

34

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер,
С.З.Любецкий, С.П.Петров,
В.Г.Попов, А.Е.Рефес

**СИЛОВОЕ ПИТАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП - 4**

ПРЕПРИНТ И ЯФ 78 - 72

Новосибирск

Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер,
С.З.Любецкий, С.П.Петров, В.Г.Попов, А.Е.Рефес

СИЛОВОЕ ПИТАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
НАКОПИТЕЛЯ ВЭШ-4

АННОТАЦИЯ

Для обеспечения силового питания магнитов кольца ВЭШ-4 разработан и изготовлен комплекс прецизионных стабилизаторов тока мощностью от 5 кВт до 5 МВт с выходным током от 50 А до 8 кА. Долговременная нестабильность тока 0,005%, уровень пульсаций 0,01%, возможность плавной перестройки в широком диапазоне с переменной знака достигнута благодаря использованию прецизионных гальванически развязанных измерителей тока, применению широкополосных трансформаторных активных фильтров, а также усовершенствованной асинхронной системы управления тиристорами. Моделирование на ЭВМ электрических процессов в стабилизаторах позволило оптимизировать параметры разветвленных нелинейных контуров авторегулирования. На электротехническом заводе им.Калнина (г.Таллин) выпущены опытные партии и готовится серийное производство некоторых из упомянутых выше стабилизаторов тока (серия ИСТР).

СИЛОВОЕ ПИТАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНОЙ
СИСТЕМЫ НАКОПИТЕЛЯ ВЭШ-4

Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер,
С.З.Любецкий, С.П.Петров, В.Г.Попов, А.Е.Рефес

Институт ядерной физики СО АН СССР

Основная магнитная структура накопительного кольца ВЭШ-4 [1] содержит два полукольца со средним радиусом 45,5 м, соединенных двумя длинными промежутками. В одном из них длиной 40 м размещены четыре дублета квадрупольных линз. В другом — длиной около 55 м, размещены 15 квадрупольных линз, магнитный детектор МД-1, специальные линзы, дополнительные поворотные магниты и затухатель. Более подробные характеристики электромагнитов приведены в таблице № 1. Кроме этого, в магнитной структуре имеется некоторое количество корректирующих магнитов, секступольных и октупольных линз.

Таблица № 1

№ Ш	Наименование элемента	$I_{\text{ном}}$ (кА)	$P_{\text{ном}}$ (кВт)	τ (с)	Источник питания
1	2	3	4	5	6
1.	Магниты полуколец	7,8	350	1,0	ГЩ-1650-250
2.	Ф-коррекция полуколец	1,8	200	0,03	ИСТР-2500/115
3.	Д-коррекция полуколец	0,6	25	0,03	ИСТР-2500/48
4.	Линзы Ф(П-2, П-4, П-6, П-8)	0,56	20	0,05	"
5.	Линзы Д(П-1, П-3, П-5, П-7)	0,56	20	0,05	"
6.	Магнитный детектор МД-1	7	3800	6	ГПС-6300-500
7.	Дополнительные магниты ДМ-1, ДМ-2	1,83	100x2	0,3	ИСТР-2500/115
8.	Специальные линзы (У-7, У-8)	1,2	23x2	1,0	ИСТР-2500/48
9.	Специальные линзы (У-6, У-9)	1,8	23x2	0,4	"

1	2	3	4	5	6
10. Линзы (IY-5, IY-10)	0,83	10 x 2	0,5	ИСТР-2500/48	
11. Линзы (IY-4, IY-11)	1,1	20 x 2	0,4	"	
12. Линзы (IY-3, IY-12)	0,82	12 x 2	0,6	"	
13. Линзы (IY-14, IY-15)	1,1	16 x 2	0,45	"	
14. Линза (IY-1)	0,4	3	0,5	ШИМ	
15. Линза (IY-2)	0,98	16	0,5	ИСТР-2500/48	
16. Линза (IY-13)	1	25	1,0	"	
17. Затухатель	2,4	110	0,3	ИСТР-2500/115	
18. Доворотный магнит (IY-M)	2,3	25	0,25	ИСТР-2500/48	
19. Магниты поворотные МД-1, МД-2	2,3	110	0,3	"	

