

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи

Омельяненко Михаил Михайлович

**ЛИНЕЙНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА
В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ МАЛОШУМЯЩИХ
ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ МАГНИТОВ
НУКЛОТРОНА**

Специальность 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна – 2019

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и
А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: Сидорин Анатолий Олегович,
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: Егоров Николай Васильевич
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-петербургский государственный
университет», заведующий кафедрой моделирования
электромеханических и компьютерных систем

Кулевой Тимур Вячеславович
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Институт теоретической и
экспериментальной физики им. А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт», заместитель директора по
научной работе по ускорительному направлению

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте
Объединенного института ядерных исследований в информационно-
телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:

<https://dissertations.jinr.ru/ru/Dissertations/Announcement/64>

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической
библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

 В.А.Арефьев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) создается ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), призванный обеспечить в долгосрочной перспективе выполнение на передовом мировом уровне программы исследований в области релятивистской ядерной физики, физики спина частиц, радиобиологии, прикладных исследований и подготовки кадров. Основным ускорителем комплекса NICA является протонный синхротрон Нуклотрон с магнитной системой на быстроциклирующих сверхпроводящих магнитах - базовая установка Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, введенная в эксплуатацию в 1993 г. Максимальная проектная индукция дипольных магнитов составляет 2 Тл со скоростью нарастания поля до 1 Тл/с. В период с 2007 по 2011г в качестве первой фазы реализации проекта NICA была проведена модернизация Нуклотрона. В результате была создана новая система питания структурных магнитов, основанная на питании всех последовательно соединенных структурных магнитов (96 дипольных и 64 квадрупольных) от одного мощного источника тока. Принципиальная возможность последовательного питания основана на том, что в требуемом диапазоне изменения бетатронных частот номинальные токи питания дипольных (поворотных) и квадрупольных (фокусирующих и дефокусирующих) магнитов отличаются не более чем на $\pm 10\%$. При этом необходимый разбаланс токов может быть создан двумя дополнительными источниками тока относительно небольшой мощности: один источник – для цепи последовательно соединенных фокусирующих и дефокусирующих магнитов, а второй – только для цепи фокусирующих магнитов. Присутствие на фокусирующих и дефокусирующих магнитах напряжения самоиндукции, возникающего при нарастании и спаде тока главного источника, предъявляет ряд специфических требований к источникам токов разбаланса. Наряду с противоречивыми требованиями высокого быстродействия и малых пульсаций тока, такие источники должны обладать высоким выходным сопротивлением (чтобы не оказывать шунтирующего действия) и возможностью не только отдавать мощность, но и поглощать мощность из нагрузки,

сохраняя при этом способность регулировать ток. Промышленно выпускаемых источников, удовлетворяющих таким требованиям, не существует. В других ускорительных лабораториях подобная задача ранее не решалась.

В рамках реализации проекта NICA создаются две новые ускорительные установки – бустер и коллайдер на основе сверхпроводящих магнитов, аналогичных магнитам Нуклотрона. Для производства и тестирования сверхпроводящих магнитов для комплекса NICA и проекта FAIR (Дармштадт, Германия) в ОИЯИ создан специализированный участок. Разработка малошумящих источников питания для измерений параметров магнитного поля при комнатной температуре также явилась актуальной задачей.

Актуальность данной работы заключается:

- в разработке и внедрении двух специализированных источников тока для обеспечения токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих магнитов при последовательной схеме питания Нуклотрона, а также – в получении практического опыта работы с такой системой питания;

- в использовании полученного опыта для создания и эксплуатации будущих систем питания бустера и коллайдера NICA, в которых также планируется применить последовательную схему питания;

- в оснащении малошумящими источниками тока стендов для магнитных измерений на участке производства сверхпроводящих магнитов в ЛФВЭ ОИЯИ.

Основные цели работы. Данная работа имела следующие цели:

- Разработку универсального блока регулирования тока с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме, предназначенного для построения на его основе малошумящих быстродействующих прецизионных источников тока для питания различных физических установок;

- выбор схемного решения, разработку и внедрение источников токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих структурных квадрупольных сверхпроводящих магнитов при последовательной схеме питания Нуклотрона. Источники должны обеспечивать устойчивые ускорительные режимы с малыми пульсациями главного магнитного поля и надежную эксплуатацию Нуклотрона. В качестве основы источников использовать универсальные блоки регулирования тока;

- оснащение измерительных стендов участка по производству сверхпроводящих магнитов ЛФВЭ ОИЯИ малошумящими источниками импульсного тока на основе универсальных блоков регулирования тока.

