

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО МАГНИТА МАСС-СЕПАРАТОРА С-2

*Н. Е. Гурин, А. В. Курякин, А. Д. Тумкин, С. В. Фильчагин,  
О. П. Вихлянцев, Ю. В. Рычков, Н. В. Катаев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по модернизации систем электромагнитного масс-сепаратора С-2. Одной из таких критически важных систем является система управления током магнита. Диспергирующий магнит масс-сепаратора предназначен для создания магнитного поля с напряженностью  $3,6 \times 10^5$  А/м и конфигурацией, необходимой для разделения изотопов [1]. Качество разделения изотопов элемента зависит от стабильности магнитного поля сепаратора. Качество магнитного поля, в свою очередь, определяется качеством питания электромагнита.

Действующая схема управления током магнита построена на принципе мотор-генератор и состоит из мотора, генератора, измерительного шунта, шунта стабилизации, схемы сравнения, модулятора и четырехдекадного потенциометра, устанавливающего опорное напряжение. Частота вращения асинхронного двигателя в свою очередь регулируется через обратную связь от тока, протекающего в магните. Установка тока магнита производится оператором с пульта управления масс-сепаратором С-2 посредством галетных переключателей. Недостатком данной схемы управления является то, что при существующем дрейфе тока на уровне  $\sim 50$  мА/час его необходимо постоянно вручную компенсировать в процессе разделения изотопов.

Результатом разработки и изготовления автоматизированной системы управления (АСУ) током диспергирующего магнита масс-сепаратора С-2 является:

- повышение точности установки и поддержания тока магнита (исключение ручного управления);
- уменьшение пульсации выходного тока (за счет использования современного источника тока).

## Диспергирующий магнит масс-сепаратора С-2

Масс-сепаратор С-2 предназначен для лабораторного разделения изотопов химических элементов. Разделение изотопов осуществляется электромагнитным методом, который основан на том, что в поперечном магнитном поле ионы полиизотопного элемента, обладающие одинаковыми энергиями, но различными скоростями из-за различия масс, дви-

жутся по окружностям, радиус которых зависит от масс изотопов.

Отклоняющее электромагнитное поле обеспечивается электромагнитом (рис.1), входящим в состав масс-сепаратора С-2. Катушки электромагнита имеют по 192 витка, что обеспечивает создание магнитного поля с напряженностью  $3,6 \times 10^5$  А/м при токе 220 А. Обмотки катушек выполнены из полой медной шины сечением  $(13,5 \times 13,5)$  мм<sup>2</sup> с отверстием диаметром 8 мм для охлаждения водой. Суммарное активное сопротивление обмоток катушек – 0,2 Ом, индуктивность – 7,5 мГн. По данным параметрам была подобрана модель программно-управляемого источника тока.

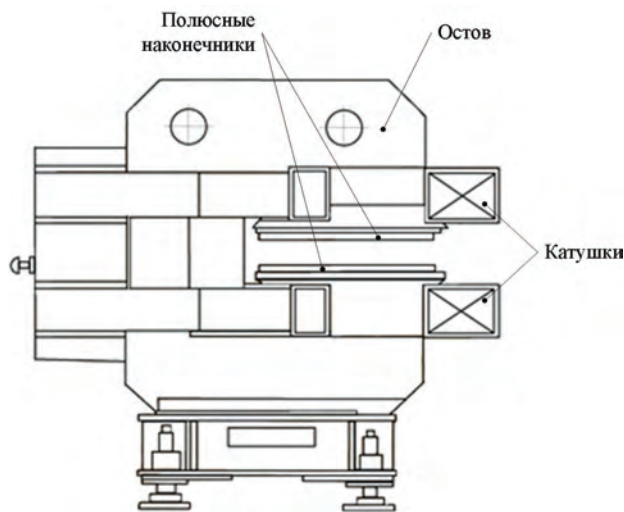


Рис. 1. Электромагнит масс-сепаратора С-2

## Структура АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Создание нового автоматизированного источника питания магнита масс-сепаратора С-2 предусматривает замену морально и физически изношенного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры на современные. Предусмотрено оснащение источника системой контроля и управления, позволяющей автоматизировать все операции измерения технологических параметров источника и большинство операций управления.