Долговременная нестабильность токов в обмотках электромагнитов основной магнитной структуры определяется требованиями устойчивого движения частиц, допустимыми искажениями орбиты и магнитной структуры, а также условиями проведения планируемых экспериментов на накопителе и не должна превышать $1 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-5}$ при уровне пульсаций не более $1 \cdot 10^{-4}$ в частотном диапазоне до 25 кГц. При подъеме энергии частиц от инжекции (1,8 ГэВ) до энергии эксперимента (7 ГэВ) отклонение от пропорциональности между токами электромагнитов и квадрупольных линз по вышеприведенным причинам не должно превышать $1 \cdot 10^{-4}$.

Блок-схема системы силового питания электромагнитов ВЭПП-4 представляет 26 отдельных систем стабилизации тока. В качестве источников питания используются электромашинные генераторы, тиристорные преобразователи и преобразователи с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Управление уровнем тока в системах стабилизации осуществляется при помощи шестнадцатиразрядных цифро-аналоговых преобразователей ЦАП-ШИМ с индивидуальными опорными источниками напряжения. Для формирования заданного закона изменения выходного напряжения ЦАП-ШИМ во времени введена линейная аппроксимация при помощи программно-управляемого интерполятора 2. Цикл обращения ЭВМ к системе составляет 200 мсек. Состояние систем стабилизации тока и контроль рабочих параметров (ток, напряжение) осуществляется через релейный управляющий регистр и коммутатор с цифровым вольтметром Ш-1516 на алфавитно-цифровой дисплей "Видеотон" или печатающее устройство DZM-180. С помощью графического дисплея имеется возможность анализировать переход-

ные процессы в системах.

Системы стабилизированного питания электромагнитов полуколец (соединенных последовательно) и обмоток магнитного детектора построены по блок-схеме, ставшей в ИЯФ СО АН СССР стандартной [3].

Схема показана на рис.1. Источником тока в такой схеме служит электромашинный генератор (типа ГПН-1650-250 - для полуколец и ГПС-6300-500 - для магнитного детектора). Схема имеет два контура стабилизации. Контур стабилизации напряжения содержит масштабный усилитель МУ, усилитель сигнала ошибки УСО-2, усилитель мощности для питания обмотки возбуждения УМ-1 и усилитель мощности цепи подавления пульсаций (активный фильтр) УМ-2. Опорным напряжением контура стабилизации напряжения служит выход усилителя сигнала ошибки контура стабилизации тока УСО-1. Контур стабилизации тока содержит бесконтактный измеритель тока БИТ, усилитель сигнала ошибки УСО-1 и корректирующую цепь К1. Опорное напряжение, задающее ток электромагнита, вырабатывает цифро-аналоговый преобразователь ЦАП-ШИМ.

В описанных системах стабилизированного питания применены разработанные в ИЯФ СО АН СССР бесконтактные измерители тока (до 10 кА) отличающиеся высокой точностью (погрешность измерения менее $1 \cdot 10^{-5}$) и, в отличие от шунтов, не потребляющие мощности из силовой цепи. Бесконтактные измерители тока обеспечивают также электрическую развязку измерительных и силовых цепей. Краткое описание этих измерителей приведено ниже.

Для питания электромагнитов с потребляемой мощностью до 120 кВт и максимальным током до 2,5 кА ИЯФ СО АН СССР совместно с ТЭЗ им.Калинина был разработан источник стабилизированного тока ИСТР-2500/48-2У4. Этот источник входит в состав предполагаемого к серийному выпуску ряда ИСТРов с выходным напряжением от 12 В до 460 В и выходным током от 200 А до 10 кА.