Научная новизна:

- Разработаны и внедрены источники токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих магнитов для последовательной схемы питания сверхпроводящего быстроциклирующего протонного синхротрона Нуклотрон. Источники совмещают в себе свойства высокого быстродействия и малых шумов и пульсаций выходного тока благодаря применению транзисторных регуляторов тока в линейном режиме;

- разработаны и внедрены малошумящие источники импульсного тока для прецизионных магнитных измерений на участке по производству сверхпроводящих магнитов. Источники построены на основе линейных транзисторных регуляторов тока при питании от конденсаторной батареи.

Личный вклад автора. Описываемые универсальный блок регулирования тока и источники тока на его основе разработаны автором лично. Пусконаладочные работы и ввод в эксплуатацию проводились при непосредственном участии автора.

На защиту выносятся:

- Схемотехническое решение и конструкция универсального блока регулирования тока РТ-01 с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме, а также принципы построения источников тока на его основе;

- схемотехническое решение и конструкция источников токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих структурных квадрупольных сверхпроводящих магнитов Нуклотрона, созданных на основе блоков РТ-01;

- схемотехническое решение и конструкция малошумящего источника импульсного тока ИП-100, также созданного на основе РТ-01, и используемого на участке производства магнитов ускорителей для прецизионных магнитных измерений параметров магнитов при комнатной температуре.

Практическая ценность работы:

- В ходе выполнения данной работы был разработан универсальный блок регулирования тока РТ-01 с транзисторным регулирующим каскадом в линейном режиме, позволяющий создавать источники тока с высоким быстродействием и

малыми пульсациями и шумом как для эксплуатационных так и для исследовательских задач;

- разработаны и внедрены источники токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих магнитов Нуклотрона на основе блоков РТ-01, обеспечившие устойчивые режимы ускорения с малыми пульсациями магнитного поля и надежную эксплуатацию Нуклотрона с последовательной схемой питания для реализации программы физических исследований;

- получены опыт и ценные экспериментальные результаты по управлению токами разбаланса фокусирующих и дефокусирующих магнитов Нуклотрона, и способам ослабления шума и пульсаций токов разбаланса, имеющие практическую ценность для создания и эксплуатации будущих систем питания бустера и коллайдера NICA, в которых также планируется применить последовательную схему питания;

- участок по производству сверхпроводящих магнитов в ЛФВЭ оснащен малошумящими источниками импульсного тока для прецизионных измерений параметров сверхпроводящих магнитов при комнатной температуре. Обеспечена требуемая точность магнитных измерений. По состоянию на май 2019 г. проведены измерения 45 дипольных магнитов бустера NICA и 11 дипольных магнитов коллайдера NICA.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах в Объединенном институте ядерных исследований;

- на международном семинаре «The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2014” (September 2014, Sozopol, Bulgaria);

- на 25-й всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC 2016 (г. Санкт-Петербург, ноябрь 2016 г.);

- на международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC 2017 (Копенгаген, Дания, май 2017 г.);

- на Кафедре электрофизических установок МИФИ.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 работах, из них 4 статьи в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 36 наименований. Содержит 37 рисунков, 6 таблиц. Общий объем 71 страница.

Содержание диссертационной работы

Во введении кратко описывается применяемая в настоящее время схема последовательного питания Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ, поясняется принцип создания токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих структурных магнитов (Рисунок 1), обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, научная новизна и практическая ценность работы.

Основное содержание работы изложено в 4 главах.

В первой главе приводятся общие требования к источникам тока разбаланса и к качеству их выходного тока, проводится краткий анализ типичных в ускорительной технике структурных схем источников питания магнитов, обосновывается выбор структурной схемы источников токов разбаланса.

Для обеспечения устойчивых ускорительных режимов и сведения к минимуму потерь частиц относительная погрешность¹⁾ поддержания токов разбаланса не должна превышать 10^{-3} , для обеспечения требуемого качества выведенного пучка коэффициент пульсаций²⁾ выходных токов источников не должен превышать $10^{-4} \dots 10^{-5}$.

Кроме того, источники токов разбаланса должны обеспечивать ток, с высокой точностью повторяющий форму тока главного источника вне зависимости от присутствующей на выходе ЭДС, создаваемой главным источником, которая может достигать ± 60 В на нагрузке источника токоотбора (магниты Д и Ф), и ± 30 В на нагрузке источника токодобавки (магниты Ф) при минимально возможной длительности фронта 30 мс.