На рис. 2 представлена блок-схема нового автоматизированного источника питания магнита масс-сепаратора С-2.

В качестве источника питания магнита масс-сепаратора С-2 используется программно-управляемый источник постоянного тока Sorensen SGI 60x250 производства фирмы Ametek. Данные источники питания специально разработаны для использования в системах, в которых требуется программно-управляемые источники постоянного тока с хорошими выходными характеристиками, такими как высокая точность установки и регулировки, низкий уровень пульсаций и шума выходных параметров. Связь источника тока с управляющим компьютером осуществляется через последовательный порт компьютера по интерфейсу RS-232.

Так как источник питания работает на индуктивную нагрузку (магнит масс-сепаратора С-2), то для предотвращения его повреждения вследствие возникновения самоиндукции при резком изменении тока, выходы источника тока подключены к магниту через диодную защиту (VD1, VD2 см. рис. 2). Диод VD1 защищает выход источника питания от пробоя при возникновении самоиндукции. Диод VD2 будет открыт при возникновении обратной ЭДС, таким образом ток, шедший через индуктивность, продолжит течь через диод, а накопленная энергия магнитного поля рассеется на нем, не вызывая повреждение источника тока [2]. Диод VD1 при работе находится в открытом состоянии и на нем выделяется около 160 Вт тепла при нормальном режиме работы, поэтому он закреплен на радиаторе и обеспечено его принудительное воздушное охлаждение. В качестве защитных диодов используются диоды Д161-320-12.

Источник питания подключается к питающей сети через контактор КМИ 34062 (QF1 см. рис. 2), который обеспечивает дистанционное включение/выключение и защиту от короткого замыкания или сверхтока с помощью теплового реле.

В качестве независимого измерителя тока, протекающего через магнит масс-сепаратора С-2, используется компенсационный датчик тока LEM ITB 300-S (PA1 см. рис. 2). Этот тип датчиков относится к бесконтактному типу измерителей тока. Традиционно, данный тип датчиков используется как элемент обратной связи в высокоточных и высокостабильных источниках питания для обеспечения высокой точности и линейности измерения тока, при низком температурном коэффициенте на широкой полосе пропускания. Принцип действия такого датчика заключается в следующем: магнитный поток, создаваемый измеряемым током, компенсируется таким же потоком, создаваемым током во вторичной обмотке датчика. Выходной (компенсирующий) ток генерируется с помощью элемента Холла и электроники датчика. Этот ток является пропорциональной копией первичного тока, уменьшенной в 2000 раз. Таким образом при диапазоне измеряемых токов от минус 300 до 300 А выходной ток датчика меняется от минус 150 до 150 мА.

Для дистанционного включения/выключения, контроля работы программно-управляемого источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250, подачи питания и контроля тока с токового датчика LEM ITB 300-S, используется блок контроля и управления А2 (см. рис. 2).