Блок-схема источника приведена на рис.2а. Силовая часть источника - двенадцатифазный выпрямитель В, образованный двумя силовыми трансформаторами Трс с системой обмоток обеспечивающей сдвиг фаз во вторичной цепи относительно сетевого напряжения на $\pm 15^\circ$, двумя шести фазными тиристорными мостами и уравнивающим реактором. Выходное напряжение выпрямителя регулируется от 0 до U_{max} (с возможностью реверса) асинхронной системой управления тиристорами СУТ. Асинхронная СУТ [4] позволяет получить достаточно малое содержание гармоник в выходном напряжении выпрямителя с частотами $f_k = f_0 \cdot k$ (где f_0 - частота сети, $k=1,2,\dots$) при наличии возмущений в питающей сети и

асимметрии силовой части выпрямителя. Напряжение на выходе выпрямителя предварительно фильтруется пассивным LC фильтром. Фильтр частично демпфирован, амплитуда резонанса составляет 3 дБ. Параметры фильтра рассчитаны таким образом, чтобы резонансная частота не совпала ни с одной субгармонической частотой. Ослабление основной частоты пульсаций выпрямителя (600 Гц) составляет 26 дБ. Величина индуктивности фильтра составляет 30 мкГн, суммарная емкость конденсаторной батареи 0,1 ф. Батарея собрана из электролитических конденсаторов, включенных встречно, что обеспечивает работу фильтра при реверсе выходного напряжения выпрямителя. Суммарная величина пульсаций после LC фильтра в диапазоне 50–600 Гц составляет не более 3 В и мало зависит от величины постоянного напряжения на выходе выпрямителя.

Чтобы обеспечить нестабильность тока электромагнита (с учетом его постоянной времени) не более $1 \cdot 10^{-4}$ переменная составляющая напряжения после LC фильтра должна быть дополнительно уменьшена в 100 раз. В указанном диапазоне частот пульсаций достигнуть такой фильтрации при помощи одного пассивного фильтра затруднительно.

С целью дальнейшего ослабления пульсаций и стабилизации быстрых изменений напряжение сети после пассивного фильтра введен активный фильтр, т.е. широкополосный канал усиления, включенный параллельно тиристорному источнику. Активный фильтр представляет собой двухтактный транзисторный усилитель ТУ с пиковой выходной мощностью около 1,5 кВА. Вторичная обмотка выходного трансформатора усилителя включена последовательно с нагрузкой, таким образом, выходные напряжения выпрямителя (после пассивного фильтра) и активного фильтра суммируются. Частотная характеристика активного фильтра приведена на рис.2б.

Блок-схема стабилизированного источника тока ИСТР2500/48–2У4 содержит два контура регулирования: по напряжению и по току, и в этом она аналогична схемам электромашинных источников, описанных выше.

Контур стабилизации напряжения включает выпрямитель с СУТ и фильтром, активный фильтр, масштабный усилитель МУ, усилитель сигнала ошибки УСО–2 и цепь коррекции К2. Полное усиление этого контура на нулевой частоте – около 120 дБ и 40 дБ в диапазоне частот 50–600 Гц. Частотная характеристика разомкнутого контура приведена на рис.2в.

Контур стабилизации тока содержит бесконтактный измеритель тока БИТ, усилитель сигнала ошибки УСО–1. В него входит также нагрузка (электромагнит) и тиристорный источник с контуром стабилизации напряжения. Усилитель УСО–1 имеет усиление на нулевой частоте ≈ 120 дБ, постоянная времени корректирующей RC цепи $\approx 1 \cdot 10^{-2}$ сек. Постоянная времени нагрузки порядка 0,1 + 0,2 сек и более. Частотная характеристика разомкнутого контура стабилизации тока показана на рис.2г.

Для проведения работ по наладке комплекса ВЭШ–4, проводке и накоплению электронного пучка были разработаны и изготовлены стабилизаторы тока с широтно-импульсной модуляцией ШИМ, обеспечивающие питание электромагнитов прямолинейных промежутков и Ф и Д коррекций в магнитах полуколец из энергии инъекции. Мощность, потребляемая указанными электромагнитами в этом режиме не превышает 8 кВт при максимальном токе до 800 А.

Блок-схема стабилизаторов изображена на рис.3а. Силовая часть стабилизатора представляет собой широтно-импульсный преобразователь. Напряжение сети 380/220 В выпрямляется бестрансформаторным выпрямителем В. Выпрямленное и частично отфильтрованное напряжение поступает на два тиристорных инвертора ТИ, работающих на частоте около 1000 Гц. Выходное напряжение одного из инверторов может менять свою фазу относительно другого в пределах $0^\circ + 180^\circ$ пропорционально сигналу, поступающему на вход блока управления БУ.

