

СИСТЕМА ПИТАНИЯ МАГНИТОВ НАКОПИТЕЛЯ ЦКП «СКИФ»

*О. В. Беликов^{а,1}, Ю. С. Актершев^а, Г. Н. Баранов^{а,б}, Д. С. Винник^а,
К. М. Горчаков^а, С. М. Гуров^а, С. Е. Карнаев^а, А. А. Крылов^а,
А. А. Морсин^а, П. А. Пиминов^{а,б}, Д. Н. Пурескин^а, Д. В. Сеньков^а,
Ш. Р. Сингатулин^а, С. В. Синяткин^а, А. Д. Чернякин^а*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»,
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

Система питания электромагнитов накопителя электронов ЦКП «СКИФ» включает пять типов источников стабилизированного тока, общее количество которых 2259 шт. Максимальный выходной ток источников питания — от 3 до 800 А, выходная мощность — от 70 Вт до 300 кВт, допустимая нестабильность выходного тока — от 10 до 100 ppm. Для надежной работы источника СИ требуется обеспечить стабильность параметров источников тока, высокую надежность работы и быструю взаимозаменяемость источников питания в пределах одного типа.

The power supply system for the electromagnets of the electron storage ring of the SRF “SKIF” includes five types of stabilized current sources, the total number of which is 2259 pcs. The maximum output current of the power supplies is from 3 to 800 A, the output power is from 70 W to 300 kW, the permissible instability of the output current is from 10 to 100 ppm. For reliable operation of the light source, it is necessary to ensure the stability of the parameters of the current sources, high reliability of operation, and the fast replacing of failed power supply source within the same type.

PACS: 29.20.Ej

ВВЕДЕНИЕ

Накопительное кольцо ЦКП «СКИФ» с энергией электронного пучка 3 ГэВ, горизонтальным эмиттансом 73 пм·рад и периметром 476 м предназначено для генерации интенсивных и ярких пучков синхротронного излучения. Магнитная система накопителя должна обеспечить циркуляцию пучка с ультрамалым эмиттансом, компенсацию натурального хроматизма с большой динамической апертурой, коррекцию орбиты, оптики и т. д. [1]. Особенности магнитной системы являются большие градиенты квадрупольных и секстипольных линз, требующие индивидуального питания (каждая линза питается от отдельного источника), и высокая плотность размещения магнитов в продольном направлении. Поэтому требования к качеству магнитного поля высоки, и требуется большое количество источников питания электромагнитов с высокой стабильностью выходных параметров.

¹E-mail: O.V.Belikov@inp.nsk.su

Основные параметры питания магнитов

Наименование		Количество	I , А	U , В	$\delta I/I$, ppm	$\Delta I/I$, ppm
Дипольные магниты	BDC	32	597	6,54	3	50
	BMA	32	426,1	6,43	3	50
	BDA	64	800	4,43	3	50
Квадруполи	QFA	32	327,59	17,56	10	100
	QDA	32	327,59	17,56	10	100
	AFA	128	327,59	11,14	3	50
	AFC	32	327,59	11,14	3	50
	QFB	32	327,59	11,79	10	100
Секступоли	SFA	32	104,2	3,5	10	100
	SDA/SDB/SDC	160	104,2	4,8	10	100
	SFB/SFC	64	104,2	5,4	10	100
Дипольные корректоры в постоянных магнитах		16	782	7,51	10	100
Отдельно стоящие корректоры	CX	32	7	5,2	30	500
	CY	32	7	5,2	30	500
	Skew	32	10	29	30	500
Корректирующие обмотки в секступолях	SFA	192	3	1,8	30	500
	SDA/SDB/SDC	960	3	1,95	30	500
	SFB/SFC	384	3	2,25	30	500
Дипольные корректоры в диполях	BDC	32	3	2,7	30	500
	BMA	32	3	2,7	30	500

Примечание. I — максимальный ток; U — максимальное напряжение; $\delta I/I$ — среднеквадратичное значение допустимого уровня пульсаций тока в полосе от 1 Гц до 1 кГц; $\Delta I/I$ — допустимый дрейф выходного тока за 24 ч.

Основные параметры питания магнитов приведены в таблице. Дипольные магниты питаются последовательно: все магниты одного типа питаются от одного источника питания. Остальные магниты питаются индивидуально: каждый магнит питается от отдельного источника питания.

1. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ

Для питания дипольных магнитов используются три однополярных источника питания с общей структурой. Различаются источники питания силовыми трансформаторами, определяющими максимальное выходное напряжение и мощность, а также количеством преобразователей мощности, определяющих максимальный выходной ток. Самый мощный источник питания используется для семейства магнитов BDA (рис. 1).

