

УДК 621.3.072.1 + 539.1.076

О. В. Беликов^{1,2}, **Е. В. Быков**^{1,2}, **Е. А. Гусев**¹, **В. Р. Козак**¹

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*

kozak@inp.nsk.su

АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА КРУПНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Описываются аппаратные и программные средства, а также алгоритмы тестирования, позволяющие повысить качество изготовления источников тока для физических установок. В функции разработанного оборудования и программ входит контроль основных параметров источников тока, а также обнаружение дефектов производства и наладки. Важный компонент – 7-канальная система измерения тока, имеет дрейф шкалы менее 3 ppm/°C. Функционирование разработанной системы рассматривается на примере тестирования прецизионных источников тока для международного проекта European XFEL.

Ключевые слова: прецизионные источники тока, ускорители, лазеры на свободных электронах, автоматизированное тестирование.

Введение

В последние десятилетия в мире интенсивно развиваются ускорительные технологии. Для их использования сооружаются как небольшие установки, так и целые комплексы стоимостью миллиарды евро. Если ранее такие установки в основном строились для научных исследований, то в последнее время большинство проектов являются прикладными: источники синхротронного излучения, лазеры на свободных электронах, комплексы для терапии онкологических заболеваний и пр. Высокая стоимость установок и их эксплуатации обуславливает определенные требования, предъявляемые к отдельным системам и их компонентам. Это касается как надежности (времени наработ-

ки на отказ), так и долговременной стабильности.

Существенной составляющей ускорительных установок является магнитная система и ее источники питания. Количество источников питания в современных установках составляет несколько сотен и тысяч. В частности, проект European XFEL [1] включает 1 800 источников тока различных типов [2]. Возрастающие требования к качеству ускоряемых пучков частиц определяют и требования к точности и стабильности источников питания магнитной системы.

Для сооружаемого в Гамбурге лазера на свободных электронах (European XFEL) Институт ядерной физики СО РАН разработал семейство источников тока для корректирующих магнитов [3]. Абсолютная точность

Беликов О. В., Быков Е. В., Гусев Е. А., Козак В. Р. Аппаратные и программные средства повышения качества прецизионных источников тока для крупных физических установок // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 1. С. 5–12.



Рис. 1. Источник тока

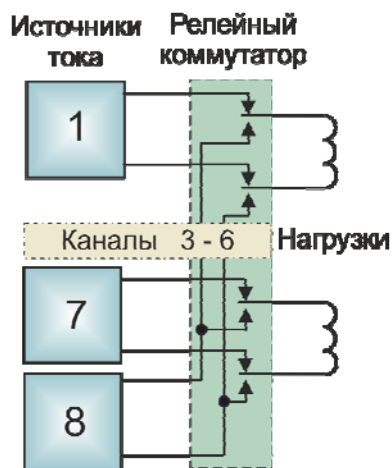


Рис. 2. Схема коммутации источников тока в стойке

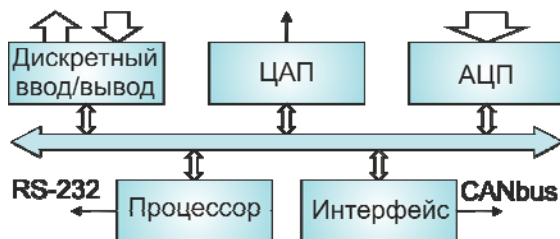


Рис. 3. Структура контроллера

установки выходного тока не хуже 10^{-4} , а уровень пульсаций выходного тока в полосе от 0 до 1 000 Гц не превышает величину 10^{-5} . Для использования в проекте European XFEL ИЯФ СО РАН произвел и поставил около 400 источников.

Настройка такого количества прецизионных источников тока потребовала создания специальных стендов и обучения операторов-наладчиков.

Для обнаружения неизбежных ошибок и упущений в процессе настройки приемка настроенных источников была автоматизирована.

Источники тока и управляющие контроллеры

Источники тока выполнены в конструктиве евромеханики (рис. 1).