¹⁾Относительная погрешность поддержания тока разбаланса, например, магнитов Д и Ф

определяется как $\delta = \frac{I_{37ТВ}}{I_{19,20ТВ} - I_{ДФрасч}} - 1$, где $I_{ДФрасч}$ – расчетный ток магнитов Д и Ф.

²⁾Коэффициент пульсации выходных токов определяется как $k_n = \frac{I_{max} - I_{min}}{2 \cdot I_{cp}}$.

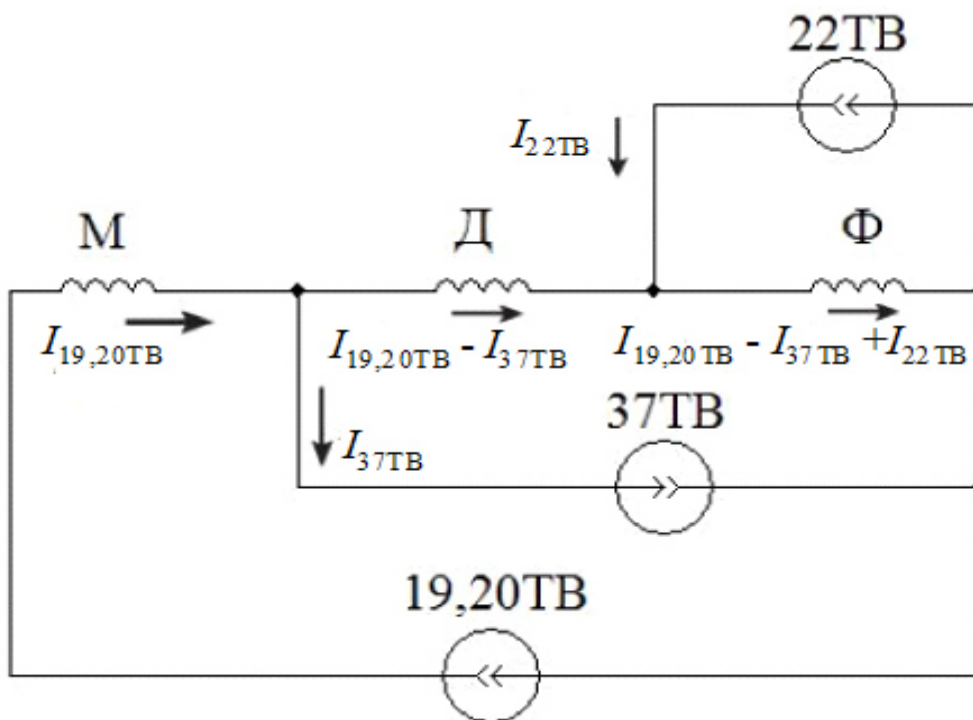


Рисунок 1 – Эквивалентная схема последовательного питания магнитов Нуклотрона. М - дипольные (поворотные) магниты Нуклотрона. Д – дефокусирующие магниты; Ф – фокусирующие магниты; $I_{19,20ТВ}$ – ток главного источника питания Нуклотрона 19,20ТВ (до 6 кА); $I_{37ТВ}$, – ток источника токоотбора 37ТВ (до 600 А) и $I_{22ТВ}$ – ток источника токодобавки 22ТВ (до 200 А)

Поскольку промышленных источников питания с необходимыми свойствами не выпускается, в качестве решения проблемы выбраны разработка и изготовление силами ЛФВЭ специализированных источников тока разбаланса.

Поскольку современные источники питания на основе IGBT-транзисторов создают заметные электромагнитные помехи и их применение на Нуклотроне требует тщательного изучения, в качестве структурной схемы источников токов разбаланса выбрана получившая широкое распространение в ускорительной технике в прежние годы схема на основе тиристорного управляемого выпрямителя и выходного транзисторного регулятора тока в линейном режиме (Рисунок 2). Схема отличается относительной простотой, высокой надежностью, и невысоким уровнем электромагнитных помех.