Состав преобразователя: входной силовой трансформатор со схемой включения и цепью контроля нагрева обмоток; входная зарядная цепь, состоящая из цепи плавной зарядки конденсаторных батарей и силового выпрямителя; четыре включенных

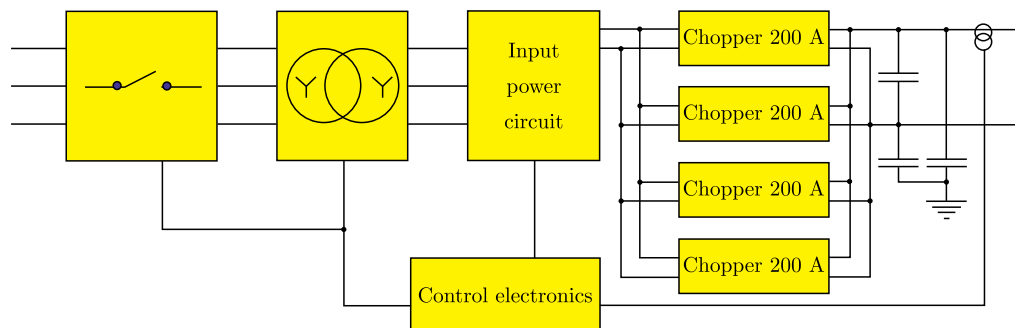


Рис. 1. Структурная схема источника питания дипольных магнитов семейства BDA

параллельно преобразовательных модуля идентичной конструкции, представляющих собой конденсаторную батарею, понижающий преобразователь на IGBT и выходной LC фильтр; выходная суммирующая цепь с измерителем тока; система управления и защиты.

Максимальный выходной ток источника питания — 800 А, максимальное выходное напряжение — 375 В. Регулирование выходного тока осуществляется четырьмя понижающими импульсными преобразователями, работающими на частоте 20 кГц; максимальный выходной ток преобразователя — 200 А, максимальное напряжение — 400 В. В качестве измерительного датчика используется трансформатор постоянного тока, работающий на второй гармонике. Силовой трансформатор источника питания располагается в отдельном помещении, оставшаяся часть размещена в трех шкафах размерами 800 × 1000 × 2200 мм. Первый шкаф содержит цепи включения силового трансформатора, во втором размещены цепь ввода мощности и преобразовательные модули, и в третьем шкафу размещаются выходные цепи и электроника управления.

2. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ КВАДРУПОЛЕЙ

Все квадруполи питаются от однополярных источников с максимальным выходным током 500 А и максимальным напряжением 20 В (рис. 2). Выходной ток регулируется широтно-импульсной модуляцией входного напряжения мостовым инвертором с частотой 20 кГц, в качестве измерительного датчика используется трансформатор постоянного тока разработки ИЯФ [2]. Контроль и управление осуществляется по Ethernet от встроенного контроллера, содержащего необходимое количество ЦАП, АЦП и регистров ввода/вывода. Блоки выполнены с водяным охлаждением в конструкции «Евромеханика» с габаритными размерами 432 × 415 × 178 мм.

3. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ КОРРЕКТОРОВ

Для питания отдельно стоящих корректоров, расположенных в прямолинейных промежутках, используются двухполярные источники с максимальными параметрами ± 10 А, ± 50 В. В качестве основы для разработки взят источник питания, разработанный для Европейского рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL) [3]. Структурная схема показана на рис. 3.

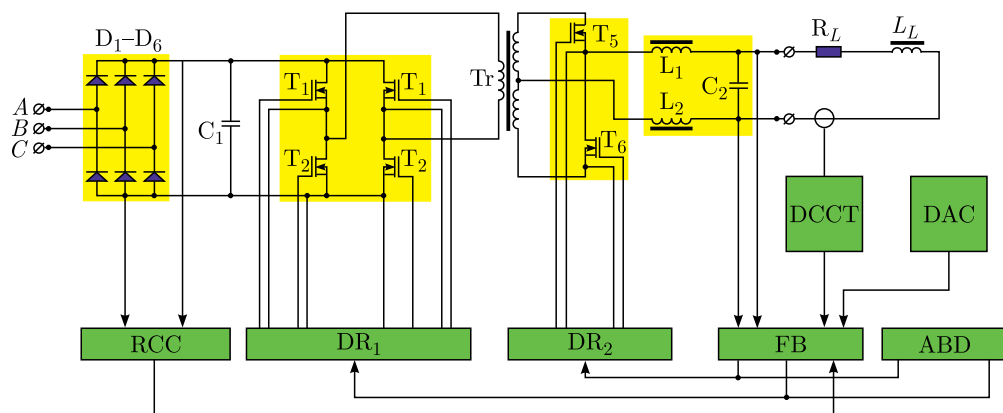


Рис. 2. Структурная схема источника питания квадруполей: D_1 – D_6 — трехфазный выпрямитель; T_1 – T_4 — мостовой инвертор; Tr — трансформатор; T_5 , T_6 — синхронный выпрямитель; L_1 , L_2 , C_2 — фильтр низких частот; R_L , L_L — нагрузка (квадруполь); DCCT — трансформатор постоянного тока; DAC — цифроаналоговый преобразователь; RCC — схема компенсации пульсаций; DR₁, DR₂ — драйверы полупроводниковых ключей; FB — модуль обратной связи; ABD — устройство блокировок и сигнализаций

