

О. В. Беликов^{1,2}, В. Р. Козак¹, А. С. Медведко¹

¹ *Институт ядерной физики им Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

O.V.Belikov@inp.nsk.su

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПИТАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Магнитная система современных ускорительных комплексов требует множества электромагнитов, предназначенных для коррекции положения пучка заряженных частиц. Как правило, каждый корректирующий электромагнит питается от отдельного прецизионного источника питания. Использование большого количества прецизионных источников снижает надежность работы системы питания. Одно из решений, позволяющих увеличить надежность, является проектирование системы питания с избыточностью. Для этого в систему добавляются резервные источники питания и устройства «горячей» замены. В случае неисправности одного из источников питания соответствующий корректирующий электромагнит дистанционно переключается на резервный источник питания, и система продолжает функционировать. В статье описывается аппаратное решение, примененное для увеличения надежности работы системы питания корректирующих электромагнитов Европейского рентгеновского лазера на свободных электронах.

Ключевые слова: надежность, прецизионные источники питания, лазеры на свободных электронах.

Введение

В 2017 г. состоялся запуск Европейского рентгеновского лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Разработкой, производством и поставкой системы питания корректирующих электромагнитов занимался Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Общая длина Европейского ЛСЭ составляет 3,4 км. Для коррекции положения электронного пучка используются 296 корректирующих электромагнитов, каждый из которых питается от индивидуального прецизионного источника питания [1], основные параметры которых приведены в таблице.

Неисправность даже одного источника питания корректирующих электромагнитов значительно влияет на качество электронно-

го пучка. При непрерывной работе Европейского ЛСЭ расчетное количество поломок составит 1 отказ за 14 дней. Источники питания распределены по длине комплекса, и замена неисправного блока требует заметного времени. При расчетном времени устранения неисправности потери времени признаны неприемлемыми.

Структура модуля питания

Для уменьшения времени простоя Европейского ЛСЭ было решено использовать систему с избыточностью, предусматривающую введение в группу источников питания (модуль) резервного источника, который может быть включен вместо любого другого. Структура такого модуля показана на рис. 1. В нормальном режиме работы семь источников питания подключены к

корректирующим электромагнитам. Восьмой источник питания (резервный) подключен к эквивалентной нагрузке, что позволяет контролировать его исправность в процессе эксплуатации. В случае поломки одного из основных источников питания соответствующий корректирующий электромагнит может быть переключен системой управления на резервный источник питания, и система продолжит работу в штатном режиме.

Увеличение надежности системы питания

Для питания корректирующих электромагнитов Европейского ЛСЭ используется 48 модулей, каждый из которых имеет резервный источник питания. При использовании системы резервирования неисправность в системе питания корректирующих электромагнитов, требующая оперативного вмешательства персонала, может наступить только при поломке двух и более источников питания из одного модуля. Среднестатистическое время наработки на отказ системы питания с избыточностью:

$$t_{MTBF} = -\frac{t}{\ln(P)}, \quad (1)$$

где P – вероятность того, что за время t все источники питания в системе питания проработают без отказов;

$$P = P_{mod}^m,$$

здесь P_{mod} – вероятность того, что за время t модуль питания отработает без отказа, m – количество модулей в системе питания;

$$m = \frac{N}{k},$$

где N – количество корректирующих электромагнитов;

$$N = 296;$$

$$P_{mod} = P_n + P_k,$$

где $P_n = P_1^n$ – вероятность того, что за время t все n источников питания в модуле проработают без отказов;

$$n = 8;$$

$$P_k = C_{n-k}^n \cdot P_1^k \cdot Q_1^{n-k} -$$

вероятность сложного события, заключающегося в том, что за время t в модуле из n источников питания k проработают без отказов, при условии поломки любых $(n - k)$ источников питания;

Параметры источников питания

Параметр	Значение
Максимальный выходной ток, А	$\pm 5 / 10$
Максимальное выходное напряжение, В	$\pm 70 / 60$
Допустимая кратковременная нестабильность выходного тока (до 1 с)	$< 10^{-5}$
Допустимые долговременные отклонения выходного тока (от 1 с до нескольких лет)	$< 10^{-4}$
Среднестатистическое время наработки на отказ, ч	$> 10^5$

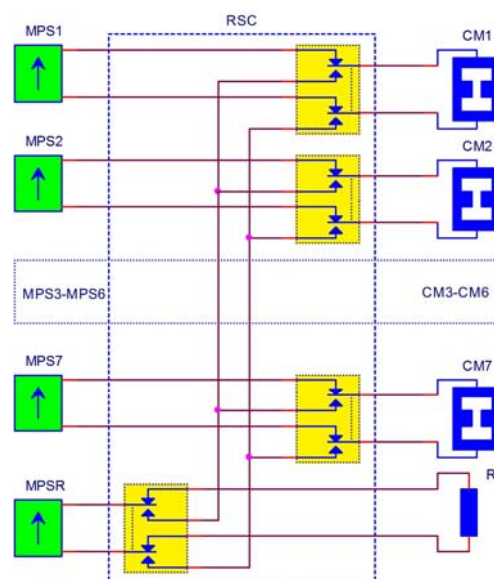


Рис. 1. Структурная схема модуля питания. MPS – источник питания корректирующих электромагнитов; RSC – крейт системы «горячего» резервирования; CM – корректирующий электромагнит; R – эквивалентная нагрузка

$$k = 7;$$

$$Q_1 = 1 - P_1 -$$

вероятность поломки одного источника питания;

$$P_1 = e^{-\frac{t}{t_{MTBF,1}}} -$$

вероятность того, что за время t один источник питания проработает без отказа;

$$t_{MTBF,1} = 10^5 -$$

среднестатистическое время наработки на отказ (ч) одного источника питания;

