6 часов. В этом режиме магнит сомкнут; величина магнитного поля в его апертуре равна 2,4 Т при токе 1440 А. Ток устанавливается от 500 А шагами по 100 А с временным интервалом 2 мин., что исключает возможность перегрева криостата. При токе 500 А поле в магните 0,65 Т, т.е. на шунте магнита по ЦВ (цифровой вольтметр) должно быть 1950 мВ. Рабочее вещество мишени при этом находится при температуре около 100 мК. В этом режиме предъявляются очень высокие требования к геометрической однородности и временной стабильности поля в цилиндрической рабочей области образца мишени длиной 20 см и диаметром 2 см. Соответственно, это требование накладывает жёсткие условия, как на пульсации поля (не более 0.01%), так и на долговременную его стабильность в течение накачки поляризации.

**В) По окончании накачки поляризации** температура мишени сначала снижается до 30 мК в течение 15 минут, а потом рабочее поле в апертуре магнита уменьшается от 2.4 Т до 0.65 Т шагами по току 100 А с интервалом 2 минуты. При этом на шунте магнита должно быть около 1950 мВ (0.65 Т). Затем выполняется раздвижка полюсов магнита до расстояния 25 см с постепенным повышением тока с шагом 100 А до 1440 А, чтобы в полностью раздвинутом состоянии величина поля в рабочей области составляла около 0.4 Т (1200 мВ), но не менее 0,28 Т. Продолжительность этой фазы варьируется в пределах 10-15 минут. Также следует отметить, что при сдвижке (раздвижке) магнита из-за производительности криостата 100 Эрг/с и силе разрыва цепи 6 т было принято решение сделать шаг по току 100 А.

**Г) Мишень находится в замороженном состоянии** при температуре около 30 мК, магнит в раздвинутом состоянии 25 см при токе 1440 А. Величина магнитного поля мишени

равна 0,4 Т. Набор экспериментальных данных на установке обычно продолжается до 2 суток. Во всех режимах величина пульсаций поля ограничивается также допустимой тепловой нагрузкой от токов Фуко на камеру растворения рефрижератора. При рабочих температурах 30 мК она не должна превышать 100 Эрг/с (100 мкВт). Оценки показывают, что на частоте 300 Гц, которая является основной в спектре 6-пульсных источников питания, это соответствует ограничению на амплитуде пульсаций поля 0,25 мТ в режиме накачки поляризации, а это накладывает требование на относительные пульсации тока меньше 0.025%.

## **2. О конструкции сильноточного стабилизированного источника питания поляризованной мишени ЗППМ-200М**

Для возбуждения поля магнита разработан источник питания типа ТП (28ТП2) (Ином.= 1500 А, Уном. = 215 В) [4]. Источник, изготовленный полностью в ИФВЭ, был введен в эксплуатацию на эксперименте СПАСЧАРМ в 2012 г.

Многие проблемы создания источника питания типа 28ТП2 рассмотрены в деталях в работе В. П. Даньшина и др. [4], но для магнитов с индукцией более 20 мГн и без каких-либо временных изменений их индуктивности. Этот вариант часто имел самопроизвольное отключение, что крайне опасно для работы криостата мишени (вскипание его и др.). Далее появился второй рабочий вариант с двумя модами работы - ручное и компьютерное управление источником. Но еще требуется быстрый ручной вывод магнита при его включении на ток 500 А, иначе произойдет аварийное отключение источника. Это тоже крайне опасно для криостата мишени, но на пределе выделяемой мощности ещё допустимо. Итак, мы используем источник 28ТП2 во второй моде работы. Далее дается его описание.

**Силовая схема источника приведена на Рис. 3.** и включает в себя следующие узлы: высоковольтный масляный выключатель (МВ), понижающий трансформатор (Тр) типа ТСЗП 630/6/0,205, блок защиты от перенапряжений (БЗП), тиристорный выпрямитель (ТВ) с нулевым диодом (VD0), пассивный фильтр (Lф1, Lф2, Cф1, Cф2, Cф3, Cф4, Rф1, Rф2, Rф3, Rф4), переключающий пункт (ПрП), подключающий пункт (ПП).

Блок защиты от перенапряжений защищает от перенапряжений, приходящих из питающей преобразователь силовой цепи, а также возникающих при коммутациях питающего силового трансформатора.

Выпрямитель источника 28ТП2 выполнен на тиристорах, включенных в трёхфазную симметричную мостовую схему. Для охлаждения тиристоров применены модули водяного

охлаждения SS15BL. Нулевой диод предназначен для защиты электромагнита и тиристоров от перенапряжений при снятии тока, а также для предотвращения появления напряжения обратной полярности на конденсаторах пассивного фильтра. Применение нулевого диода в трёхфазной симметричной мостовой схеме даёт улучшение коммутации вентилях, т.к. при глубоком регулировании разряд индуктивности магнита происходит через шунтирующую цепь.