На основе анализа требований сделаны следующие выводы:

- Использовать для источников токов разбаланса ранее выбранную структурную схему (первые опыты: 43-й сеанс, 2011 г.): на входе тиристорный выпрямитель, на выходе транзисторный каскад в линейном режиме;

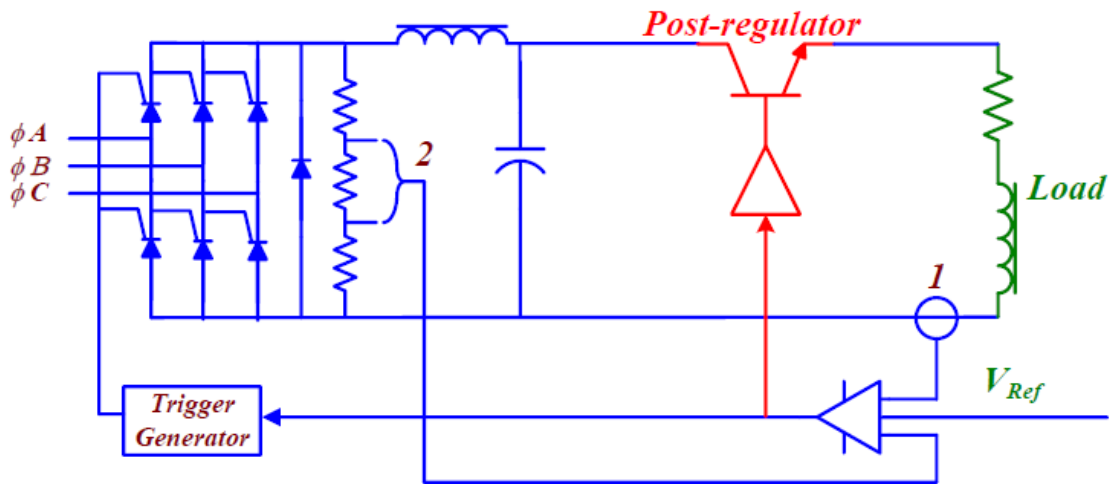


Рисунок 2 – Типичная структура источника питания с малыми пульсациями для магнитов ускорителей: *Trigger generator* – система импульсно-фазового управления; *Post-regulator* – транзисторный регулятор тока в линейном режиме; *Load* – нагрузка (магнит и питающий кабель); *1* – датчик тока нагрузки; *2* – датчик напряжения выпрямителя; V_{Ref} – входное управляющее напряжение (из лекций Michigan State University, Accelerator Power Electronics Engineering -URL: <http://uspas.fnal.gov/materials/12MSU/2012-Accelerator-Power-Electronics.pdf>).

- разработать универсальный блок регулирования тока с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме, допускающий параллельное соединение блоков, и с перспективой применения блоков в других физических установках;

- транзисторные регулирующие каскады источников построить на основе соответствующего количества параллельно соединенных универсальных блоков регулирования тока;

- для повышения стабильности и точности регулирования выходного тока применить дополнительный общий контур прецизионного регулирования тока.

Во второй главе сформулированы требования к блоку регулирования тока как элементу для построения источников тока (Рисунок 3), приведены основные характеристики (Таблица 1), электрическая принципиальная схема, описание конструкции блока регулирования тока РТ-01 (Рисунок 4), и особенности практического применения блока для питания индуктивной нагрузки.

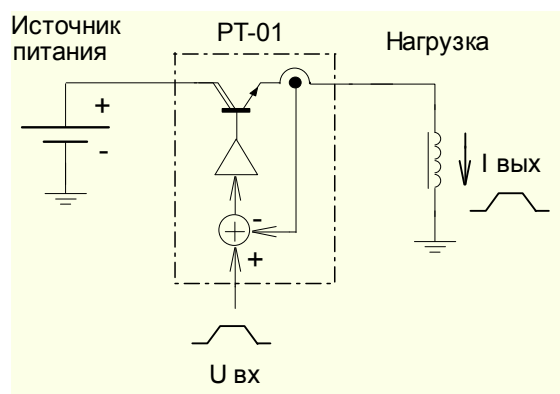


Рисунок 3 – Вариант применения РТ-01



Рисунок 4 – Вид РТ-01

Таблица 1 – Основные технические характеристики блока РТ-01

Характеристика	Значение	Примечание
Номинальный рабочий ток, А	0–50	
Номинальное рабочее напряжение, В	5–50	
Номинальная рассеиваемая мощность, Вт	500	$t^{\circ}_{окр} = +50^{\circ}\text{C}$
Рабочий диапазон частот (по спаду минус 3 дБ), Гц	0–6000	При активной нагрузке, $I_{ВЫХ} = 50 \text{ А}$
Выходное сопротивление, Ом, не менее, на частоте 0–10 Гц 300 Гц	165 56	
Шум выходного тока в полосе частот 1–1000 Гц, мА _{эфф} , не более	0,6	
Диапазон рабочих температур, °С	0÷+50	

Параметры и конструкция блоков позволяет использовать их и в других физических установках. Изготовлено более 30 блоков РТ-01, наблюдается хорошая повторяемость параметров, блоки не требуют регулировки. Основная масса блоков изготовлена для источников тока разбаланса Нуклотрона, остальные – для стенда «теплых» магнитных измерений участка по производству сверхпроводящих магнитов.