Основные параметры источников тока:

Параметр	Значение
Выходной ток, А	5 или 10
Выходное напряжение, В	24÷72
Абсолютная погрешность, ppm	< 100
Пульсации в полосе частот до 1 кГц, ppm	< 10
Среднее время наработки на отказ, ч	> 100 000
Время перестройки от 0 до максимального тока, с	≈ 30

Для обеспечения высокой надежности источников тока были использованы:

- компоненты с повышенной надежностью;
- ограничение сверху температуры силовых компонентов (не выше 70 °С);
- выходная приемка (тестовый «прогон») источника питания с контролем основных параметров;
- резервирование и оперативное переключение источника, вышедшего из строя, на резервный источник;
- приемный тест на установке.

Строго говоря, четвертый пункт не повышает надежность источника. Однако возможность оперативно заменить источник, вышедший из строя, минимизирует время простоя установки (до нескольких секунд) и фактически эквивалентна повышению надежности собственно источника.

Резервирование реализуется следующим образом. В каждой стойке с источниками питания размещается управляемый от ЭВМ релейный коммутатор (рис. 2), позволяющий отключить нагрузку от поврежденного источника тока и подключить ее к резервному («заменить» источник тока). Каждая стойка содержит до 7 источников тока и один резервный источник (номер 8).

При проектировании источника питания разработчиками был использован модульный подход, что позволило выделить ряд функций в отдельные модули. Это, в свою очередь, значительно облегчило разработку, производство и наладку оборудования, а также позволило использовать некоторые

модули в других приложениях. Приведем список модулей источника:

CPS01 – универсальный контроллер;

BPS – первичный (буферный) источник напряжения;

DR – модуль, реализующий цифровые функции нижнего уровня;

FB – модуль малосигнальных аналоговых цепей;

OLED – модуль индикации.

Основной функцией контроллера является управление компонентами источника тока. Структура контроллера источника тока показана на рис. 3.

Набор аппаратных ресурсов контроллера типичен для подобных приложений:

- 6-канальный 24-разрядный прецизионный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) со скоростью измерения до 4 000 отсчетов в секунду;

- 18-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП);

- 8-разрядные порты дискретного ввода / вывода;

- процессор;

- сетевой интерфейс (CANbus).

Программное обеспечение контроллера реализует следующие функции:

- управление и контроль компонентов источника питания;

- взаимодействие с системой управления, предоставление ей набора функций как для взаимодействия с индивидуальным источником, так и для управления группой источников широкополосными командами;

- примитивы нижнего уровня, позволяющие управляющим программам использовать ресурсы контроллера как независимые устройства общего назначения.

Набор примитивов нижнего уровня в значительной мере совпадает с набором примитивов, разработанным ранее для контроллеров источников питания в ИЯФ СО РАН [4].

При разработке контроллера изначально предполагалось использовать его в качестве измерителя при создании наладочных стендов для источников тока. Поэтому построению аналого-цифрового тракта было уделено особое внимание. В отличие от предыдущих разработок [4], 24-разрядный АЦП нового контроллера имеет нелинейность в рабочем диапазоне напряжений менее 10 ppm и дрейф шкалы не более 1 ppm/°C. Разрешение

АЦП зависит от скорости преобразования и достигает значения 1 ppm. Кроме того, этот же контроллер используется для управления релейным коммутатором.

Тестовый «прогон»

При производстве электроники повышенной надежности общепринятой практикой является «прогон» устройств в течение какого-то времени [5]. В ускорительных центрах обычно такое тестирование производится на протяжении 24 ч [2]. Основной целью этого «прогона» является прохождение начала «кривой отказа» [6] и выявление дефектов, не обнаруженных при настройке аппаратуры. Как правило, в таких тестах контролируется несколько ключевых параметров. Однако обязательным условием является использование внешнего калиброванного измерителя тока [7].

Для прецизионных измерений тока в ИЯФ СО РАН разработана 7-канальная измерительная система. Ядром этой системы является крейт для прецизионного измерения выходного тока источников. По соединительным разъемам этот крейт совместим с релейным коммутатором стойки с источниками тока.

Обеспечение совместимости по разъемам с коммутатором дает возможность произвести прецизионные измерения качества источников не только в тестовой стойке, но и на установке, просто заменив крейт коммутатора в стойке измерительным крейтом (рис. 4).