Выходные напряжения инверторов суммируются на понижающем трансформаторе, результирующее напряжение выпрямляется низковольтным выпрямителем НВ и фильтруется LC фильтром. Такой способ регулирования по сравнению с управляемым тиристорным выпрямлением позволяет существенно уменьшить габариты силового трансформатора и LC фильтра т.к. трансформатор работает на частоте 1000 Гц, а пульсации на выходе низковольтного выпрямителя имеют удвоенную частоту – 2000 Гц.

Быстродействие ШИМ-преобразователя на частоте 1000 Гц позволяет эффективно компенсировать броски напряжения в сети и пульсации сетевого выпрямителя на частотах до 300 Гц. Это дает возможность обеспечить нестабильность тока электромагнита лучше $1 \cdot 10^{-4}$ без применения активного широкополосного фильтра.

Выходной ток ШИМ-преобразователя измеряется бесконтактным измерителем тока, затем сигнал БИТа сравнивается с опорным напряжением, усиливается усилителем сигнала ошибки УСО–1 и после корректирования подается на вход БУ ШИМ-преобразователя. В блок-схеме стабилизатора

имеется также дополнительная обратная связь по напряжению, позволяющая достичь необходимого быстродействия контура регулирования. Амплитудно-частотная характеристика контура обратной связи по напряжению и контура обратной связи по току приведены на рис.3б.

Во всех рассматриваемых в данной работе стабилизаторах прецизионное изменение тока производится при помощи бесконтактных измерителей тока БИТ. В БИТ использован принцип магнитно-модуляционного датчика на второй гармонике. В ферромагнитных кольцах модулятора суммируется постоянный магнитный поток, определяемый измеряемым током и переменный магнитный поток, возбуждаемый от генератора через специальные обмотки. Так как магнитные характеристики материала колец симметрично нелинейны, в выходных обмотках модулятора наводятся четные гармоники возбуждающего напряжения, на малом сигнале пропорциональные постоянному магнитному потоку. Вторая гармоника сигнала выделяется, детектируется и после усиления подается в компенсирующую обмотку, намотанную таким образом, чтобы результирующий постоянный магнитный поток стремился к нулю. Таким образом, в компенсирующей обмотке протекает ток, пропорциональный измеряемому току. Этот ток измеряется при помощи манганинового шунта, помещенного в термостат. Отношение измеряемого и компенсирующего токов равно количеству витков в компенсирующей обмотке, т.к. измеряемый ток протекает по одному витку.

Погрешность преобразования первичного тока во вторичное напряжение определяется в основном двумя факторами – температурным дрейфом нуля $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ А/С и температурной нестабильностью измерительного шунта $\approx 1 \cdot 10^{-5}$ /°С. Коэффициент трансформации на постоянном токе сохраняется с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ благодаря большому усилению в цепи компенсации $\approx 3 \cdot 10^5$. Внешние магнитные поля величиной до 20 э не влияют на работу измерителя. Полоса пропускания определяется наличием индуктивной связи измеряемой и выходной цепей и достигает 10 кГц.

Все описанные стабилизаторы ввиду высоких требований к их параметрам являются сложными системами автоматического регулирования. Особенно это относится к ИСТР-2500/48-2У4, система регулирования которого содержит большое количество нелинейных и импульсных элементов. Недостаточность традиционного линейного анализа таких систем обусловила необходимость их математического моделирования. Имеющиеся ранее [5] и разработанные вновь программы расчета и построения логарифмических амплитудно-частотных характеристик систем, программы, моделирующие импульсные системы управления тиристорами, отдельные нелинейные звенья, усилители и т.д. позволили анализировать частотные характеристики и переходные процессы в отдельных элементах и системах в целом. При разработке и наладке стабилизаторов это существенно облегчило определение оптимальных параметров отдельных звеньев и оптимизацию системы в целом.

Результаты испытаний показали, что системы стабилизации на базе электромашинного генератора и ШИМ имеют долговременную нестабильность тока при непрерывной 3-х суточной работе на энергии инжекции пучка 1,8 ГэВ в зависимости от источника питания не более $1 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-5}$. Испытания источника питания ИСТР-2500/48-2У4 показали, что долговременная нестабильность не более $5 \cdot 10^{-5}$. Уровень пульсаций, характерных для рассматриваемых источников не превосходит $1 \cdot 10^{-4}$.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам ТЭЗ им.Калинина З.С.Иоспа, В.А.Мицкевичу, Я.А.Тарсу за оказание помощи в разработке и изготовлении на заводе опытной партии ИСТР-2500/48-2У4, а также сотрудникам ИЯФ В.П.Приходько, А.С.Шведову и многим другим оказавшим значительную помощь в организации и проведении пуско-наладочных работ на источниках.