В третьей главе описано практическое применение блоков РТ-01 в системах питания Нуклотрона. Приведено описание созданных на основе блоков РТ-01 источников токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих структурных сверхпроводящих квадрупольных магнитов Нуклотрона. Источник «токодобавки» магнитов Д и Ф получил название 37ТВ (Рисунок 5, Таблица 2), источник «токоотбора» магнитов Ф, аналогичный по устройству 37ТВ, но меньшей мощности, получил название 22ТВ. Приведены результаты работы источников тока в сеансах Нуклотрона:

- Источник 37ТВ без существенных изменений в схемах и конструкции используется на Нуклотроне с 46-го сеанса (с 2012 г). Двенадцать блоков РТ-01 используются в составе источника токоотбора 37ТВ и 4 блока – в источнике токодобавки 22ТВ. Блоки позволили добиться низкого уровня шумов, помех и пульсаций и, как результат, низких пульсаций полей магнитов Д и Ф Нуклотрона. Относительное значение пульсаций тока магнитов Д и Ф не превышает $4 \cdot 10^{-5}$;

- отказов не было;

- получена экспериментальная информация, хорошо изучены особенности совместной работы источника токоотбора 37ТВ и главного источника 19,20ТВ;

- также практически проверена возможность управления токами разбаланса магнитов Д и Ф и ускорением пучка при одновременной работе трех источников: 19,20ТВ, 37ТВ и источника токодобавки 22ТВ.

