

СИСТЕМА ПИТАНИЯ МАГНИТОВ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЦКП «СКИФ»

*О. В. Беликов^{a, 1}, Ю. С. Актершев^a, К. М. Горчаков^a, С. М. Гуров^a,
М. С. Дмитриев^a, В. А. Докутович^a, С. Е. Карнаев^a, А. А. Морсин^a,
Д. Н. Пурескин^a, Д. В. Сеньков^a, С. В. Синяткин^a, А. Д. Чернякин^a*

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

Система питания магнитов инжекционного комплекса ЦКП «СКИФ» включает в себя около 70 источников постоянного тока, 3 генератора импульсного тока и около 100 источников переменного тока. Источники постоянного тока включают пять типов прецизионных биполярных и униполярных источников с максимальным выходным током от 3 до 300 А и максимальным выходным напряжением 24 В. Максимальный выходной ток импульсных генераторов от 1,5 до 10 кА, напряжение до 1 кВ. Источники переменного тока содержат четыре типа источников с максимальным выходным током от 6 до 900 А и максимальной реактивной мощностью 0,5 МВт. Для надежной работы инжекционного комплекса требуется обеспечить стабильность параметров источников тока, высокую надежность работы и быструю взаимозаменяемость источников питания в пределах одного типа. Все перечисленные источники тока разработаны и произведены ИЯФ СО РАН.

The magnets power supply system of the injection complex of the SRF “SKIF” includes about 70 direct current sources, three pulse current generators, and about 100 alternating current sources. Direct current sources include five types of precision bipolar and unipolar sources with a maximum output current from 3 to 300 A and a maximum output voltage of 24 V. The maximum output current of pulse generators is from 1.5 to 10 kA, voltage up to 1 kV. Alternating current sources include four types of sources with a maximum output current from 6 to 900 A and a maximum reactive power of 0.5 MW. For reliable operation of the injection complex, it is necessary to ensure the stability of the parameters of the current sources, high reliability of operation, and fast replacing of failed current sources within the same type. All listed current sources were developed and produced by BINP SB RAS.

PACS: 29.20.Ej

ВВЕДЕНИЕ

Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») — это новый источник синхротронного излучения поколения «4+» с энергией 3 ГэВ, периметром 476 м и эмиттансом 73 пм·рад. Инжекционный комплекс ЦКП «СКИФ» включает в себя линейный ускоритель на энергию 200 МэВ, канал транспортировки электронных сгустков и бустерный синхротрон на полную энергию 3 ГэВ [1].

¹E-mail: O.V.Belikov@inp.nsk.su

Таблица 1. Основные параметры питания магнитов постоянного тока

Наименование		Количество	I , А	U , В	$\delta I/I$	$\Delta I/I$
Дипольные магниты	ВМ	4	± 20	50	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Квадрупольные линзы	QLF1-4, QLD2-5	5	± 6	24	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	QLF6, QLD7	2	± 20	50	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	QB	12	150	24	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Корректоры	CKX, CKY	16	± 3	24	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	CL, CXW, CY	20	± 6	24	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Соленоиды	LG.SOL	5	± 6	24	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	LG.SOLM	1	150	24	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	LG.SOLW	1	300	24	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Спектрометр	LD.BSP	1	150	24	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Септум-магнит		1	300	24	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$

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.

Таблица 2. Основные параметры питания импульсных магнитов

Параметр	Впускной септум-магнит	Выпускной септум-магнит	Бамп-магнит
Поле магнита, Тл	0,11	0,8	0,46
Допустимая погрешность поля, %	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$	$\pm 0,2$
Индуктивность обмотки, мкГн	1,8	2,1	55
Пиковый ток, А	2800	10220	1500

Основные параметры питания магнитов постоянного тока инжекционного комплекса приведены в табл. 1, каждый магнит питается от индивидуального источника тока.