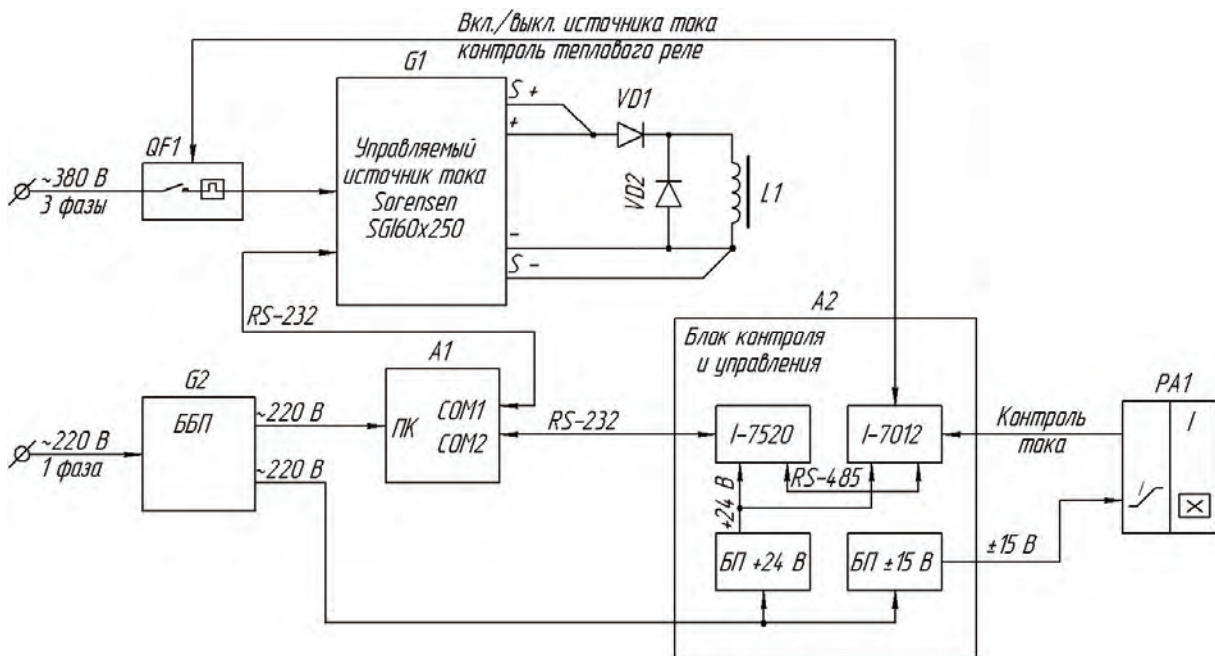


Рис. 2. Блок-схема АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Связь модуля аналогового ввода I-7012 (см. рис. 2) с управляющим компьютером осуществляется через последовательный порт по интерфейсу RS-232. Для преобразования интерфейса RS-232 в RS-485 используется модуль преобразователя интерфейса I-7520 (см. рис. 2). Модуль аналогового ввода I-7012 имеет один канал аналогового ввода (используется для контроля значений тока с токового датчика LEM ITB 300-S), один канал дискретного ввода (используется для контроля срабатывания теплового реле контактора КМИ-34062) и два канала дискретного вывода (используются для включения/выключения источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250 через контактор КМИ-34062).

### Программное обеспечение АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Для автоматизированного управления током магнита масс сепаратора создано рабочее программное обеспечение (РПО). Разработка РПО проведена с использованием инструментального программного пакета CRW-DAQ [3], предназначенного для автоматизации экспериментальных установок и физических измерений. Пакет содержит набор средств, необходимых для создания графических интерфейсов, средства для программирования алгоритмов контроля и управления (язык DAQ Pascal), а также библиотеки драйверов для работы с модулями удаленного ввода-вывода серии I-7000. Следует отметить, что разработанное РПО полностью соответствует принципам модульности, используемым для построения сетевой структуры системы контроля и управления масс-сепаратором С-2, и легко интегрируется в единую систему управления.

В задачи РПО АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 входит:

- управление и контроль выходных параметров программно-управляемого источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250;
- дистанционное включение/выключение источника постоянного тока Sorensen SGI 60x250;
- контроль срабатывания теплового реле;
- контроль тока, протекающего в магните, измеряемого токовым датчиком LEM ITB 300-S;
- непрерывное сохранение данных измеренных величин в файлах на жестком диске компьютера;
- отображение результатов измерений на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхем и графиков.

Для управления программно-управляемым источником постоянного тока Sorensen SGI 60x250 разработан драйвер, который входит в состав РПО. В алгоритме драйвера реализован цикл команд, выполняющий постоянный опрос устройства и отправку команд для исполнения. На рис. 3 показан графический

интерфейс (мнемосхема) драйвера программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60x250. Данная мнемосхема обеспечивает полное управление и контроль источника тока. При нажатии сенсоров ввода данных (сенсоры установка по току, напряжению, темп перехода и т. д. см. рис. 3) появляется поле редактирования для задания новых целевых значений параметров источника тока (установки напряжения, тока, темпа перехода и ограничивающие пределы по току и напряжению и т. д.). При нажатии сенсоров вывода данных (сенсоры измеренного тока, напряжения, мощности и т. д. см. рис. 3) появляется окно с графиком измеренных значений интересующих параметров (напряжения, тока, мощности и т. д.).