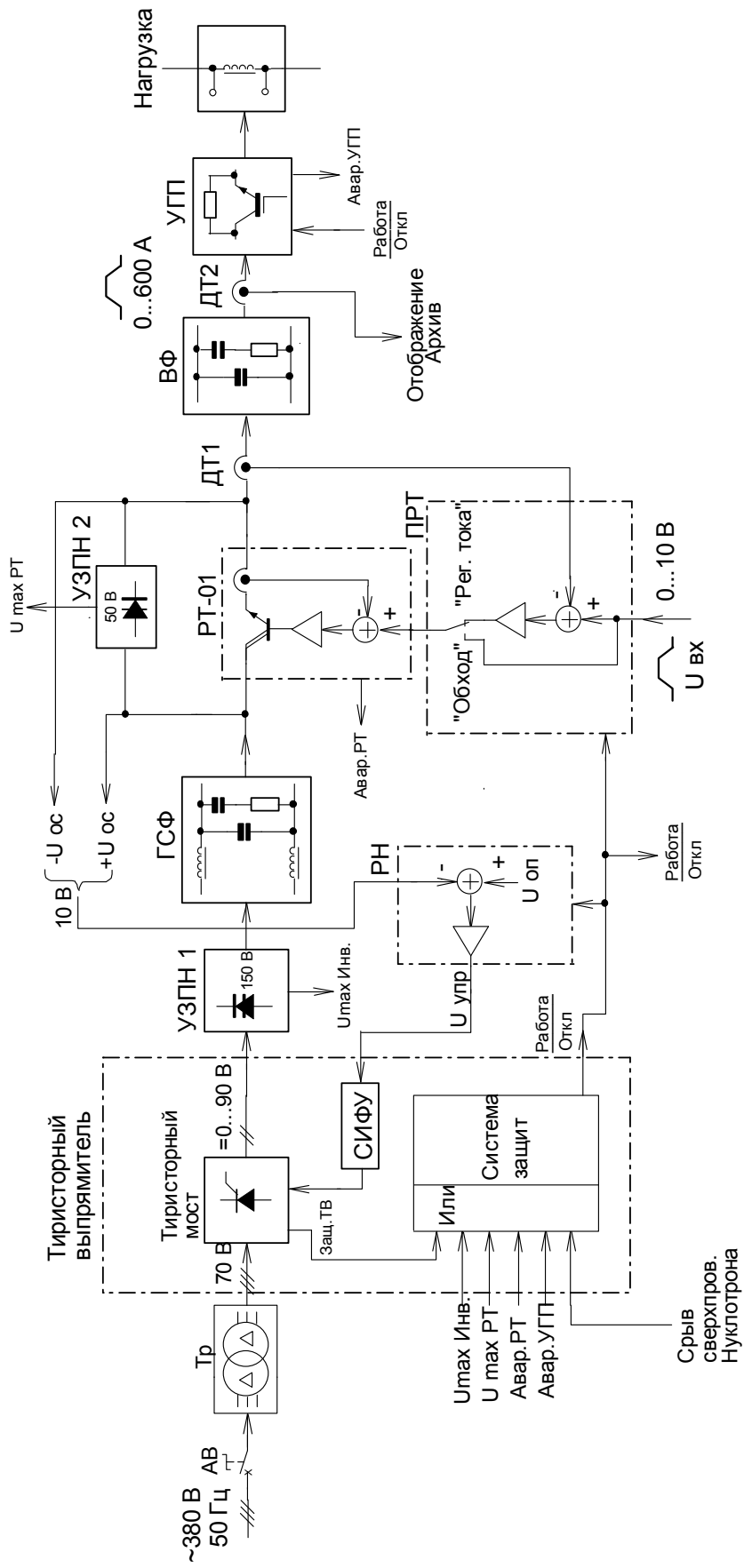


Рисунок 5 – Структурная схема источника токаогбора 37ТВ

Таблица 2 – Основные технические характеристики источника токоотбора 37ТВ

Характеристика		Значение	Примечание
Номинальное входное напряжение питания, В		3x380	
частотой, Гц		50	
Номинальный выходной ток, А		0–600	
Номинальное выходное напряжение, В	В выпрямительном режиме	+65	
	В инверторном режиме	-75	Ведомый инвертор
Температурный дрейф коэффициента передачи, $1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, не более		± 25	Контур ПРТ включен. Расчетное значение.
Температурный дрейф выходного тока, $\text{mA}/^{\circ}\text{C}$, не более		± 10	
Размах пульсаций и шума в выходном токе, mA , в полосе частот 0–1 кГц, не более		270	При коротком замыкании выхода, $I_{\text{вых}} = 600 \text{ A}$
Размах напряжения шума и пульсаций на выходе, В, в полосе частот 0–1 кГц, не более	при отключенном выходном фильтре	0,7	Нагрузка: сверхпроводящие магниты 20 мГн, кабель 30 мОм
	с выходным фильтром	0,1	

В четвертой главе описано применение блоков РТ-01 в составе малозумящих источников импульсного тока ИП-100 для измерения характеристик магнитного поля магнитов ускорителей при комнатной температуре («теплые» измерения). Приведены структурная (Рисунок 6) и электрическая принципиальная схемы, технические характеристики (Таблица 3).

Поскольку характер выходного тока при теплых измерениях – относительно короткие импульсы с длительной паузой и средняя потребляемая мощность невелика, вместо мощного сетевого источника питания используется предварительно заряженная батарея конденсаторов, импульс тока формируется последовательным транзисторным каскадом в линейном режиме (блоки РТ-01). Батарея конденсаторов подзаряжается