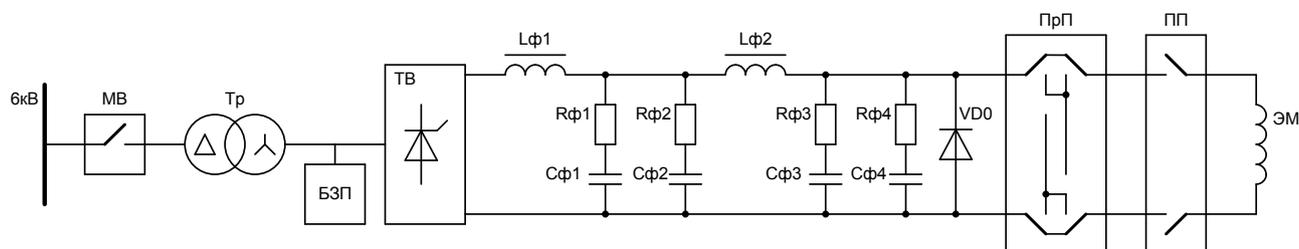
Для подавления пульсаций выпрямленного напряжения применён пассивный двухзвенный Г-образный LC фильтр. Коэффициент подавления напряжения фильтра на частоте основной пульсации 300 Гц около 10. При необходимости, можно увеличить коэффициент подавления фильтра за счёт изменения параметров его компонентов (сопротивлений  $R_{\phi 2}$  и  $R_{\phi 4}$ ). Переключающий пункт обеспечивает возможность резервирования источников питания в группе.

Подключающий пункт подключает магнит к источнику питания.

**Блок-схема системы стабилизации тока приведена на Рис. 4.** Исходя из специфических особенностей характера действующих на систему возмущений, которые можно условно разделить на высокочастотные колебания питающей сети и низкочастотные – прогрев нагрузки, структура системы стабилизации выбрана двухконтурной с добавлением пассивного фильтра для подавления пульсаций. Это привело к возможности разделения системы на быстродействующий контур стабилизации напряжения и контур медленного действия – контур тока, что позволяет получить высокую степень стабилизации (до  $\pm 0,01\%$ ) при сравнительно простой коррекции.

Система защиты электромагнита обеспечивает защиту от превышения номинального тока, прекращения протока охлаждающей воды, перегрева охлаждающей воды.

а)



б)

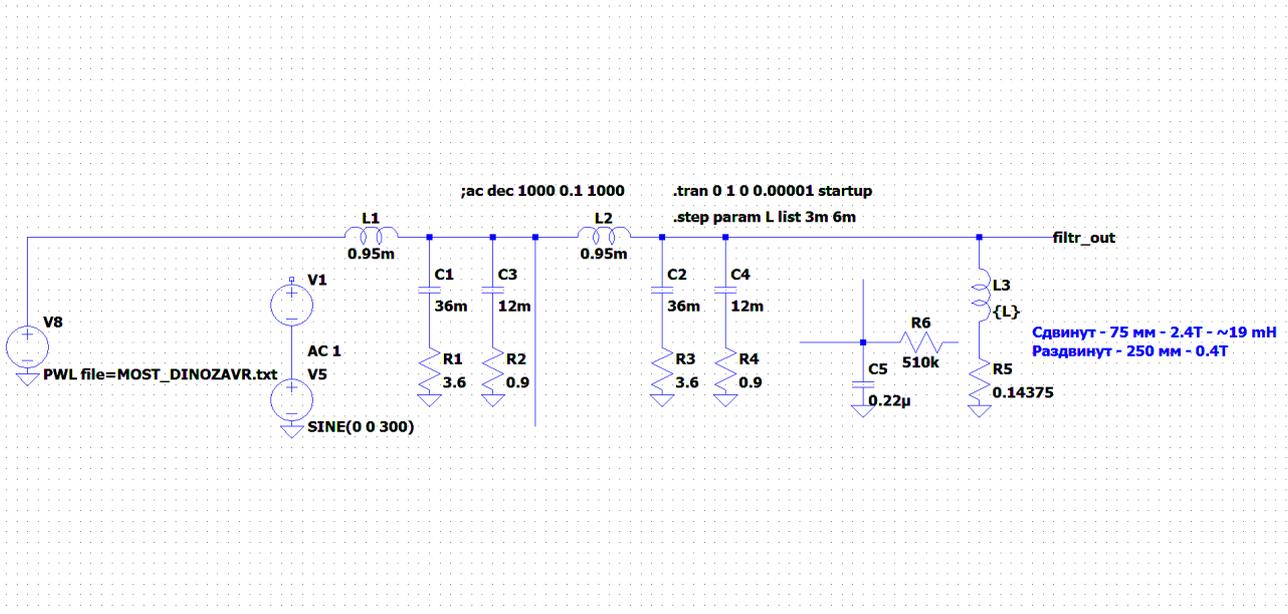


Рис. 3. а) силовая схема источника 28ТП2 ; б) параметры фильтра.