Измерительный крейт содержит 7 каналов, построенных на основе DCCT (трансформатор постоянного тока [7]) серии



Рис. 4. Стойка с коммутатором (слева) и с измерительным крейтом (справа)

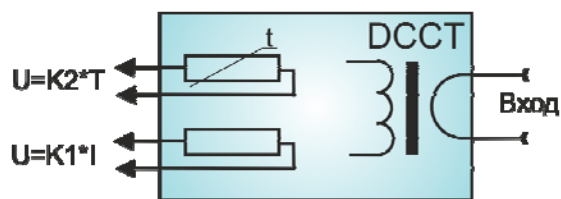


Рис. 5. Схема одного канала измерительного крейта

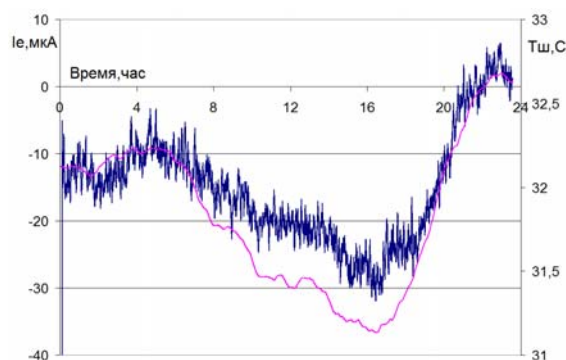


Рис. 6. Ошибка измерений тока канала (синий) и измерение температуры окружающей среды (красный)

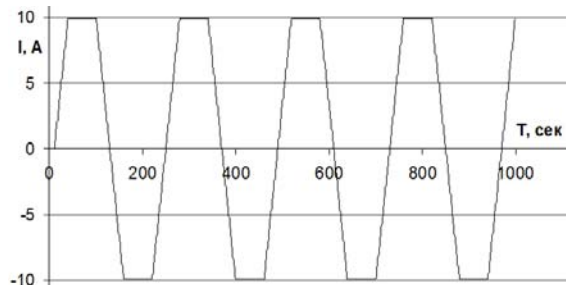


Рис. 7. Формат тока во время прогона

Ultrastab (производство LEM) и прецизионного шунта VPR221 (производство Vishay). На рис. 5. показана схема одного измерительного канала.

В качестве прецизионного вольтметра используются контроллеры источника тока (3 модуля) в режиме многоканального АЦП. По каждому измерительному каналу АЦП производит измерения напряжения на шунте (фактически ток) и температуру шунта с термодатчика, установленного на нем.

Все компоненты измерительного тракта имеют высокую линейность и малый уровень дрейфа ($2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$). Тем не менее измерительный крейт был проверен с помощью

прецизионного калибратора 5730A (Fluke)¹. Во время проверки все 7 измерительных каналов соединялись последовательно и обеспечивали измерения одного и того же тока. Измерения проводились для трех значений тока: +2, 0 и -2 А. На рис. 6 показаны ошибка измерений тока и температура на шунте для «худшего» канала. Мощность, рассеиваемая измерительным крейтом, невелика, соответственно температура шунта фактически равна температуре воздуха в тестовом помещении.

Из графиков видно, что дрейф измеренного значения тока составляет около 30 мкА при изменении температуры на $1,5^\circ$. Аналогичные измерения тока отрицательной полярности и «нулевого» тока подтвердили, что дрейф всех измерительных каналов не превышает величины $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Процедура «прогона» состоит из двух фаз. В первой фазе источник питания формирует трапециевидную форму тока (рис. 7). В этой фазе, длительностью 24 ч, главный интерес представляют параметры установившегося тока (на «полочке»).

После завершения тестирования с трапециевидной формой выходного тока проводятся испытания источника тока на полной выходной мощности. Эта фаза длится 1 ч.

Управление тестируемыми источниками тока, сбор и архивирование измеренных значений производится специализированным программным обеспечением. Вся информация записывается набором файлов в отдельную директорию для каждого источника тока. По современным меркам объем данных невелик: на один источник не более 20 Мбайт. Эти файлы хранятся в системе EDMS (система электронного документооборота). Кроме того, программное обеспечение контролирует величину отклонения тока источника от заданного значения и величину шумов на «полочках». По завершении тестов максимальные значения контролируемых величин записываются в отдельный файл протокола тестирования.