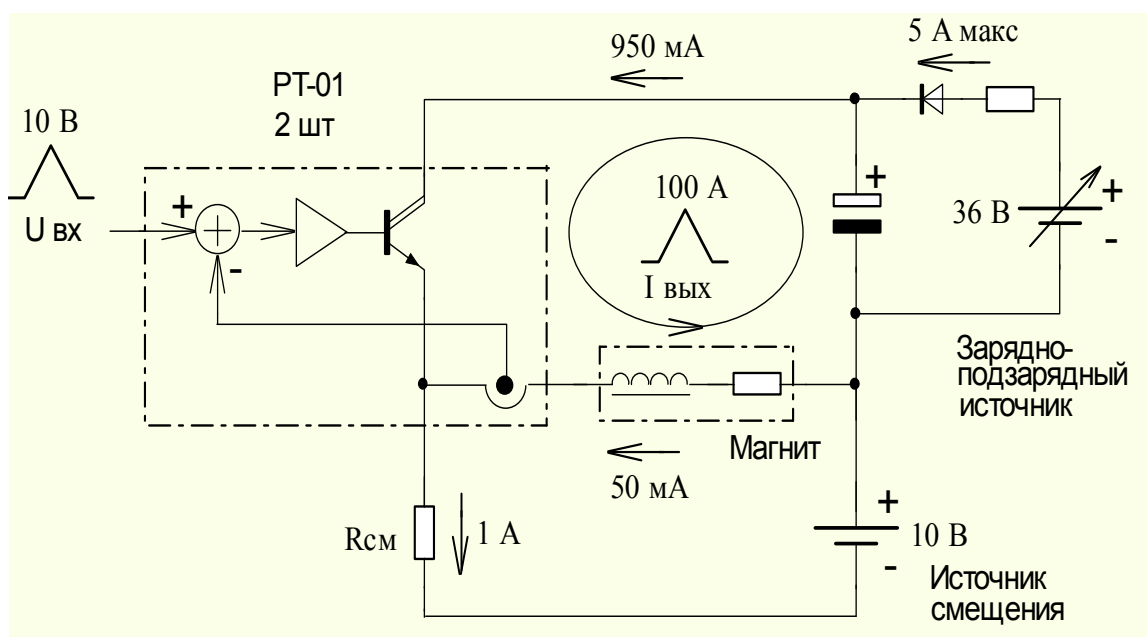


Рисунок 6 – Структурная схема ИП-100

Таблица 3 – Основные технические характеристики ИП-100

Характеристика	Значение	Примечание
Номинальное напряжение питания, В	220 ($\pm 10\%$)	
частотой, Гц	50	
Потребляемый ток, А, не более	1,5	В течение не более 1 с
Амплитуда импульса выходного тока, А	0–100	
Номинальное выходное напряжение, В	5–35	
Минимальная пауза между импульсами, с	1,5	
Рабочий диапазон частот (по спаду минус 3дБ), Гц	0–6000	При активной нагрузке
Шум выходного тока, $\text{mA}_{\text{эфф}}$, не более, в полосе частот:		Эквивалентная расчетная полоса частот с отвесными скатами
1–1000 Гц	0,76	
1–10000 Гц	1,33	

в паузах между импульсами с помощью маломощного зарядно-подзарядного источника. Таким образом, в выходном токе источника практически полностью отсутствуют пульсации сетевой частоты и её гармоник. Шум выходного тока ИП-100 определяется шумом электронных компонентов. Относительный уровень шума выходного тока

составляет менее 10^{-5} относительно 100 А в полосе частот 1–1000 Гц. (Вычисляется как $I_{ш,эфф}/I_{вых,мах}$, где $I_{ш,эфф}$ – эффективное значение шумового тока, $I_{вых,мах}$ – максимальная амплитуда выходного тока)

Результаты применения блоков РТ-01 в составе малошумящих источников импульсного тока ИП-100:

- ИП-100 длительное время используется в составе системы магнитных измерений. Качество выходного тока источника ИП-100 позволяет проводить измерения геометрии магнитного поля магнитов ускорителей в соответствии с требованиями, установленными в техническом задании на магнитные измерения;

- при теплых измерениях отмечена лучшая, чем при «холодных» измерениях (при температуре 4К), повторяемость результатов. Это объясняется тем, что линейный источник тока ИП-100 имеет существенно более низкий уровень шумов, пульсаций и помех (ниже 10^{-5}), чем импульсный источник на IGBT-транзисторах, применяемый при холодных измерениях.

В заключении представлены основные результаты работы:

- в ходе выполнения данной работы был разработан универсальный блок регулирования тока РТ-01 с транзисторным регулирующим каскадом в линейном режиме, позволяющий создавать источники тока с высоким быстродействием и малыми пульсациями и шумом как для эксплуатационных так и для исследовательских задач;

- разработаны и введены в эксплуатацию источники токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих магнитов Нуклотрона на основе блоков РТ-01, обеспечившие устойчивые режимы ускорения и надежную эксплуатацию Нуклотрона с последовательной схемой питания. Относительное значение шума и пульсаций токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих магнитов не превышает $4 \cdot 10^{-5}$;

- получены опыт и ценные экспериментальные результаты по управлению токами разбаланса Нуклотрона и способам ослабления шума и пульсаций токов разбаланса, имеющие практическую ценность для создания и эксплуатации будущих систем питания бустера и коллайдера NICA, в которых также планируется применить последовательную схему питания;