В табл. 2 приведены основные параметры питания импульсных магнитов. Все три генератора импульсных токов имеют одинаковую конструкцию: зарядный источник, емкостный накопитель и генератор импульсов [2]. Особенностью импульсных магнитов инжекционного комплекса являются их малая индуктивность обмотки и большой пиковый ток. Поэтому высокоточные части генераторов импульсов расположены в непосредственной близости к магнитам — на балке в кольце бустерного синхротрона, а зарядные источники, контроллеры управления и измерительная электроника — в зоне обслуживания.

Бустерный синхротрон работает с частотой повторения 1 Гц. Магнитная система бустерного синхротрона содержит 60 дипольных магнитов двух типов, 24 квадрупольные линзы трех типов, 16 секступольных линз двух типов и 36 дипольных корректоров двух типов. На рис. 1 изображена диаграмма задания тока в дипольных магнитах, квадрупольные и секступольные линзы имеют подобную диаграмму. Диаграмма задания тока в корректорах содержит нелинейный участок ускорения 3-й гармоники по отношению к диаграмме дипольных магнитов. Это необходимо для коррекции искажений орбиты, вызванных насыщением магнитопровода дипольных магнитов.

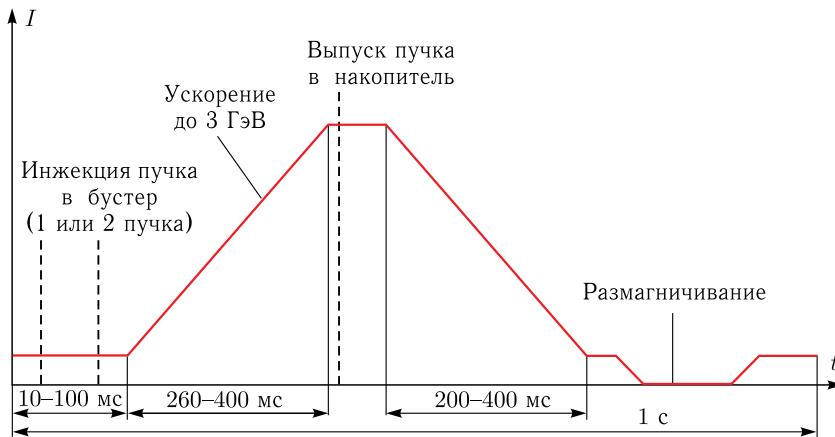


Рис. 1. Диаграмма задания тока в дипольных магнитах

Таблица 3. Основные параметры питания магнитов переменного тока

Наименование		Количество	I , А	U , В	ε	Δ
Дипольные магниты	BR-BF	1	± 900	200	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	BR-BD	4	± 750	350		
Квадрупольные линзы	BR-QF	1	± 167	160	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	BR-QD	1	± 118	160	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	BR-QG	1	± 105	160	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Корректоры	BR-SXV	8	± 6	60	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	BR-SXH	8	± 6	60	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Соленоиды	BR-CX	20	± 6	60	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	BR-CY	16	± 6	60	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Примечание. I — максимальный ток; U — максимальное напряжение; ε — допустимая относительная погрешность тока при перестройке (по отношению к максимальному значению); Δ — допустимая относительная погрешность тока в статике (по отношению к максимальному значению).

Дипольные магниты и квадрупольные линзы питаются последовательно от общих источников питания в пределах одного типа. Секступольные линзы и корректоры питаются от индивидуальных источников питания. В табл. 3 приведены основные параметры питания магнитов бустерного синхротрона.

1. ИСТОЧНИКИ ТОКА MPS-150-24 и MPS-300-24

Для питания магнитов постоянным током 150 и 300 А используются униполярные перестраиваемые источники тока MPS-150-24 и MPS-300-24 с максимальным выходным напряжением 24 В. На рис. 2 изображена структурная схема источника тока MPS-300-24.