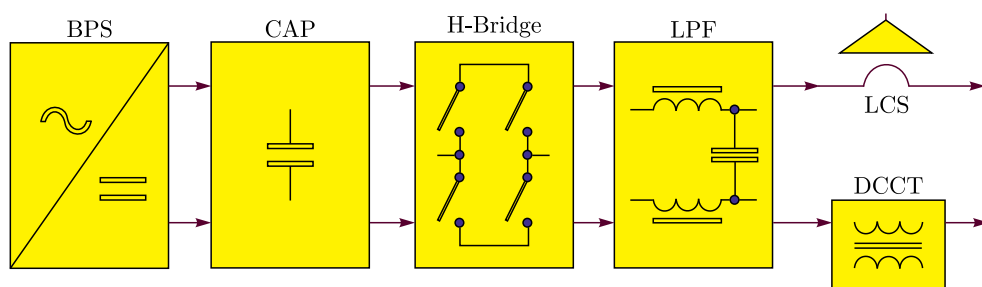


Рис. 3. Структурная схема источников питания ± 10 А. BPS — буферный источник питания; CAP — емкостная батарея; H-Bridge — мостовой инвертор; LPF — фильтр низких частот; LCS — бесконтактный измеритель тока на эффекте Холла; DCCT — трансформатор постоянного тока

Источник питания выполнен по схеме с двойным преобразованием: переменное сетевое напряжение преобразуется в постоянное при помощи буферного источника питания, далее постоянное напряжение преобразуется в постоянный ток мостовым инвертором, который осуществляет регулирование выходного тока на частоте 100 кГц. Источник питания сконструирован в виде крейта в конструктиве «Евромеханика» с габаритными размерами $432 \times 355 \times 133$ мм и имеет естественное воздушное охлаждение.

Остальные корректоры выполнены в виде дополнительных обмоток, намотанных на каждом полюсе секступолей. При этом каждая обмотка запитана от отдельного источника, что позволяет на одной линзе выполнять дипольные, квадрупольные и скью-квадрупольные коррекции путем задания разных токов в обмотки линзы. Питание таких корректоров осуществляется от двухполярных источников с максималь-

ными параметрами ± 3 А, ± 24 В. Структура источников питания подобна структуре источников ± 10 А и отличается многоканальным исполнением: от одного буферного источника запитаны шесть мостовых инверторов.

Источники питания имеют цифровую обратную связь. Контроль и управление источниками питания осуществляется по интерфейсу SPI от встроенных контроллеров, в состав которых входят модуль ввода/вывода (МВВ), процессорно-интерфейсный модуль (ПИМ) и процессорный модуль (ПМ) типа VAR-SOM-MX8MN производства Variscite. Плата МВВ предназначена для согласования интерфейса взаимодействия между источником питания и процессорной частью устройства (ПМ и ПИМ), плата ПМ обеспечивает устройству работу под управлением ОС Linux, что позволяет реализовать на базе контроллера нижний уровень системы управления, плата ПИМ имеет интерфейс Ethernet для быстрого взаимодействия с управляющим сервером.

Быстродействие необходимо для возможности использования корректоров в системе стабилизации замкнутой орбиты, по данным с датчиков положения пучка через сервер планируется замкнуть медленную обратную связь в полосе частот не менее 10 Гц. Для быстрой коррекции положения пучка в полосе частот до 10 кГц будут использоваться 64 шт. отдельно стоящих корректоров на ферритовом магнитопроводе, их питание планируется от линейных источников тока.

4. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СЕКСТУПОЛЕЙ И ДИПОЛЬНЫХ КОРРЕКТОРОВ В ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Для питания секступолей и дипольных корректоров в постоянных магнитах используются промышленно выпускаемые преобразователи переменного напряжения в постоянное. Выходной ток стабилизируется внешним контроллером, к которому подключается бесконтактный измеритель тока. Контроллер регулирует выходной ток путем изменения задания преобразователю напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершено проектирование системы питания магнитов и изготовлены прототипы источников питания, ведутся тестовые испытания. Начато серийное производство источников питания, завершение которого планируется 2023 г. По готовности инженерных помещений ЦКП «СКИФ» начнется монтаж и запуск системы питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов А. В., Актершев Ю. С., Анашин В. В. и др.* Ускорительный комплекс // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ»: Сб. ст. Т. 2. Новосибирск: Ин-т катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, 2022.
2. А. с. № 737850 А1 СССР, МПК G01R 19/20. Трансформатор постоянного тока: № 2472565: заявл. 04.04.1977: опубл. 30.05.1980 / Веремеенко В. Ф. Ин-т ядерной физики СО АН СССР.
3. *Belikov O. V., Kozak V. R.* A Family of Precision Power Supplies for Corrector Magnets of the European X-Ray Free-Electron Laser // *Instrum. Exp. Tech.* 2018. V. 61, No. 5. P. 707–712.

Получено 18 ноября 2022 г.