Анализ данных

Формально, настроенный источник тока полностью удовлетворяет требованиям ис-

¹ 5730A-Multifunction Calibrator. Operators Manual. Fluke, 2013.

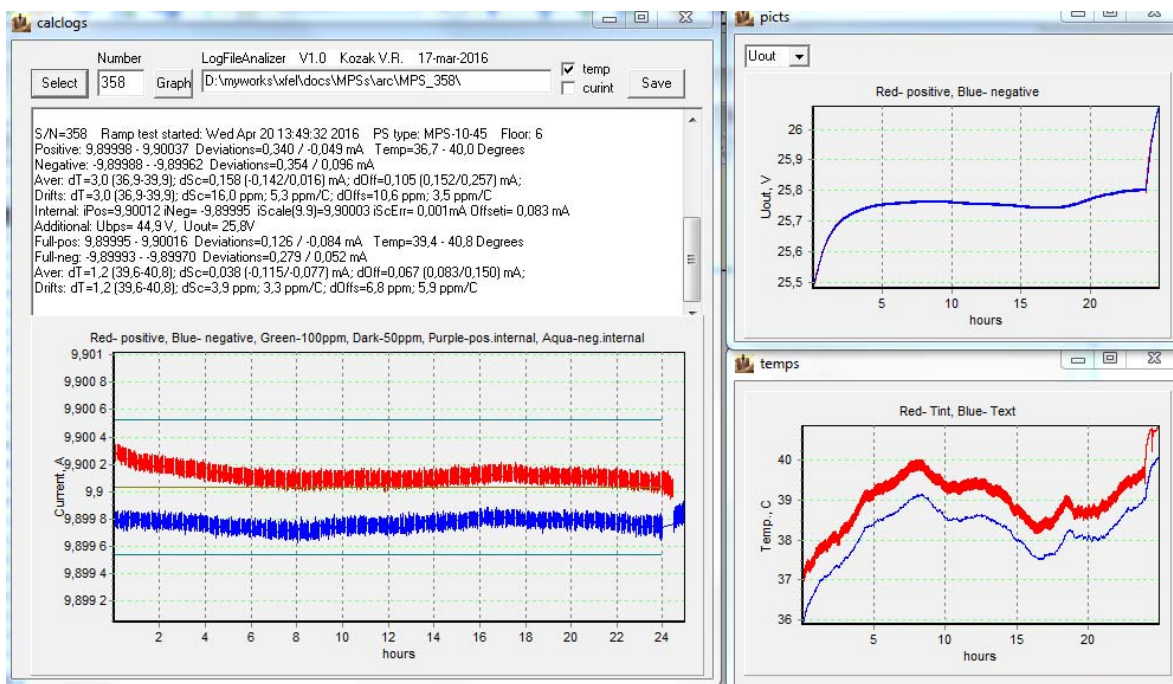


Рис. 8. Информационные окна программы анализа файлов

ходных спецификаций и сопровождается паспортом, подтверждающим это результатами соответствующих измерений. Программа, осуществляющая «прогон», проводит контрольную проверку, обнаруживая брак в наладке.

Однако опыт ведущих научных центров (CERN, DESY и др.) свидетельствует, что для многолетней надежной работы оборудования желателен дополнительный анализ характеристик источников тока [5; 7]. Так, например, если ранее в рамках регламентных работ специальная программа проверяла источники на соответствие спецификациям [8], то сейчас все чаще программы анализируют изменение параметров (ошибку задания тока, уровень пульсаций и т. п.) относительно архивных измерений и «предсказывают» нарушение спецификаций.

Дополнительный анализ целесообразно производить отдельными программами, не связанными с программой «прогона». Рисунок 8 иллюстрирует работу одной из таких программ в процессе реального анализа данных от тестируемого источника тока.

Эта программа анализирует поведение источника на «полочках» сигнала (положительной и отрицательной). Информация отображается как в графическом виде, так и в текстовом. Графических окон может быть

открыто до 3-х. В одном из окон отображается поведение тока на «полочках», измеренное 7-канальной системой. Обычно одновременно показываются результаты измерений температуры внутри тестируемого источника и температуры соответствующего шунта измерителя тока. В третьем окне можно просмотреть поведение всех остальных сигналов (напряжение буферного источника питания, сигнал ошибки и т. д.).