Выходной ток источника регулируется выходным напряжением трех параллельно соединенных преобразователей переменного напряжения в постоянное (в случае

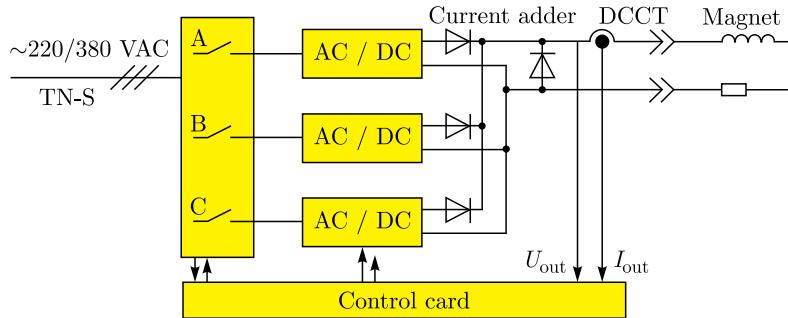


Рис. 2. Структурная схема источника тока MPS-300-24. AC/DC — преобразователь переменного напряжения в постоянное; DCCT — бесконтактный измеритель тока

MPS-150-24 используются два преобразователя). Для стабилизации тока используется прецизионный бесконтактный датчик тока. Петля обратной связи реализована на цифровом контроллере, в состав которого входят АЦП для измерения тока и напряжения, ЦАП для задания напряжения преобразователям AC/DC, а также физический интерфейс — Ethernet 1 Гбит/с.

2. ИСТОЧНИКИ ТОКА MPS-3-24, MPS-6-24 и MPS-20-50

Питание магнитов постоянным током 3, 6 и 20 А осуществляется от четырехквадрантных источников тока [3] MPS-3-24, MPS-6-24 с максимальным выходным напряжением 24 В и MPS-20-50 с максимальным выходным напряжением 50 В.

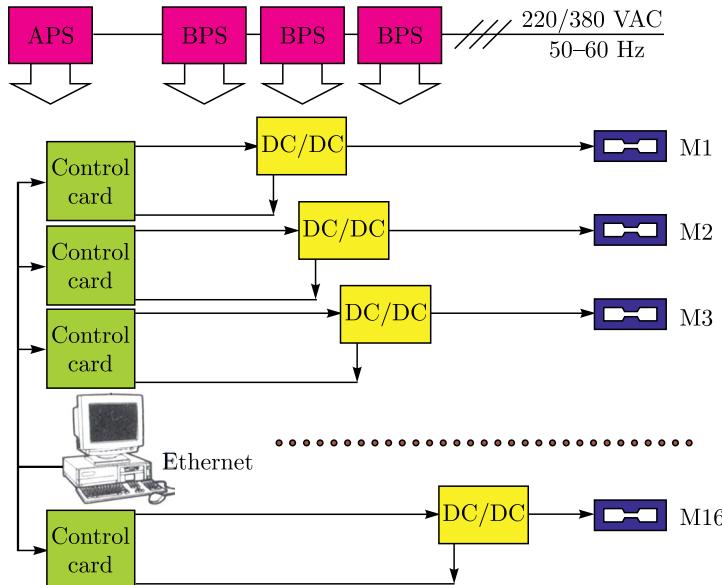


Рис. 3. Структурная схема многоканальных источников тока. BPS, APS — источники буферного и вспомогательного питания; DC/DC — преобразователи постоянного напряжения в постоянный ток; M — магниты

Эти источники тока спроектированы по схеме с двойным преобразованием, структурная схема модуля многоканальных источников приведена на рис. 3. Первичным (буферным) источником являются преобразователи переменного сетевого напряжения в постоянное. Используется общее для всего модуля буферное питание. Вторичными источниками являются импульсные преобразователи постоянного напряжения в постоянный ток, выполненные по мостовой схеме. Регулирование выходного тока осуществляется широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения мостового инвертора. Каждый канал питания управляется индивидуальным контроллером с интерфейсом Ethernet. Источники тока MPS-3-24 спроектированы в 16-канальном модуле, MPS-6-24 — в 8-канальном, MPS-20-50 — одноканальные.

3. ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Особенностью источников переменного тока является большое выходное напряжение, необходимое для формирования нужной скорости роста (спада) тока. Все источники переменного тока спроектированы по схеме с двойным преобразованием (рис. 4). Большая реактивная мощность генерируется вторичным преобразователем, выполненным по схеме мостового инвертора. В качестве накопителя энергии для мостового инвертора используется емкостная батарея. Первичный преобразователь используется как зарядное устройство для емкостной батареи, это устройство на выходе стабилизирует постоянное напряжение при условии, что выходной ток меньше заданного. Такой алгоритм работы позволяет обеспечить равномерность потребления энергии из сети и исключить рекуперацию запасенной в индуктивностях энергии обратно в сеть. Но для этого требуются большие емкостные батареи. Для примера, суммарная запасенная энергия в магнитах семейства BR-BD составляет около 100 кДж. Для питания этих магнитов используются 640 конденсаторов номиналом

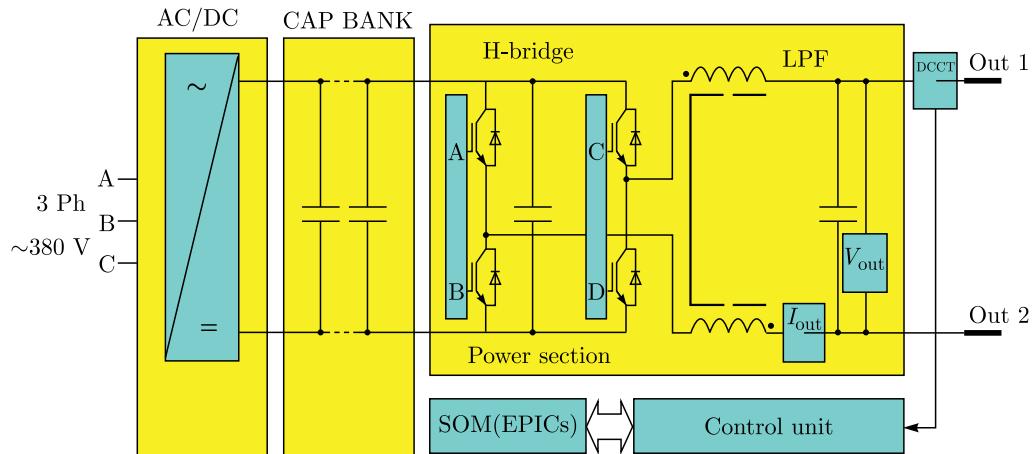


Рис. 4. Структурная схема источников переменного тока. AC/DC — преобразователь переменного напряжения в постоянное; CAP BANK — емкостная батарея; H-bridge — мостовой инвертор; LPF — фильтр низких частот; I_{out} — датчик тока; V_{out} — датчик напряжения; DCCT — бесконтактный измеритель тока

10 мФ и напряжением 450 В. В режиме рекуперации энергии в емкостные батареи напряжение на конденсаторах увеличивается примерно на 10 %. При этом суммарная запасенная энергия в емкостных батареях около 500 кДж.

Для питания дипольных корректоров и секступолей бустерного синхротрона используются многоканальные источники тока MPS-6-60. Эти источники не имеют структурных отличий от MPS-6-24, описанных в разд. 2. Максимальное выходное напряжение 60 В получается за счет использования буферного питания с большим напряжением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все элементы системы питания инжекционного комплекса произведены в полном объеме, прошли наладку и проверку на стендах ИЯФ на предмет соответствия техническому заданию. Оборудование транспортируется в здания ЦКП «СКИФ», где после сборки инжекционного комплекса начнется работа с пучком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gurov S. M., Volkov V. N., Zolotarev K. V., Levichev A. E.* Injection System for the Siberian Ring Source of Photons // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron & Neutron Techn.* 2020. V. 14, Iss. 4. P. 651.
2. *Senkov D. V. et al.* Pulse Generators for Septums and Bumps of Injection and Extraction Systems of NSLS-II Booster // *Proc. IPAC2013*, Shanghai, China, 2013. MOPWA029.
3. *Belikov O. V., Kozak V. R., Medvedko A. S.* Four-Quadrant Power Supplies for Steering Electromagnets for Electron-Positron Colliders // *Proc. XXI Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'08)*, Zvenigorod, Russia, Sept. – Oct. 2008. WEBAU03. P. 244–246.

Получено 28 октября 2024 г.