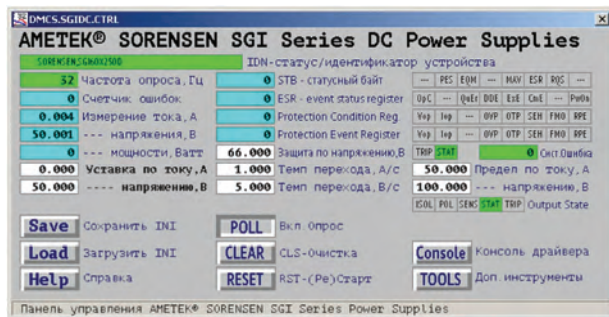


Рис. 3. Мнемосхема драйвера программно-управляемого источника тока

Для возможности работы источника тока на индуктивную нагрузку (режим стабилизации тока) в драйвере источника реализован режим плавного изменения выходных параметров с заданной скоростью перехода. Плавное изменение выходных параметров (сенсоры «Темп перехода А/с» и «Темп перехода В/с» см. рис. 3) необходимо для того, чтобы избежать опасных импульсов напряжения при работе на индуктивную нагрузку (при работе с индуктивной нагрузкой надо плавно наращивать ток).

Разработанное РПО позволяет работать, как непосредственно с драйвером программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60x250, так и с блоком управления и контроля. Для упрощения работы оператора с АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 большинство функций, связанных с управлением, автоматизированы и требуют от оператора только команды на включение/выключение управляемого источника тока и задания необходимой величины тока магнита.

На рис. 4 показана мнемосхема АСУ током магнита масс-сепаратора С-2. Данная мнемосхема позволяет оператору включать/выключать и контролировать текущее состояние программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60x250, устанавливать необходимое значение тока магнита, контролировать ток, протекающий в магните, при помощи токового датчика LEM ITB 300-S, выполнять аварийное выключение источника тока в случае необходимости.

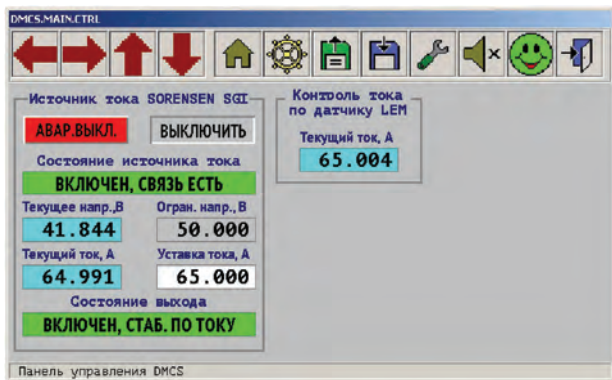


Рис. 4. Мнемосхема АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Контроль и задание выходных параметров программно-управляемого источника тока Sorensen SGI 60x250 осуществляется при помощи сенсоров «Текущее напряжение, В», «Ограничивающее напряжение, В», «Текущий ток, А» и «Уставка тока, А» в поле «Источник тока SORENSEN SGI» (см. рис. 4). Оператор может задавать установку тока магнита, щелкнув левой кнопкой «мыши» по сенсору «Уставка тока, А», а ограничивающее напряжение устанавливается автоматически на заданное значение, так как источник тока магнита масс-сепаратора работает в режиме стабилизации тока.

Для дополнительного контроля тока, протекающего в магните масс-сепаратора, в поле «Контроль тока по датчику LEM», в сенсоре «Текущий ток, А», отображается текущее значение тока, измеренное

датчиком LEM ITB 300-S. Выходной сигнал с токового датчика через измерительный резистор поступает на вход модуля аналогового ввода I-7012 (см. рис. 2). Измеренное модулем падение напряжение на резисторе, с помощью процедуры калибровки, преобразуется в значение тока и отображается в сенсоре «Текущий ток, А».