Знакопеременные величины отображаются без знака – отрицательная величина отображается вместе с положительной, но в инверсном виде. Это значительно увеличивает наглядность отображения информации. Разность между двумя линиями тока показывает величину смещения нуля источника (удвоенную), а величина средней линии (полусуммы линий) дает фактическое значение масштаба. Даже при беглом взгляде определяется качество настройки источника тока.

Для облегчения восприятия информации на графике отмечаются реперные уровни отклонения – как максимально допустимые (в нашем случае ± 100 ppm), так и в два раза меньшие (желательное качество настройки, ± 50 ppm).

Поведение температуры внутри источника питания на рис. 8 объясняется изменени-

ем температуры «за окном». Температурная изоляция любого помещения не является идеальной, и соответственно внешняя температура отражается на температуре внутри помещения.

В конце теста программное обеспечение переводит стенд в режим полной мощности. Дополнительное тепловыделение приводит к относительно быстрому температурному скачку.

Сопоставление выходного тока источника (в основном графическом окне) с температурой, позволяет вычислить величину дрейфа тока. При небольших изменениях температуры среды «шумы» измерений тока препятствуют простому вычислению величины дрейфа. Однако программа способна, усреднив измерения, вычислить эту величину с высокой точностью. Хорошее разрешение позволяет использовать естественное изменение температуры окружающей среды для измерения температурного дрейфа источников.

Кроме графического вывода, программа отображает в информационном окне различную дополнительную информацию – как непосредственно измеренную (напряжение буферного источника BPS, напряжение на нагрузке и пр.), так и вычисленную (отклонение какого-либо параметра от номинального, величину дрейфа и т. п.). Накопленная информация может быть записана в текстовый файл-журнал.

Один рабочий цикл источника (трапецидальный двухполярный импульс, см. рис. 7) регистрируется в осциллографическом режиме работы контроллера источника. В этом режиме оцифровывается один канал (выходной ток) со скоростью до 4 кГц, что позволяет регистрировать пульсации выходного тока в полосе частот, оговоренной в спецификациях.

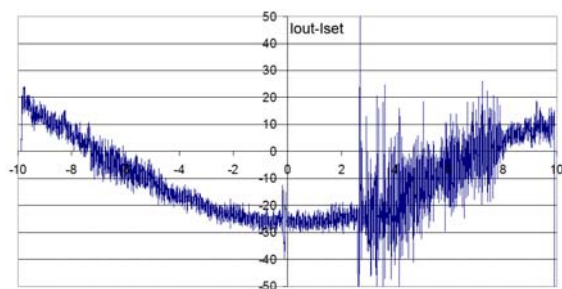


Рис. 9. Ошибка выходного тока в процессе перестройки

На рис. 9 показан пример возможного дефекта источника тока, который обнаруживается этим тестом. В осциллографическом режиме регистрировалась величина ошибки выходного тока при переходе с $-9,9$ до $+9,9$ А.

Из графика видна вполне допустимая нелинейность (тем более для процесса перестройки). Однако в области положительных сигналов источник питания имеет недостаточный запас устойчивости и склонен к самовозбуждению. В процессе настройки источника оператор работает фактически с тремя точками ($-9,9$; 0 ; $+9,9$ А), где данный экземпляр ведет себя адекватно. Кроме того, подобные дефекты могут иметь узкую зону неустойчивости, и трудно рассчитывать на «ручной» поиск их.

Тесты на установке

Источники питания, произведенные и протестированные в Новосибирске, транспортируются за несколько тысяч километров на установку-потребитель. Отдельно от них транспортируются радиостойки с подготовленным внутривстроенным монтажом. Окончательно система питания собирается и подключается к реальным нагрузкам уже непосредственно на установке. В такой системе может возникать масса потенциальных дефектов. Это не обнаруженные ошибки в соединительных кабелях, некачественно сделанный монтаж межсоединений и т. п. Кроме этого, возможно возникновение дефектов в процессе транспортировки. Как следствие, после окончательной сборки всей системы необходимо произвести приемный тест установки. Эта практика принята для большинства крупных физических установок [9].

