

ФИЗИЧЕСКИЙ ЗАПУСК СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ МАГНИТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО ЛСЭ

О. В. Беликов¹, В. Р. Козак

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

В 2017 г. состоялся запуск европейского рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL). Разработкой, производством и поставкой системы питания корректирующих магнитов занимался Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера (ИЯФ). Для питания корректирующих магнитов было разработано семь типов прецизионных источников питания (источников тока). Для обеспечения высокой надежности была разработана система «горячей» замены источников питания. Введено в эксплуатацию около 400 источников питания корректирующих магнитов и 50 устройств «горячей» замены, подробности запуска системы питания представлены в этой статье.

The European X-ray Free-Electron Laser (XFEL) was commissioned in 2017. The Budker Institute of Nuclear Physics (BINP) participated in the development, production and delivery of the power system for the corrector magnets. Seven types of high-precision power supplies (current sources) to feed the corrector magnets were developed. To ensure high reliability, a “hot-swap” system was developed for the power supplies. About 400 power supplies for the corrector magnets and 50 hot-swap devices have been put into operation. This article presents details of starting up the power system.

PACS: 29.20.Ej

ВВЕДЕНИЕ

Крупнейший в мире лазер на свободных электронах XFEL создан для генерации ультракоротких рентгеновских импульсов с пиковым значением яркости $5 \cdot 10^{33}$ фотон/(с · мм² · мрад² · 0,1 % BW) и интенсивностью 2700 вспышек в секунду. Структура XFEL содержит линейный сверхпроводящий ускоритель с максимальной энергией электронов 17,5 ГэВ, несколько фотонных туннелей с ондуляторами и экспериментальные помещения [1]. В состав магнитной системы XFEL входят 296 корректирующих магнитов, каждый из которых питается от отдельного прецизионного источника питания. Основные параметры источников питания корректирующих магнитов приведены в таблице.

1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

На рис. 1 приведена структурная схема модуля системы питания. В состав модуля входят от одного до семи основных источников питания и один резервный источник питания. Коммутация источников питания с корректирующими магнитами выполнена

¹E-mail: O.V.Belikov@inp.nsk.ru

Основные параметры источников питания

Параметр	Значение	
Максимальный выходной ток, А	± 5	± 10
Минимальный шаг изменения тока, мкА	19	38
Максимальное выходное напряжение, В	$\pm 24/48/72$	$\pm 30/45/60$
Температурный дрейф выходного тока, 1/К	$< 4 \cdot 10^{-6}$	
Дрейф выходного тока за 12 ч при $T = \text{const}$	$< 5 \cdot 10^{-6}$	
Нелинейность выходного тока	$< 10^{-5}$	
Кратковременная нестабильность выходного тока (до 1 с)	$< 10^{-5}$	
Суммарная погрешность выходного тока (с временем наработки до нескольких лет)	$< 10^{-4}$	
Среднее время наработки на отказ, ч	$> 100\ 000$	
КПД, %	> 90	
Охлаждение	Естественное воздушное	
Габаритные размеры, мм	$432 \times 355 \times 133$	
Масса, кг	12,5	

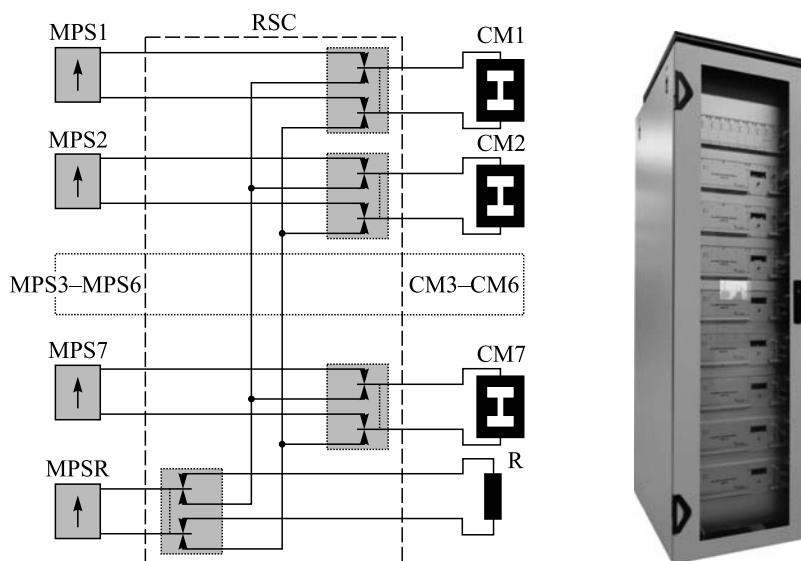


Рис. 1. Модуль системы питания. Слева — структурная схема; справа — внешний вид. MPS — источник питания корректирующих магнитов; RSC — устройство «горячей» замены источников питания; CM — корректирующий магнит; R — эквивалентная нагрузка