Алгоритмы включения/выключения источника тока показаны на рис. 5. Реализация данных алгоритмов в РПО позволяет полностью автоматизировать безопасные режимы включения/выключения источника тока и установки необходимого значения тока магнита. То есть, при включении источника, программа автоматически выполняет действия, необходимые для включения источника тока, устанавливает определенные параметры, и, при задании оператором значения тока магнита, обеспечивает плавную установку тока с определенной скоростью до заданной величины, предотвращая таким образом возникновение самоиндукции. При выключении источника, соответственно, программа плавно (с определенной скоростью) устанавливает ток и напряжение магнита в нулевое значение и выполняет необходимые для выключения действия. Кроме того, предусмотрен режим аварийного выключения источника тока. При таком выключении элементы системы управления испытывают значительные нагрузки в результате возникновения обратной ЭДС вследствие моментального снятия тока с катушки магнита, поэтому аварийным выключением следует пользоваться только в экстренных случаях, требующих незамедлительного выключения тока магнита.

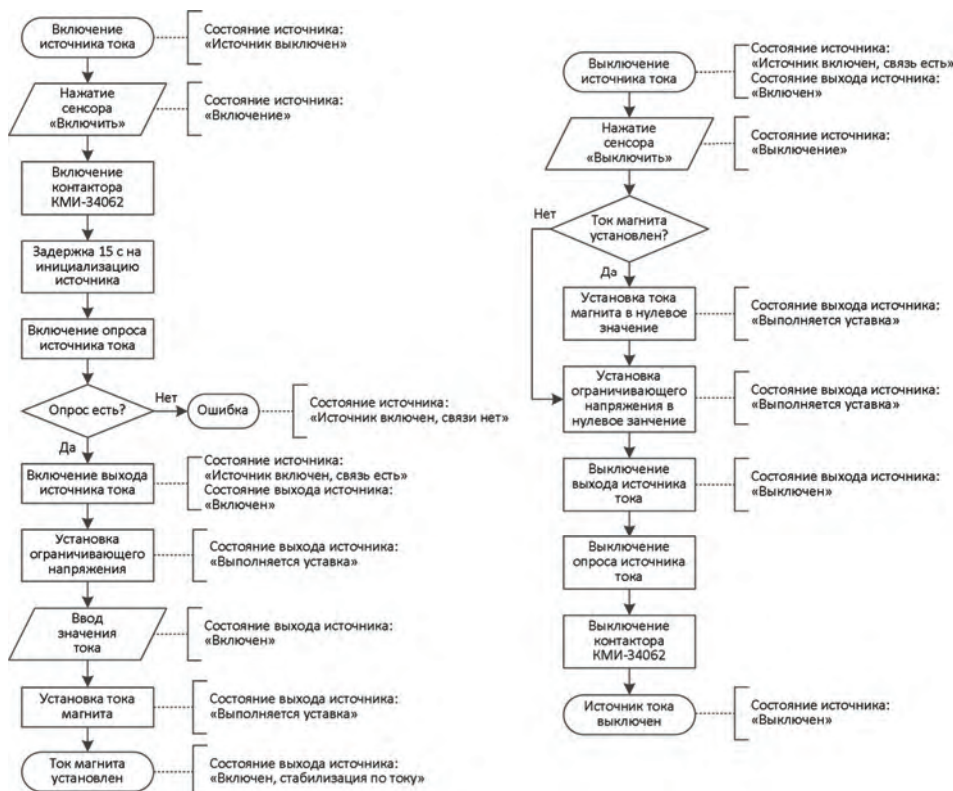


Рис. 5. Алгоритмы включения/выключения источника тока

Для аварийного (моментального) выключения источника тока используется кнопка «Аварийное выключение», которая располагается на мнемосхеме управления током магнита масс-сепаратора (см. рис. 4). При нажатии данной кнопки появляется диалог с запросом подтверждения действия оператора, обеспечивая таким образом защиту от случайного нажатия. В случае подтверждения аварийного выключения источника, будет выполнено его выключение, и снятие с него питающего напряжения.

### Проведение испытаний АСУ током магнита масс-сепаратора С-2

Для проверки работоспособности АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 были проведены ее испытания при рабочих токах магнита в ходе разделения изотопов свинца. Измерения тока, протекающего в магните, производились согласно схеме, изображенной на рис. 2, за исключением того что токовый сигнал датчика LEM ITB 300-S с измерительного резистора подавался не на модуль аналогового входа I-7012, а на цифровой мультиметр FLUKE 8846A. Цифровой мультиметр FLUKE 8846A имеет погрешность измерений  $\pm 0,0017\%$  на диапазоне 10 В, в то время как модуль аналогового входа I-7012 только  $\pm 0,05\%$ . Таким образом, используя мультиметр

FLUKE, удалось более точно измерить стабильность тока магнита масс-сепаратора.

Данные, измеряемые цифровым мультиметром, записывались на внешнюю карту памяти, которая подключалась к нему через порт USB. Затем полученные данные обрабатывались на персональном компьютере. Значение падения напряжения на измерительном резисторе через калибровку переводилось в значение тока в магните масс-сепаратора.

Испытания проводились путем задания тока магнита масс-сепаратора С-2 200 А (типичный ток для разделения изотопов свинца). Установка тока производилась со скоростью 2,5 А/с. Полученные результаты показаны на рис. 6, где:

а) график тока магнита при установке его значений с 0 до 200 А;

б) график тока магнита после его установки на значение 200 А.

Как видно из рис. 6б после установки рабочего тока магнита требуется время порядка 10 минут на температурную стабилизацию магнита масс-сепаратора, даже при условии того, что магнит имеет водяное охлаждение.

Измеренное распределение значений тока после прогрева магнита (см. рис. 7а) показало, что оно хорошо описывается нормальным распределением Гаусса, а среднее квадратичное отклонение от заданного тока составляет 0,001481 А (1,481 мА).

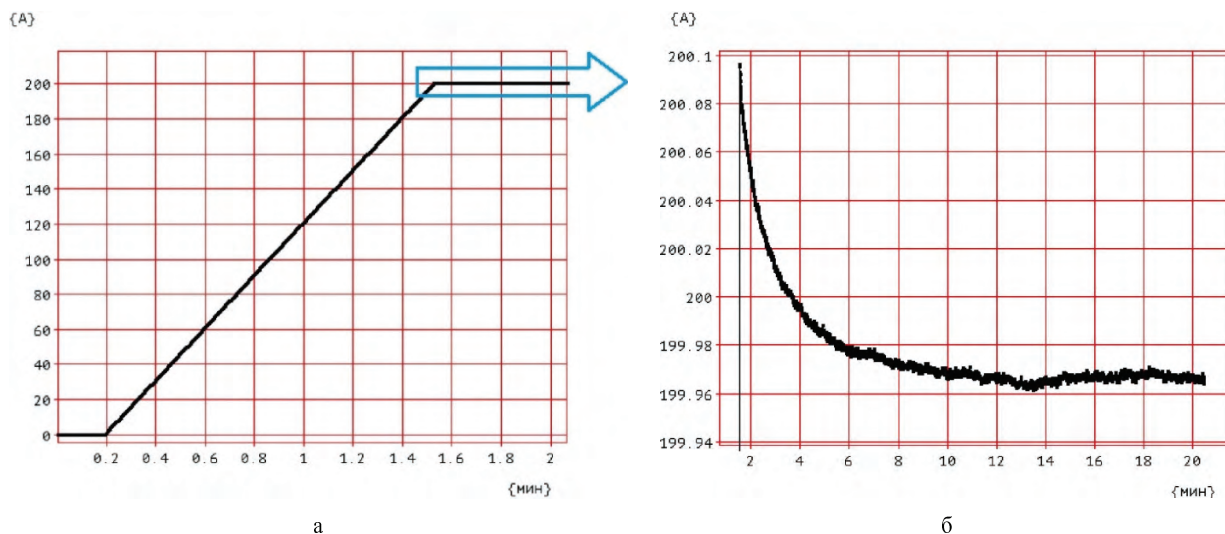


Рис. 6. Ток магнита масс-сепаратора: а – процесс установки тока магнита 0 – 200 А; б – ток магнита в установившемся значении

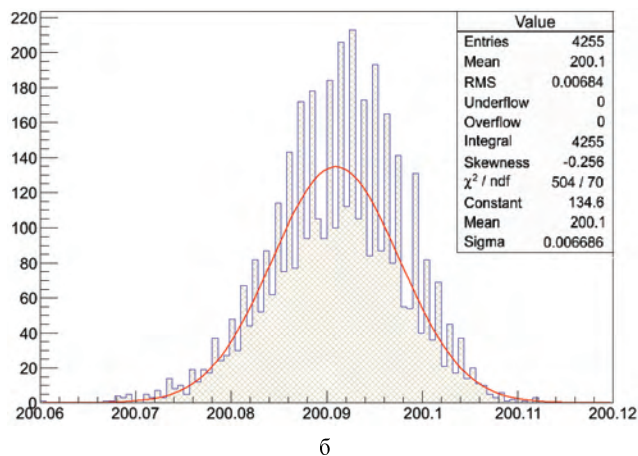
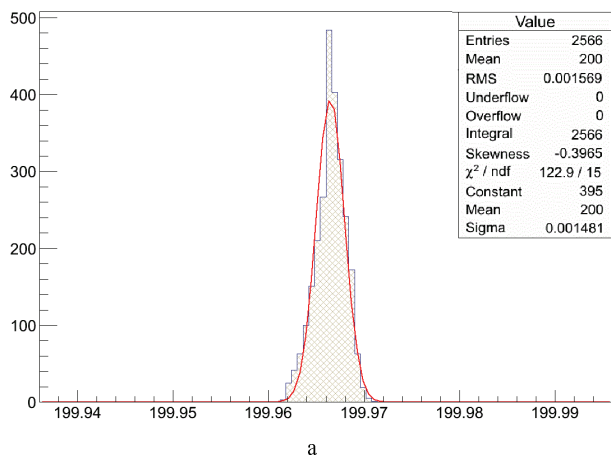


Рис. 7. Распределение тока магнита масс-сепаратора С-2: а – распределение значений тока АСУ; б – распределение значений тока старой системы мотор-генератор

Ранее было измерено значение тока магнита масс-сепаратора при использовании старой системы мотор-генератор. Как видно из рис. 7б, распределение тока так же хорошо описывается нормальным распределением Гаусса, но среднеквадратичное отклонение от заданного вручную тока составляет 0,006686 А (6,686 мА).

Приведенные измерения показали, что разработанная АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 позволила повысить стабильность тока магнита практически в 5 раз, и соответственно в 5 раз снизить пульсацию тока от заданного значения.

## Вывод

В результате создания АСУ током магнита масс-сепаратора С-2 значительно повысились его эксплуатационные характеристики и уровень автоматизации управления:

- обеспечена работа диспергирующего магнита в режиме автоматического поддержания тока и исключен долговременный дрейф тока. Таким образом, оператору больше не нужно визуально контролировать изменение значения тока магнита по стрелоч-

ному амперметру и вручную выполнять компенсацию дрейфа тока во время разделения изотопов.

- в 5 раз снизилась величина уширения пучка в фокальной плоскости, за счет уменьшения пульсаций тока магнита, обеспечивая таким образом более эффективное разделение изотопов и, тем самым, снижая стоимость их получения.

- повышена точность установки тока магнита в 10 раз за счет уменьшения шага уставки. На старой системе минимальный шаг уставки составлял 50 мА, а при использовании программно-управляемого источника тока, минимальный шаг снизился до 5 мА.

## Литература

1. Vesnovskii S. P., Polynov V. N. Highly enriched isotopes of uranium and transuranium elements for scientific investigation // NIM B 1992. Vol. 70. P. 9–11.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники Т. 1. М.: Мир, 1984.
3. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 80–90.