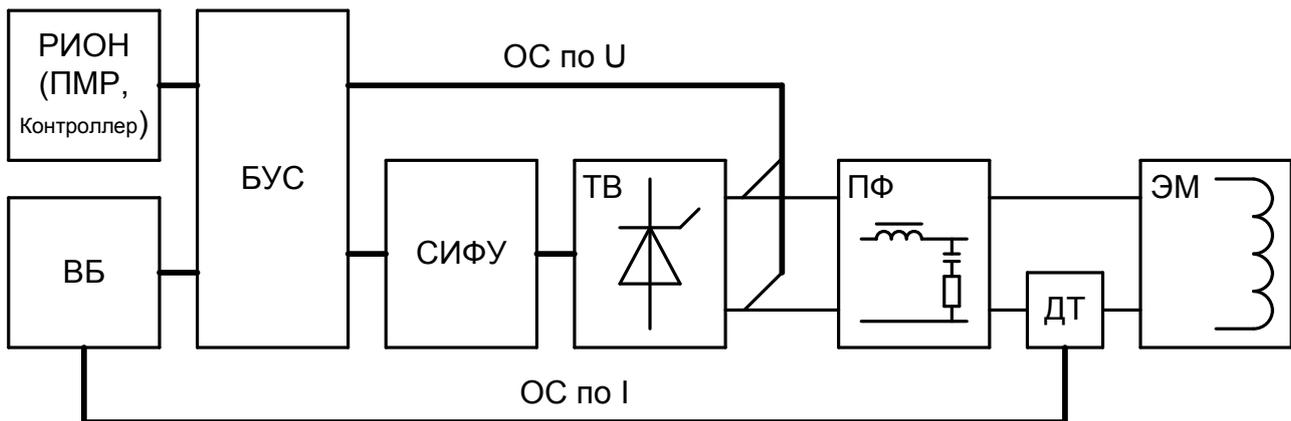


Рис. 4. Блок-схема системы стабилизации тока: РИОН – регулируемый источник опорного напряжения (ПМР – потенциометр монотонного регулирования, контроллер вырабатывает опорное напряжение по командам от ЭВМ), ВБ – входной блок, БУС – блок усиления и сложения, СИФУ – система импульсно-фазового управления, ТВ – тиристорный выпрямитель, ПФ – пассивный фильтр, ДТ – датчик тока (измерительный трансформатор постоянного тока), ЭМ – электромагнит.

### 3. Экспериментальные результаты

В эксперименте СПАСЧАРМ для накачки протонной поляризации мишени при температуре рабочего образца порядка 100 мК рабочее магнитное поле было выбрано 2.4 Т, при

рабочем токе 1440 А (см. рис. 5), напряжении на обмотке порядка 200 В при потребляемой мощности 300 кВт. Эти параметры системы источник-криостат определяются рабочим веществом мишени (пентанол с добавкой радикала ТЕМПО), перепадом водяного давления в системе охлаждения 21 атм., качеством магнитных свойств конструкции магнита и особенно магнитных свойств полюсов из пермендюра 49КФ. В раздвинутом на 24 см состоянии магнитных полюсов при токе 1440 А величина поля, удерживающего поляризацию мишени в объеме образца  $\phi 20 \times 200$  мм, составляет 0.4 Т при его неоднородности  $\pm 0.5\%$  и температуре рабочего образца мишени 30 мК, при развале протонной поляризации мишени более 500 часов. Проведенные исследования комплекса поляризованной мишени ЗППМ-200М на пучке частиц в физических сеансах показали, что разработанный и изготовленный в ИФВЭ источник высокостабильного питания обеспечивает долговременную работу криостата поляризованной мишени при его очень сложной временной термодинамической эволюции на ускорительном комплексе У-70 ИФВЭ. После получасового прогрева магнит хорошо стабилизировался, и его долговременная стабильность была лучше чем  $\pm 0.01\%$  по измерениям напряжения на шунте магнита (75 мВ и 1500 А) при помощи ЦВ.