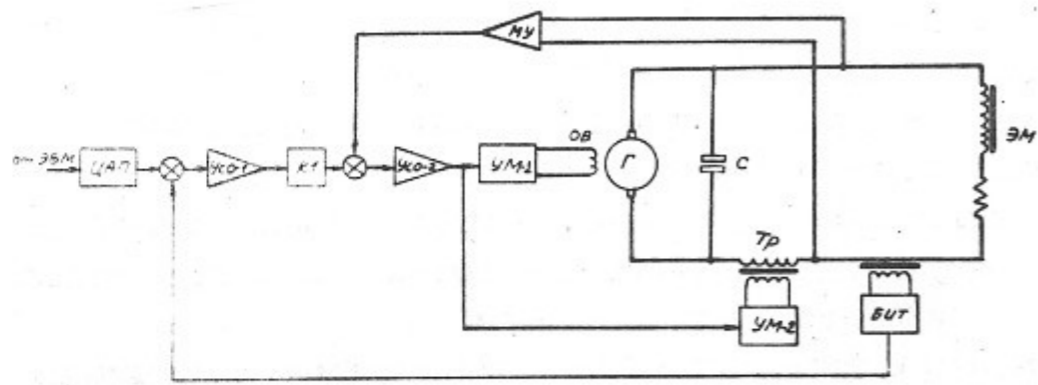


Рис.1 Блок-схема системы стабилизации тока поворотных магнитов и магнитного детектора.

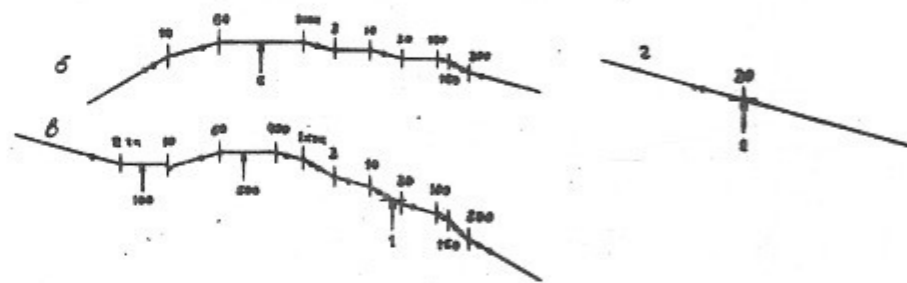
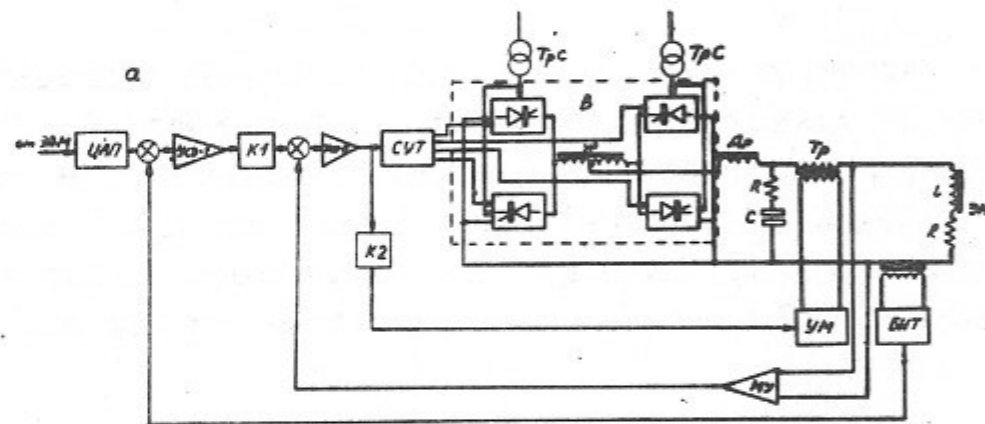