- участок по производству сверхпроводящих магнитов в ЛФВЭ ОИЯИ оснащен малошумящими источниками импульсного тока для прецизионных измерений параметров сверхпроводящих магнитов при комнатной температуре. Относительное значение шума тока – менее 10^{-5} . Обеспечена требуемая точность магнитных измерений. По состоянию на май 2019 г. проведены измерения параметров 45 дипольных магнитов бустера NICA и 11 дипольных магнитов коллайдера NICA.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Омеляненко М.М. Блок регулирования тока РТ-01 с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме // ПТЭ. – 2017. – №2. – С.72-78.
2. Карпинский В.Н., ...*Омеляненко М.М. и др. Источники токов разбаланса фокусирующих и дефокусирующих структурных сверхпроводящих квадрупольных магнитов Нуклотрона // ПТЭ. – 2017. – №2. – С.97-109.
3. *Омеляненко М.М. и др. Малошумящий источник импульсного тока для измерения характеристик магнитного поля магнитов ускорителей // Письма в ЭЧАЯ. – 2017. – Т.14, №1(206). – С.190-200.
4. Борисов В.В., ... Омеляненко М.М. и др. Измерение характеристик магнитного поля дипольного магнита бустера NICA // Письма в ЭЧАЯ. – 2016. – Т.13, №7(205). – С.1333-1342.

Другие статьи и материалы конференций:

5. Борисов В., ... Омеляненко М. и др. Система для магнитных измерений дипольных магнитов бустера NICA 30' // The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2014”, September 2014, Sozopol, Bulgaria. -URL: <http://indico-old.jinr.ru/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=893>
(Дата обращения: 21.05.2019)
6. Осипенков А.Л., ... Омеляненко М.М. и др. Системы питания ускорителей NICA // The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2014”, September 2014, Sozopol, Bulgaria.
-URL: <http://indico-old.jinr.ru/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=893>
(Дата обращения: 21.05.2019)
7. N. Topilin, ... M. Omelyanenko et al. NICA-MPD Desing Process Report. // The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2014”, September 2014, Sozopol, Bulgaria. -URL:
<http://indico-old.jinr.ru/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=893>
(Дата обращения: 21.05.2019)

8. V. Borisov*, ... M. Omelyanenko et al. MAGNETIC MEASUREMENTS OF NICA BOOSTER DIPOLES // in Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, pp. 3458-3460. . -URL: <http://inspirehep.net/record/1626305/files/wepva087.pdf>
(Дата обращения: 21.05.2019)
9. A. Shemchuk, ... M. Omelyanenko et al., MAGNETIC MEASUREMENT SYSTEM FOR THE NICA QUADRUPOLE MAGNETS // in Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, pp. 3464-3467. -URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/wepva089.pdf> .
(Дата обращения: 21.05.2019)
10. V. Borisov, ... M. Omelyanenko et al. SERIES MAGNETIC MEASUREMENTS OF NICA BOOSTER DIPOLES // in Proc. of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 629-631. -URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/thpsc043.pdf> (Дата обращения: 21.05.2019)
11. A. Shemchuk... M. Omelyanenko et al. MAGNETIC MEASUREMENT SYSTEM FOR THE NICA QUADRUPOLE MAGNETS // in Proc. of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 559-562. -URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/thpsc010.pdf> (Дата обращения: 21.05.2019)
12. M. Shandov, ... M. Omelyanenko et al. MAGNETIC MEASUREMENT SYSTEM FOR THE NICA COLLIDER DUAL DIPOLES // in Proc. of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 547-549. -URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/thpsc005.pdf>
(Дата обращения: 21.05.2019)
13. Аверичев А.С., ...Омельяненко М.М. и др. Итоги 46-го и 47-го сеансов Нуклотрона // Сообщение ОИЯИ Р9-2013-140, Дубна, 2013.
14. Омельяненко М.М. Блок регулирования тока РТ-01 с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме // Препринт ОИЯИ Р13-2015-95, Дубна, 2015.
15. Карпинский В.Н., ... *Омельяненко М.М. и др. Источники токоотбора и токодобавки фокусирующих и дефокусирующих структурных сверхпроводящих квадрупольных магнитов Нуклотрона // Препринт ОИЯИ Р13-2015-100, Дубна, 2015.
16. Борисов В.В., ... *Омельяненко М.М. и др. Малошумящий источник импульсного тока для измерения характеристик магнитного поля магнитов ускорителей // Препринт ОИЯИ Р13-2016-42, Дубна, 2016.