Для теста приемки использовался тот же алгоритм, что и для процесса «прогона». Разница состоит в том, что в финальном тесте работа ведется с одним источником, и обмеряется один двухполярный импульс выходного тока.

Обеспечение высокой долгосрочной стабильности источников тока является непростой задачей. «Старение» прецизионных компонентов – один из существенных факторов, препятствующих достижению этого. Например, для источника опорного напряжения AD688, используемого в контроллере, в паспорте приводится величина 15 ppm

за первую тысячу часов. Как следствие, на установках с высокими требованиями к долгосрочной стабильности периодически производится калибровка источников питания. Для этого используются калиброванные измерители тока и специальная процедура, включающая в себя предварительный прогрев источника, подстройку и контрольное тестирование [7].

Разработанная авторами многоканальная измерительная система позволяет значительно сократить время калибровки, поскольку операции производятся одновременно для 7-ми источников.

Заключение

На момент написания статьи все источники для XFEL были произведены, протестированы и сданы в эксплуатацию. Установка XFEL находится в состоянии поэтапной приемки различных подсистем [10]. Большая часть источников тока уже используется в реальной работе с ускорителем [11].

Разработанные аппаратные и программные средства позволили уменьшить влияние человеческого фактора на качество изготовления источников тока для XFEL и гарантировать соответствие их параметров требованиям спецификаций.

Средства, разработанные для этого проекта, обладают значительной гибкостью и при незначительных модификациях могут быть использованы при производстве других типов источников тока для ускорительных систем.

Список литературы

1. *Decking W. et al.* European XFEL construction status // FEL-2014. Basel, Switzerland, 2014. WEB03. 623 p.
2. *Eckoldt H. J.* Specification of Power supplies at DESY // 5th Workshop on Power Converters for Particle Accelerators. Madrid, Spain, 2016.
3. *Belikov O., Kozak V., Medvedko A.* Power supply system for corrector magnets of the European X-Ray Free-Electron Laser. // Synchrotron and Free electron Radiation: generation and application (SFR-2016): Book of Abstracts. Novosibirsk, 2016.
4. *Kozak V. R., Kuper E. A.* Multifunctional Devices for Control System of Accelerator Fa-

cilities // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2015. № 1. P. 12–21.

5. *Holland K.* FRIB Power Supplies Status Update, Specifications, Testing Plans, and Test Results // 5th Workshop on Power Converters for Particle Accelerators. Madrid, Spain, 2016.

6. *Коняхин И. А.* Методы и средства статистического моделирования ОЭС: Учеб. пособие. СПб., 2005.

7. *Bastos M. C.* High precision specification and test of power converters at CERN // 5th Workshop on Power Converters for Particle Accelerators. Madrid, Spain, 2016.

8. *Berkaev D. E. et al.* System of power supply ripples measurement for VEPP-2000 collider // Proc. of XII Intern. Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS 2009). Kobe, Japan, 2009.

9. *Richner S.* Automated power supply commissioning // 5th Workshop on Power Converters for Particle Accelerators. Madrid, Spain, 2016.

10. *Aghababayan A. et al.* The large scale European XFEL control system: overview and status of the commissioning // ICALEPCS. Melbourne, Australia, 2015. P. 5–8.

11. *Fröhlich L., Bartkiewicz P., Walla M.* Magnet server and control system database infrastructure for the European XFEL // ICALEPCS. Melbourne, Australia, 2015. P. 701–704.

O. V. Belikov^{1,2}, E. V. Bykov^{1,2}, E. A. Gusev¹, V. R. Kozak¹

¹ *Institute of Nuclear Physics of SB RAS
11 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

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

kozak@inp.nsk.su

HARDWARE AND SOFTWARE FOR IMPROVING QUALITY OF PRECISE POWER SUPPLIES FOR LARGE PHYSICAL INSTALLATION

There are presented hardware, software and testing algorithms allowing improve the quality of production of the current sources for physical installations. Developed test system monitors main current source parameters and detects different defects of production and tuning. The multichannel system for measurement of DC current has the range drift less than 3 ppm/°C. Using of presented hardware and software is reviewed on the testing power supplies for European XFEL.

Keywords: precise current sources, accelerators, free electron lasers, automated testing.