через устройство «горячей» замены [2]. В случае поломки одного из основных источников питания по команде от системы управления соответствующий корректирующий магнит может быть переключен системой «горячей» замены на резервный источник питания, и система питания продолжит работу в штатном режиме. Такая структура системы

питания позволяет значительно уменьшить время простоя XFEL в случае поломки источников питания.

Модуль системы питания выполнен в виде шкафа $2000 \times 800 \times 600$ мм конструктива «Евромеханика». Всего на XFEL поставлено 50 шт. модулей системы питания. Из них 48 шт. находятся в эксплуатации и 2 шт. в резерве.

Структурная схема источника питания состоит из двух импульсных преобразователей переменного напряжения в постоянное и постоянного напряжения в постоянный ток. Выходной ток источника питания стабилизируется с использованием прецизионного бесконтактного датчика постоянного тока. Контроль и управление источником питания осуществляется по интерфейсу CANbus. Требуемое качество регулирования обеспечивает петля обратной связи по току, в состав которой входит пропорционально-интегральное звено [3].

2. ИСПЫТАНИЯ

Система питания корректирующих магнитов должна удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости с другим оборудованием XFEL, а также гарантировать долгосрочную стабильность параметров источников питания. Для гарантии качества производства и наладки источников питания испытания серийных экземпляров проводились в два этапа, на специализированном стенде ИЯФ и в составе системы питания XFEL.

Проверка стабильности выходных параметров прототипов источников питания проводилась в ИЯФ и DESY. Для гарантии сохранения параметров источников питания в течение периода эксплуатации на этапе проектирования прототипов закладывался трехкратный запас прецизионных параметров. Так, измеренная дисперсия выходного тока прототипа источника питания составила $2,2 \cdot 10^{-6}$ за 60 ч работы в диапазоне температур окружающей среды $\pm 0,5$ К, а среднеквадратичное измеренное значение пульсаций выходного тока составило $2,8 \cdot 10^{-6}$ в полосе частот от 1 Гц до 1 кГц. Проверка соответствия электромагнитной совместимости прототипов источников питания проводилась в лаборатории ЭМС «TÜV NORD» (г. Гамбург). Проверялась способность источников питания работать в условиях определенной электромагнитной обстановки с сохранением стабильности их параметров и без создания другим электронным устройствам недопустимых электромагнитных помех [4].

Каждый произведенный источник питания после наладки и паспортизации проходил проверку в течение 24 ч на многоканальном автоматизированном стенде [5]. В процессе проверки источник питания генерировал ток трапецеидальной формы с временем перестройки 1 мин. Значение выходного тока и температуры окружающей среды на стенде дополнительно контролировалось внешними прецизионными измерителями, при этом по отдельности анализировался дрейф параметров источников питания на положительной и отрицательной «полочках» трапеции. На рис. 2 показано информационное окно программного анализа параметров одного из произведенных источников питания. Такое тестирование позволяло выявить скрытые дефекты, которые не были обнаружены в процессе наладки источников питания.

По завершении монтажных работ системы питания корректирующих магнитов все источники питания проходили приемочные испытания на реальных нагрузках XFEL. Каждому испытываемому источнику питания специальной программой задавался трапецеидальный ток (рис. 3). В реальном режиме времени измерялись выходные параметры

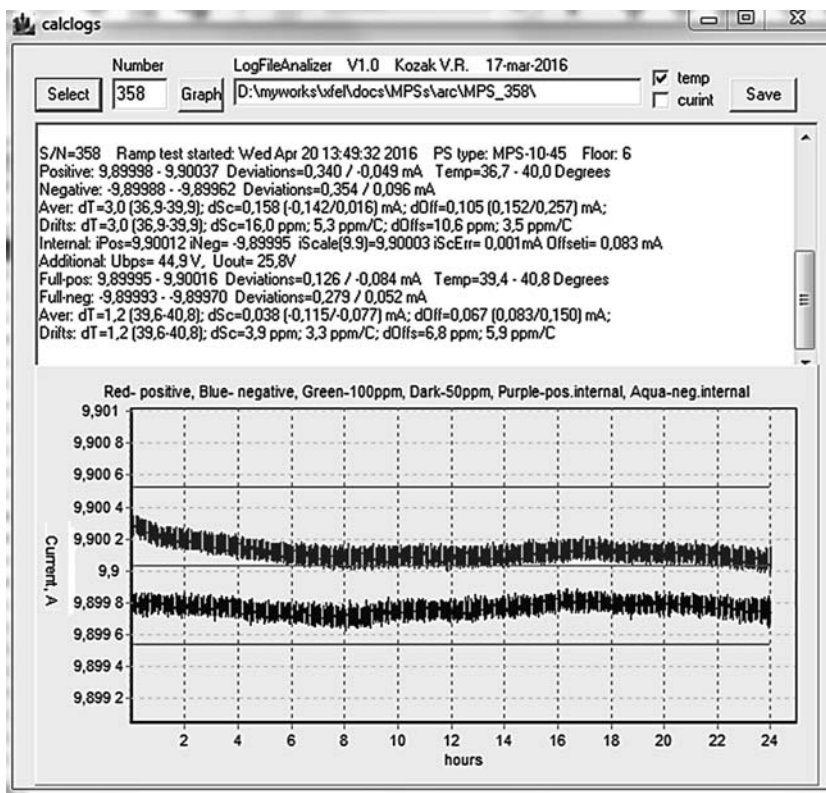


Рис. 2. Информационное окно программного анализа. Сверху — протокол тестирования источника питания; снизу — график дрейфа выходного тока на положительной и отрицательной «полочках» трапеции

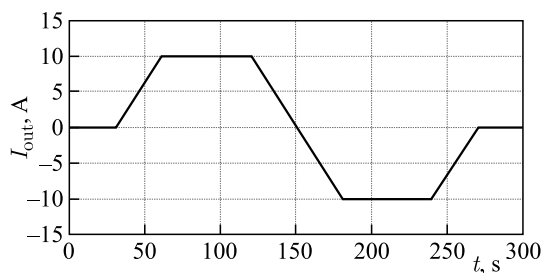


Рис. 3. Временная зависимость выходного тока источника питания

источника питания (ток, напряжение, пульсации и т. д.). Измерения проводились в динамике (при перестройке тока) и в статике (на «полочках» трапеции). Анализ полученных данных позволял выявить повреждения источников питания в результате транспортировки, коммутационные ошибки финальной сборки системы питания и даже неисправности корректирующих магнитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успех запуска больших физических установок во многом зависит от предпусковой отлаженности отдельных систем. Описанные тестовые процедуры позволили выявить все неприятности на этапе отладки системы питания и подготовиться к работе с пучком. Запуск системы питания завершился в ноябре 2016 г. Первый электронный пучок был ускорен в линейном ускорителе XFEL в январе 2017 г., а в мае 2017 г. была получена генерация рентгеновского излучения.

Работа выполнена при поддержке грантом 14-50-00080 Российского научного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Decking W. et al.* European XFEL Construction Status // Proc. of FEL-2014, Basel, Switzerland, Aug. 2014. WEB03. P. 623.
2. *Belikov O. et al.* Hardware for Increasing Reliability of the Power Supply System for Corrector Magnets of the European XFEL // Proc. of RuPAC-2016, St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 578–580.
3. *Belikov O. V., Kozak V. R., Medvedko A. S.* Power Supply System for Corrector Magnets of the European X-Ray Free-Electron Laser // Proc. of SFR-2016, Novosibirsk, Russia, July 4–8, 2016; Phys. Procedia 2016. V. 84. P. 108–112.
4. *Belikov O. et al.* Electromagnetic Compatibility of the Power Supply System for Corrector Magnets of the European XFEL // Proc. of RuPAC-2016, St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 581–583.
5. *Беликов О. В. и др.* Аппаратные и программные средства повышения качества прецизионных источников тока для крупных физических установок // Сибирский физ. журн. 2017. Т. 12, № 1. С. 5–12.