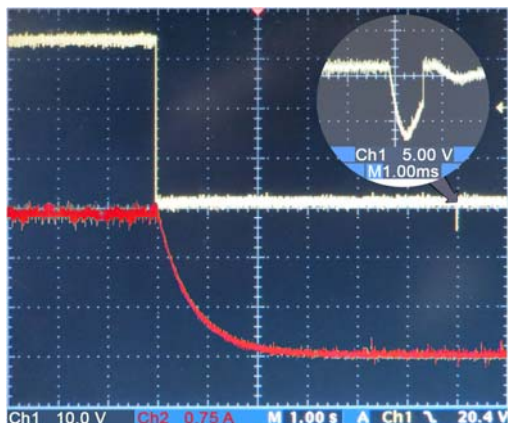


Рис. 2. Осциллограмма сигналов



Рис. 3. Крейт системы «горячего» резервирования



Рис. 4. Шкаф системы питания

$$C_{n-k}^n = \frac{n!}{(n-k)! \cdot k!} -$$

число событий.

Вычисленное по формуле (1) значение среднестатистического времени наработки на отказ (ч) системы питания с избыточностью

$$t_{MTBF} \approx 11949,$$

что соответствует примерно 7 поломкам за 10 лет работы. При этом надежность работы системы питания с избыточностью в 14 % возрастает примерно в 35 раз.

Следует отметить, что принципиальная простота решения осложняется различными технологическими особенностями. Так, например, неисправный источник питания может оказаться неуправляемым и работать с максимальным выходным током в нагрузке. Энергия, запасенная в электромагните (индуктивностью до 15 Гн), довольно высока и до момента переключения должна быть выведена из нагрузки с целью предотвращения возникновения дугового разряда. Для этого предусмотрен полупроводниковый ключ и ряд других защитных цепей. Полупроводниковый ключ закорачивает основной источник питания до переключения нагрузки. Выходное напряжение источника питания показано на рис. 2 (Ch1). Далее следует аппаратная задержка 6 с, за время которой ток в нагрузке (Ch2) уменьшается до величины, позволяющей размыкать нагрузку. В момент переключения нагрузки амплитуда напряжения составила 7 В, что вполне допустимо.

Конструктивное исполнение

Крейт системы «горячего» резервирования выполнен в конструктиве «евромеханика» $432 \times 355 \times 133 \text{ мм}^3$ (рис. 3).

Модуль системы питания расположен в шкафу конструктива евромеханики $2000 \times 800 \times 600 \text{ мм}^3$ (рис. 4). В составе модуля до 7 источников питания корректирующих электромагнитов, один резервный источник питания и крейт системы «горячего» резервирования. Контроль и управление модулем питания выполнены в соответствии со стандартом CANbus [2].

Результаты

Осенью 2016 г. был произведен финальный запуск системы питания корректирующих электромагнитов на Европейском ЛСЭ. В настоящее время все поставленное оборудование находится в работе. Первый год эксплуатации описанной системы не выявил каких-либо серьезных проблем, что подтверждает произведенные расчеты.

Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность д-ру техн. наук Э. А. Куперу за плодотворное участие в работе и помощь при подготовке статьи.

Список литературы

1. *Belikov O. et al.* Power supply system for corrector magnets of the European X-Ray Free-Electron Laser // *Physics Procedia*. 2016. Vol. 84. P. 108–112.
2. *Kozak V., Belikov O.* Controller of Power Supplies for Corrector Magnets of European XFEL // XXV Russian particle accelerator conference (RuPAC-2016): Proc. JACoW 2016 – THPSC078. Saint Petersburg, 2016. P. 715–717.

Материал поступил в редколлегию 05.10.2017

O. V. Belikov^{1,2}, V. R. Kozak¹, A. S. Medvedko¹

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics
11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090 Russia Federation*

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

O.V.Belikov@inp.nsk.su

HARDWARE FOR INCREASING RELIABILITY OF THE POWER SUPPLY SYSTEM FOR CORRECTOR ELECTROMAGNETS

A magnet system of modern accelerator facility requires many controlled electromagnets for correcting a beam location. Every corrector electromagnet is fed by personal precise power supply usually. Using many precise power supplies reduces the reliability of power supply system. One of solution for increasing reliability is designing the power supply system with redundancy. It may be implemented by addition of reserved power supplies and «hot swap replacement» units. When some power supply is failed the control system switches this magnet to reserved power supply, redirect the data flow and all operations is going on. The paper describes the hardware solution used for increasing reliability of power supply system for European free electron laser.

Keywords: reliability, precise power supply, free electron lasers.