Рис.2 Источник стабилизированного тока ИСТР-2500/48

- а) блок-схема
- б) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) активного фильтра
- в) АЧХ контура стабилизации напряжения
- г) АЧХ контура стабилизации тока

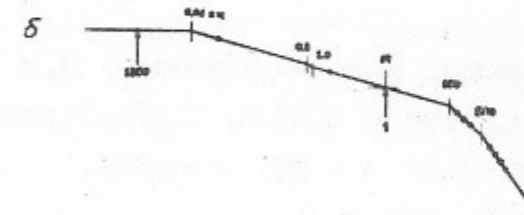
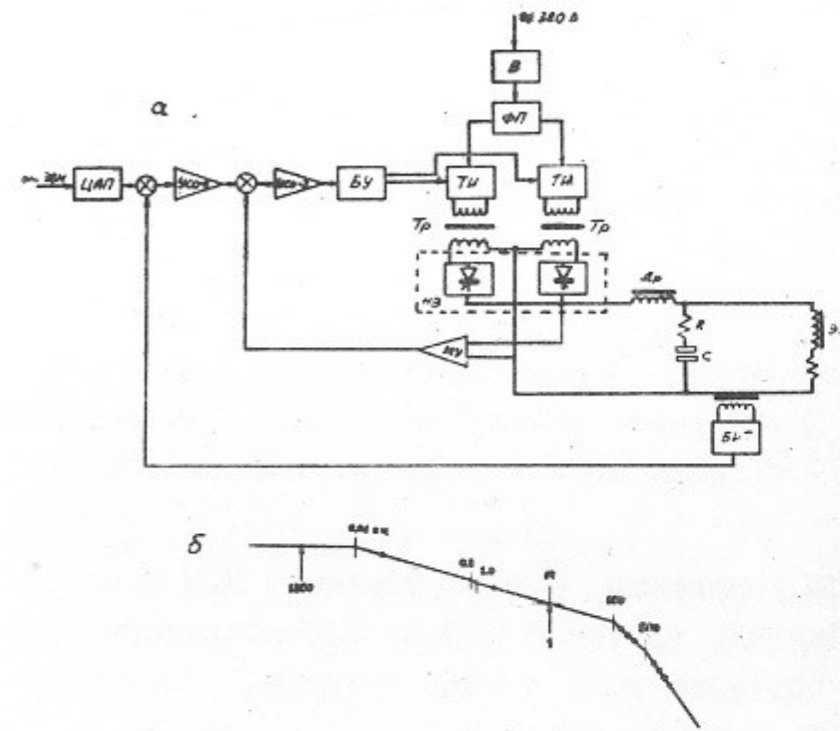


Рис.3 Стабилизатор тока ИИМ

- а) блок-схема
- б) АЧХ контура стабилизации тока

Л и т е р а т у р а

1. А.Н.Скринский Электрон-позитронные накопители института ядерной физики (Новосибирск). Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 5-7 октября 1976 г. т. II стр.327-337. "Наука", 1977г., Москва.
2. С.Д.Белов, Б.А.Гудков, М.М.Карлинер, Э.А.Купер и др. Структура системы автоматизированного управления и контроля накопителя ВЭШ-4. Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 5-7 октября 1976г. т. II. стр.291-294 "Наука", 1977г. Москва.
3. Б.А.Баклаков, В.М.Боровиков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер, С.П.Петров. Накопитель протонов НАЦ-М. II. Стабилизация токов в цепях питания ведущего поля и корректирующих элементов. "Приборы и техника эксперимента" № 4 1976 г. стр.34-36.
4. А.Л.Писарев, Л.П.Деткин Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления). "Энергия", Москва, 1975 г. стр.106-112, 168-184.
5. А.Н.Алешаев, Б.А.Баклаков, М.М.Карлинер, С.П.Петров, Б.М.Фомель Моделирование на ЭВМ нелинейных систем стабилизации тока электромагнитов накопителей заряженных частиц. Препринт ИЯФ 76-97, Новосибирск, 1976.

Работа поступила - 5 сентября 1978 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ

Подписано к печати 29.IX-1978 г. МН 072/1

Усл. 0,6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно

Заказ № 72.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР