



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2012–26  
ЛДС

В.Ф. Головкин, С.Н. Головня, С.А. Горохов, Е.А. Устинов

**Система перемещения гамма-детектора  
установки СВД**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2012

**Аннотация**

Головкин В.Ф., Головня С.Н., Горохов С.А., Устинов Е.А. Система перемещения гамма-детектора установки СВД: Препринт ИФВЭ 2012–26. – Протвино, 2012. – 15 с., 5 рис., 4 табл., библиогр.: 4.

В работе представлены результаты модернизации системы управления перемещением гамма-детектора установки СВД. Обоснован выбор элементной базы для создания интерфейса управления, датчиков измерения координат, исполнительных устройств и системы аварийной блокировки. Описаны схемотехнические решения, позволяющие поднять на качественно новый уровень надёжность работы гамма-детектора и точность его позиционирования. Продемонстрированы преимущества использования серийных промышленных контроллеров асинхронных электродвигателей с частотным управлением. Описано разработанное программное обеспечение для управления перемещением гамма-детектора. Система полностью смонтирована, испытана и готова к работе в составе установки СВД.

**Abstract**

Golovkin V.F., Golovnya S.N., Gorokhov S.F., Ustinov E.A. The movement system for the gamma detector of the SVD: IHEP Preprint 2012–26. – Protvino, 2012. – p. 15, figs. 5, tables 4, refs.: 4.

In work results of modernization of a control system are presented by movement of the photon detector of the SVD installation. The choice of element base for creation of the interface of management, sensors of measurement of coordinates, actuation mechanisms and system of emergency blocking is reasonable. The circuitry decisions, allowing to lift on qualitatively new level reliability of work scale of the detector and accuracy of its positioning are described. Advantages of use of serial industrial controllers of asynchronous electric motors with frequency management are shown. The developed software for management of movement scale is described by the detector. The system is completely mounted, tested and ready to work as a part of the SVD installation.

## **Введение**

В процессе длительной эксплуатации автоматизированной системы перемещения многотонной платформы гамма-детектора установки СВД экспериментального комплекса ГНЦ ИФВЭ ([www.iher.ru](http://www.iher.ru)) выявлен ряд технических проблем, связанных с частыми отказами механической и электронной части двухканальной отсчетно-измерительной системы координат, оптических развязывающих микросхем и тиристорных сервоусилителей. Отсчетная система координат не обеспечивала стабильность показаний во времени и имела большой гистерезис, обусловленный изменением направления перемещения платформы. Сервоусилители не защищали исполнительные асинхронные двигатели от перегрузки по току и перегреву.

Учитывая перечисленные недостатки датчиков, сервоусилителей и динамику развития современной элементной базы, используемой в автоматизированном оборудовании, было принято решение о модернизации системы управления перемещением гамма детектора. В ходе модернизации разработана принципиально новая система управления с использованием современных средств автоматизации, с учетом:

- минимальных затрат на конструкторские и механосборочные работы;
- повышенных требований к надежности и удобству эксплуатации;
- современных достижений в области высокоточных отсчетно-измерительных систем, частотно-преобразовательной техники и микропроцессорных контроллеров.

При этом рассмотрены различные варианты реализации отсчетно-измерительных систем с абсолютным отсчетом координат платформы, проведен сравнительный анализ датчиков перемещения, сервоусилителей (частотных преобразователей и устройств плавного пуска) отечественных и зарубежных фирм: BULLUFF, GEFRAN, OMICRON, SICK, LENZE и СКБ ИС. В результате выполненной работы гамма-детектор установки СВД оснащен современными 24-разрядными датчиками положения немецкой фирмы SICK, силовыми преобразователями с амплитудно-частотной модуляцией американской фирмы LENZE, двухуровневой микропроцессорной системой программного управления с использованием портов USB, RS485 и промышленного протокола MODBUS.

## Структура автоматизированной позиционной системы

Структурная схема автоматизированной системы (АС) перемещения платформы гамма-детектора установки СВД приведена на рис. 1.

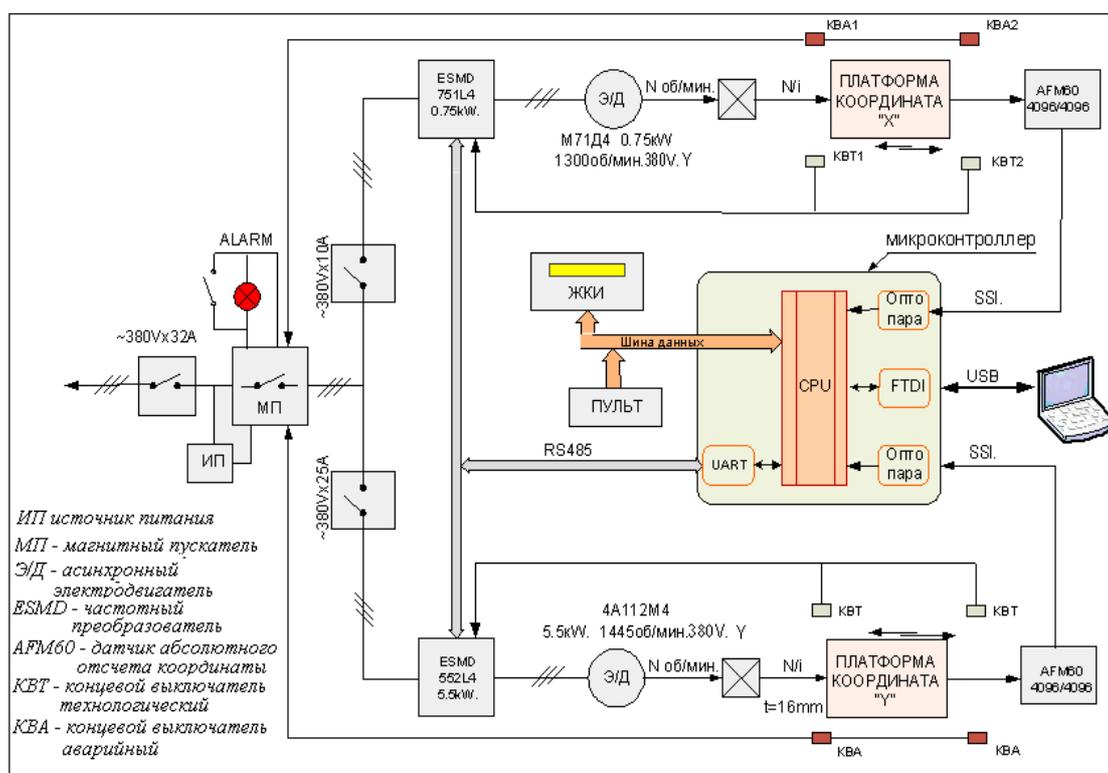


Рис. 1. Структурная схема.

В структуру системы входят:

- платформа с технологическими и аварийными концевыми выключателями;
- автоматы защиты трехфазной сети с электромагнитными расцепителями и указателями наличия фаз;
- асинхронные электродвигатели (АД), перемещающие платформу по ортогональным координатам X и Y;
- абсолютные датчики, интерфейсные модули и линии связи отсчетно-измерительной системы перемещения;
- силовые модули частотного управления АД;
- контроллер с интерфейсными модулями связи, алфавитно-цифровым дисплеем, пультом управления;
- компьютер верхнего уровня (РС).

### Основные характеристики платформы

Конструктивно платформа состоит из кассеты с 1536 детекторами и массивной рамы. Кассета перемещается посредством двух ходовых винтов в вертикальном направлении (ось Y). В данной конструкции вращающий момент АД преобразуется в поступательное движение кассеты посредством зубчатого редуктора и силовой винтовой пары (винт-гайка). Угол вращения гайки измеряется высокоточным датчиком фирмы SICK.

Перемещение платформы в горизонтальном направлении (ось X) происходит по аналогичной кинематической схеме. Пределы перемещения платформы ограничиваются технологическими и аварийными путевыми выключателями. Основные параметры платформы приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Наименование параметра		Координата X	Координата Y
Максимальное количество счетчиков 1536	шт	48	32
Пределы перемещения платформы	мм	2400	1800
Скорость перемещения	мм/сек.	2.5	2.75
Погрешность позиционирования	мм	±0.5	±0.5
Единица отсчета датчика перемещения	ед/мм	342	320
Передаточное число зубчатого редуктора		30	160
Шаг ходового винта	мм	3	16
Вес перемещаемых конструкций платформы	кг	17000	7000
Момент сопротивления	Нм	3	up 10/ down 3,6

## Исполнительные электродвигатели

Для перемещения по двум взаимно перпендикулярным координатам X и Y используются отечественные регулируемые трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, которые в последние годы находят все более широкое применение в различном автоматизированном оборудовании и вытесняют приводы, созданные на базе синхронных и постоянных двигателей. Конструктивно двигатель координаты Y установлен на платформе и перемещается вместе с ней по оси X и Y. Двигатель координаты X установлен стационарно.

Основные параметры асинхронных электродвигателей для X и Y координат приведены в табл. 2.

Таблица 2.

	Тип двигателя	S%	Мощность kW	N об/мин.	КПД,%	Коэф. мощности	Мэд (Нм)	Мп /Мн	Ммин /Мн	Ip /In
Y	4A112M4	5	5.5	1445	85,5	0,86	38	2	1,6	7
X	M71D4	6	0.75	1300	84	0,85	5,7	1,8	1,5	5

## Отсчетно-измерительная система

Для измерения перемещения платформы в ортогональных направлениях Y и X применены оптоэлектронные датчики угловых перемещений немецкой фирмы SICK. В датчиках используется одношаговое кодирование (Код ГРЕЯ), поэтому ошибка при сканировании не превышает одного младшего разряда. При отключении питания информация о положении объекта сохраняется и при включении может быть считана контроллером системы управления. Этот факт является преимуществом используемого абсолютного датчика перед инкрементным. Обмен информацией между датчиком и контроллером происходит через синхронный последовательный интерфейс (SSI).

Технические параметры абсолютного датчика AFM60E

Выходной код	GRAY
Программное изменение направления счета	CW/CCW
Программная установка начала отсчета	ZERO
Число отсчетов на оборот	4096
Число оборотов	4096

Последовательный синхронный интерфейс SSI	24 бита
Разрешение	5,4°
Напряжение питания	(4.5-32) В
Нагрузочная способность	30 мА
Максимальная тактовая частота	1 МГц
Разъем для передачи информации	8 pin
Степень защиты	IP65
Рабочий диапазон температур	(-20 +85) °С
Габаритные размеры	60*58 мм <sup>2</sup>
Масса	0,26 кг.

### **Силовые модули управления асинхронными двигателями**

Асинхронные трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором широко применяются в различном технологическом оборудовании, благодаря их надежности, большому сроку службы, минимальному обслуживанию в процессе эксплуатации и низкой стоимости. Для регулирования оборотов этих двигателей создавались специальные тиристорные модули с импульсно-фазовым и релейным управлением, а также устройства плавного пуска. Модули имели большие массогабаритные показатели, низкую надежность, сложные схемотехнические решения и не удовлетворяли энергетическим и динамическим требованиям, что ограничивало их применение в системах автоматического регулирования. Эти недостатки были устранены выпуском электронной промышленностью современных электронных компонентов: мощных полевых MOSFET и IGBT транзисторов и высокопроизводительных микропроцессоров, использование которых позволяет создавать высокоэффективные трехфазные преобразователи с амплитудной и частотной модуляцией мощностью до 20 кВт. Появление частотных преобразователей значительно расширило область применения асинхронных двигателей в замкнутых системах регулирования скорости (частоты вращения) и положения объекта управления. В результате сравнения технических характеристик различных силовых модулей выявились значительные преимущества частотных преобразователей (ЧП) перед устройствами плавного пуска, поэтому для управления асинхронными

двигателями платформы гамма-детектора экспериментальной установки СВД были выбраны трехфазные частотные преобразователи фирмы LENZE.

Преобразователи LENZE оснащены токовыми датчиками фаз, микропроцессорной системой, промышленным протоколом MODBUS и трехфазными полумостовыми модулями. Преобразователи позволяют формировать различные законы скалярного управления, вести мониторинг, сохранять номинальный момент двигателя при изменении числа оборотов в диапазоне 10, защищать двигатели от перегрузки по току и перегреву и сохранять постоянным отношение линейного напряжения обмотки возбуждения к частоте этого напряжения ( $U/f=Constant$ ). Параметры используемых ЧП приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Координата	Тип	Мощность кВт	Uвх. В	In А	Ip А	fвых. Гц	fнес. кГц	Uвых. В	S %
Y	SMD552	5.5	380	12.6	17	0-240	4-10	0-380	0-40
X	SMD751	0.75	380	2.5	3.2	0-240	4-10	0-380	0-40

### **Организация связи микроконтроллера с частотным преобразователем типа SMD**

Для программного задания команд, параметров настройки (конфигурирования) и мониторинга оборудования созданы унифицированные аппаратно-программные средства, которые обеспечивают передачу информации от микроконтроллера к ЧП по последовательной линии связи MODBUS RTU – RS485. Подробное описание сети MODBUS можно найти в [1]. Порт RS485 и промышленный протокол MODBUS RTU позволяют по двухпроводной линии объединять в сеть до 32 частотных преобразователей серии SMD. Микроконтроллер (мастер) поддерживает скорость обмена с преобразователем SMD (ведомый) 9600, контроля четности нет (два стоповых бита). Длина магистрального кабеля при этой скорости может достигать 1 км. Преобразователь SMD не поддерживает функцию протокола широкого вещания

Структура сообщения имеет следующий вид:

СТАРТ	АДРЕС	ФУНКЦИЯ	ДАННЫЕ	CRC	КОНЕЦ
T1-T2-T3-T4	8 бит	8 бит	n×бит	16 бит	T1-T2-T3-T4

Формат передачи символов – младшим битом вперед:

START BIT	1	2	3	4	5	6	7	8	STOP BIT	STOP BIT
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---	----------	----------

Функциональные коды, поддерживаемые SMD:

- 1) 03 – чтение регистра хранения информации (тип адресации 4X). Для чтения доступно одно слово за один раз;
- 2) 06 – предварительная установка одного регистра (тип адресации 4X). Запись единственного регистра.

### **Концевые выключатели**

Для предотвращения механических повреждений установки предусмотрены две группы концевых выключателей: технологические (КВТ) и аварийные концевые выключатели (КВА). При срабатывании одного из КВТ частотный преобразователь отключается и установка останавливается. Аварийные концевые выключатели предназначены на случай, если КВТ не работает. При срабатывании аварийного выключателя разрывается цепь питания магнитного пускателя частотного преобразователя и загорается аварийная лампа Л на пульте управления.

### **Контроллер управления**

Контроллер служит для опроса датчиков положения, выработки команд в стандарте RS485 для частотных преобразователей, связи с PC по интерфейсу USB и отображения текущей информации на индикаторе. Контроллер сделан на базе микроконтроллера Atmega64.

Главными достоинствами этого микроконтроллера являются: дешевизна, высокая производительность, простота программирования, наличие компиляторов и большого количества готовых библиотек в свободном доступе. Полную документацию по микроконтроллеру можно посмотреть в [4]. Особенности программирования данного

микроконтроллера хорошо описаны в [2]. Программа контроллера написана при помощи компилятора Code Vision AVR [3].

### **Работа контроллера с PC**

Связь с PC осуществляется при помощи микросхемы FT245BM, предназначенной для преобразования USB протокола в параллельный FIFO. Микросхема FT245BM является эффективным и недорогим способом организации передачи данных от периферии к компьютеру верхнего уровня и обратно со скоростью до 8 Мбит/с (1 Мбайт/с). Ее архитектура, представляющая собой буфер FIFO, позволяет организовать взаимодействие практически с любым микроконтроллером или микропроцессором через порты входа/выхода.

Передача данных от периферийных устройств осуществляется по восьмиразрядной параллельной двунаправленной шине данных (D0-D7). Для передачи данных от периферии к компьютеру достаточно записать байт данных в буфер при неактивном бите состояния. Если объем буфера (384 байта) переполнен или идет процесс сохранения предыдущего байта, устройство приостановит запись, уровень сигнала TXE останется высоким, пока информация не будет передана по USB на компьютер. При передаче данных от устройства верхнего уровня к периферийному по USB микросхема сообщит периферийному устройству о наличии в приемнике данных для передачи. Чтение данных из буфера FIFO продолжается до тех пор, пока бит RXF активен. Бит RXF заведен на ножку прерывания контроллера, при получении прерывания контроллер вычитывает буфер данных и обновляет текущую команду. А также передает результат выполненной команды, если FT245 готово его прочитать.

### **Работа контроллера с частотным преобразователем**

Стандартный набор команд частотного преобразователя хранится во флеш-памяти контроллера в виде массива. При вызове процедуры MODBUS к стандартной команде добавляется номер устройства и вычисляется контрольная сумма CRC16. Сформированная посылка отправляется частотному преобразователю используя стандартный USART контроллера. Далее контроллер обнуляет входной буфер данных, обнуляет счетчик событий, запускает таймер на 4 мс и если ответ не приходит (т.е. таймер

отсчитал 4 мс, выработал прерывание, а приемный буфер пустой), то сообщение считается потерянным, выдается сообщение об ошибке. И передача повторяется. Если ответ получен, то вырабатывается прерывание от USART, по прерыванию контроллер вычитывает принятый байт данных, складывает его в приемный буфер, увеличивает счетчик числа событий на 1, перезапускает таймер. И так далее, пока не будет получена вся посылка. После того как данные перестанут приходить, сработает прерывание от таймера. Контроллер проверит, сколько байт находится в приемном буфере и если их 8, то посчитает контрольную сумму полученной посылки. Если полученный результат совпадет с принятым, то сообщение считается «правильным». Во всех остальных случаях выдается сообщение об ошибке передачи. Полученное сообщение складывается в выходной буфер контроллера и может быть прочитано в РС.

### **Работа контроллера с датчиком положения**

Для связи контроллера (мастера) с датчиком (ведомым) используется экранированный кабель с восемью проводами – два провода питания, две витые пары для передачи синхроимпульсов и данных, два провода для передачи команд начала и направления счета. Параметры сигналов датчика соответствуют стандарту RS485. При этом виде интерфейса данные о позиционном положении оси датчика передаются синхронно с принятым сигналом такта (CLOCK) от системы управления. В состоянии покоя уровень сигнала как на тактовом выводе так и на выводе данных равен 1 ( High ). По первому срезу тактового сигнала данные защелкиваются в параллельно-последовательном преобразователе Input - Latch сдвигового регистра. Этим достигается, что данные во время последовательной передачи позиционного значения больше не изменяются. Со следующим перепадом от низкого уровня на высокий начинается передача позиционного значения, начиная со старшего (MSB) бита. С каждым последующим перепадом с низкого на высокий уровень передается следующий более младший бит информации. После передачи последнего, т.е. самого младшего (LSB) бита с последним перепадом тактового сигнала от низкого уровня на высокий выход данных устанавливается в Low (конец передачи).

Таким образом, для вычитывания 24 бит данных необходимо 25 тактовых импульсов. Контроллер вычитывает данные с датчика, сдвигает их и преобразует

полученный код Грея в бинарный. Для преобразования кода Грея в бинарный вид контроллер осуществляет последовательный сдвиг вправо и суммирование исходного двоичного числа до тех пор, пока очередной сдвиг не обнулит слагаемое. Полученный результат выводится на индикатор пульта управления и складывается в выходной регистр.

### Работа контроллера с индикатором

Для отображения информации на пульте управления используется индикатор DV-20400S2RT. Основные параметры индикатора приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Количество символов	20
Количество строк	4
Формат символа	5x8 точ.
Способ отображения	отражение
Подсветка	нет
Встроенные фонты	рус./англ.
Напряжение питания	5В
Работа по 8-ми и 4-х разрядной шине данных	

Для работы используется стандартная библиотека alcd.h (Alphanumeric LCD Module functions). Индикатор показан на рис. 2.

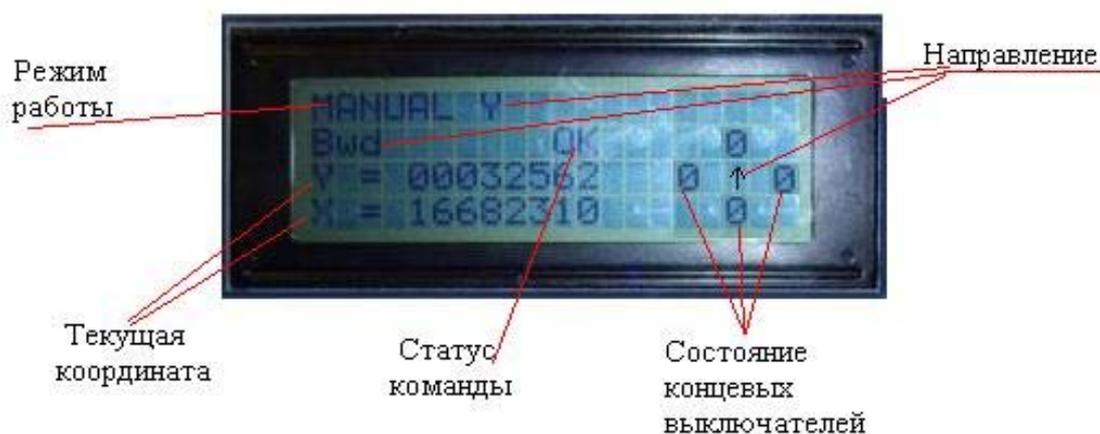


Рис. 2. Индикатор.

Первая строка индикатора отображает информацию о текущем режиме работы (ручной – MANUAL или от РС – AUTO) и координату, с которой в данный момент ведется работа X или Y.

Вторая строка содержит информацию о последней выполненной команде, статус выполнения команды ОК или Err и состояние верхнего концевого выключателя (1 – выключатель сработал).

Третья и четвертые строки показывают текущую координату установки (в отсчетах датчика), состояние горизонтальных и нижнего КВТ. Стрелочки  $\uparrow\downarrow\langle\rangle$  показывают направление движения.

### **Работа контроллера с концевыми выключателями**

Контроллер непрерывно (раз в 50 мс) опрашивает состояние концевых выключателей и выводит информацию на дисплей. Сработавший КВТ отмечается символом «1», несработавший – «0». Прежде чем выдать команду на запуск ЧП, контроллер проверяет состояние КВТ и направление движения. При срабатывании КВТ вырабатывается прерывание, и контроллер выдает команду на остановку ЧП. После этого движение установки в режиме «AUTO» становится невозможным. Для движения в режиме аварийный «MANUAL» предусмотрена возможность блокировки КВТ кнопкой «АБСХ» или «АБСУ» в зависимости от направления.

### **Алгоритм работы микроконтроллера**

Контроллер непрерывно опрашивает состояние концевых выключателей, датчики положения. Полученную от датчиков информацию в коде Грея преобразует в бинарный код, складывает полученные данные в выходной регистр и выводит на индикатор. На рис. 3 показана блок-схема работы контроллера.