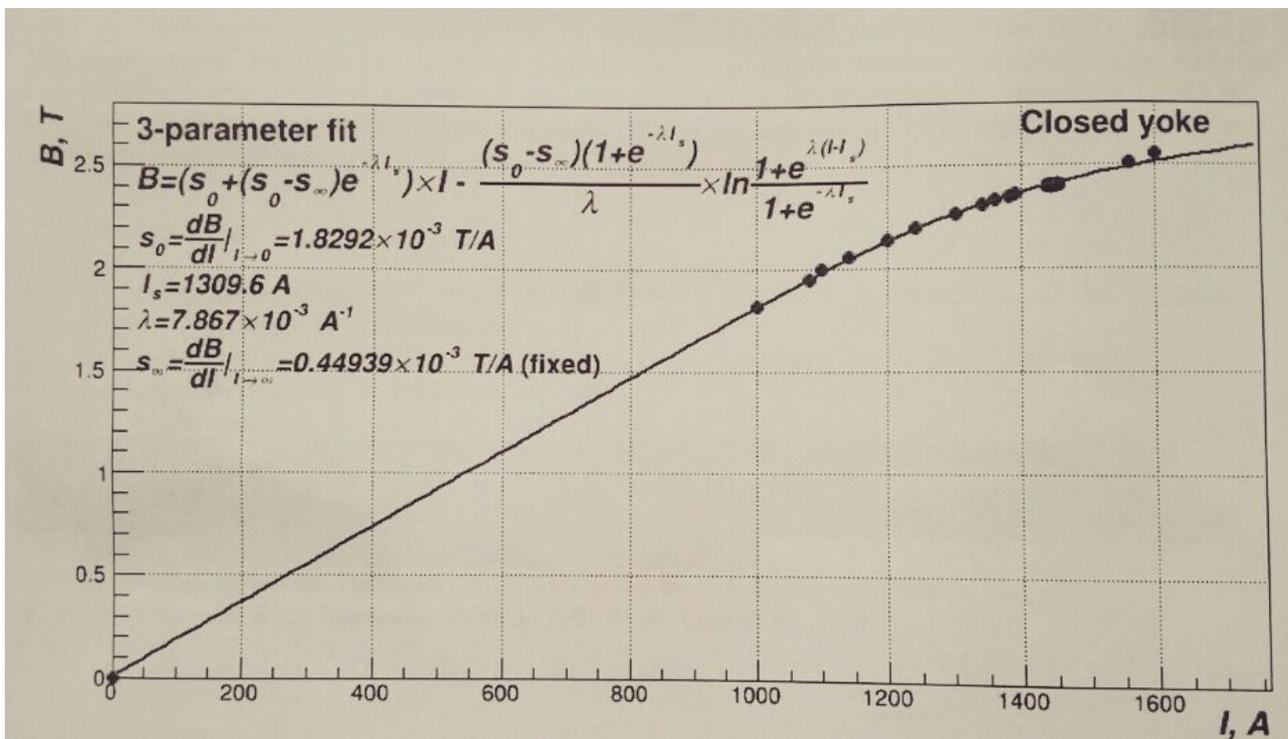


Рис. 5. Зависимость индукции В(І) в центре магнита «ДИНОЗАВР-2.4 Т» от тока питания при сомкнутых магнитных полюсах.

## Заключение

На последующее десятилетие планируется использование разработанного высоковольтного источника питания в ИФВЭ в поляризованной мишени ЗППМ-200М в продолжающейся программе эксперимента СПАСЧАРМ по изучению спиновых эффектов на ускорительном комплексе У-70 ИФВЭ. Также на его базе имеется в перспективе возможность создать новый более универсальный магнитный комплекс для замороженной протонной поляризованной мишени с поперечной и продольной поляризацией протонов в будущих спиновых экспериментах, который будет в несколько раз дешевле в производстве, экономии электроэнергии и техобслуживании в физических сеансах на ускорительном комплексе У-70 ИФВЭ, чем сверхпроводящая аналогичная система [5]. Коллектив лаборатории поляризационных исследований ОЭФ выражает признательность сотруднику ОЭУ У-70 С.А. Семину за разработку и качественную настройку описанного источника питания поляризованной мишени ЗППМ-200М в условиях ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ.

## Список литературы

- [1] В.В. Абрамов и др., 2019 – 12 ИФВЭ
- [2] Н.С. Борисов и др., ПТЭ 21 (1978) 299-308.
- [3] О.А. Грачев и др., ПТЭ , №3, 1993 с. 189.
- [4] В.П. Даньшин и др., Препринт ИФВЭ ОСИИП 80-108, Серпухов, 1980.
- [5] К. Брюнетон и др., ЯФ, 23 (1976) 769.

*Рукопись поступила 27 января 2023 г.*

Мещанин А.П.

Источник питания магнита поляризованной мишени ЗППМ-200М эксперимента СПАСЧАРМ ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 31.01.2023	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л. 0, 9. Уч.– изд.л. 1.	Тираж 60.	Заказ 2. Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