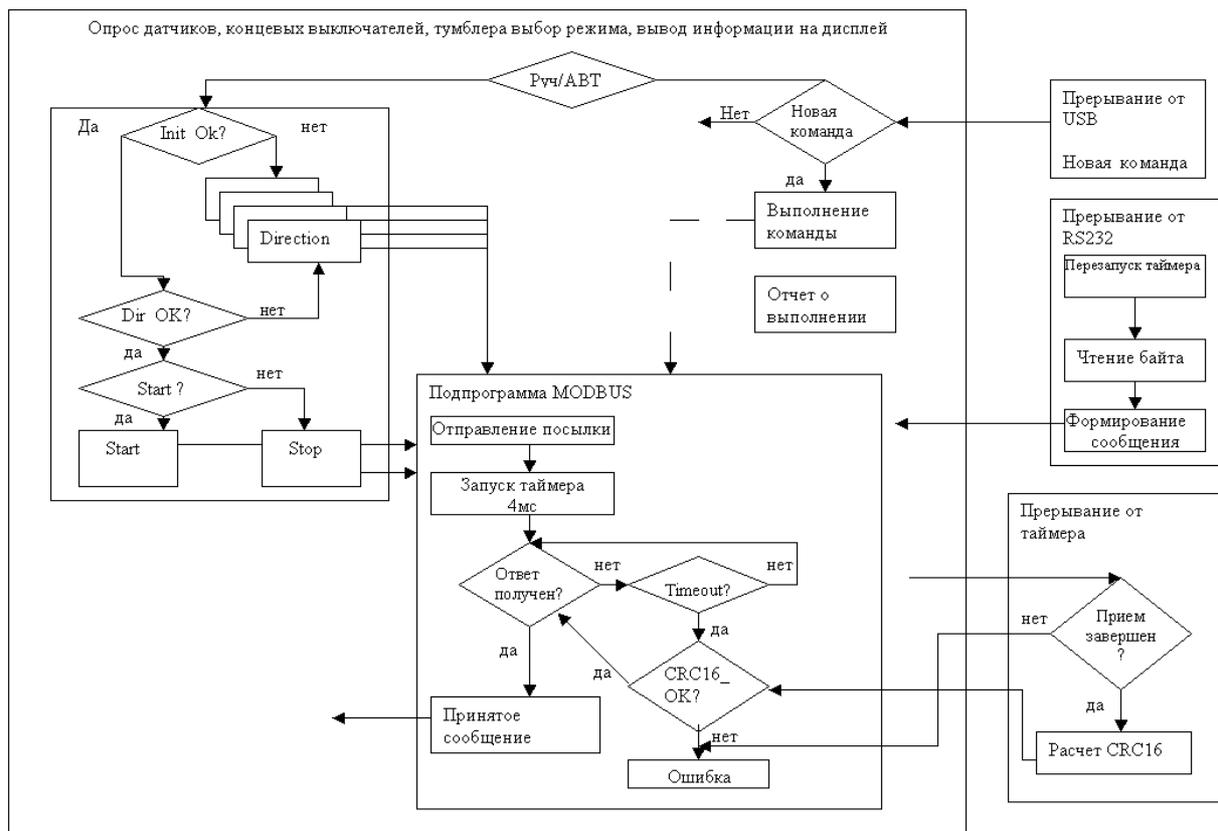


Рис. 3. Блок-схема программы контроллера.

### Программное обеспечение контроля перемещения гамма-детектора

Для начального тестирования и ручного управления за перемещением гамма-детектора установки СВД был разработан пакет программного обеспечения MOVE-DEGA. Основная цель, преследовавшаяся при его разработке, – проверить коммуникацию между контроллером, управляющим перемещением гамма-детектора, и рабочим компьютером, отслеживающим процесс калибровки гамма-детектора на пучке электронов. Для этого интерфейс программы был максимально упрощён – каждой команде соответствовал собственный элемент управления. Пример рабочего окна программы представлен рис. 4.

В момент запуска программа проверяет наличие установленного на компьютере низкоуровневого драйвера доступа к USB и готовность контроллера FTDI. Если драйвер найден, а контроллер включен и готов к общению с компьютером, строка статуса окрашивается зелёным цветом и выводится надпись FT ОК, что означает готовность

контроллера к приёму данных. В противном случае строка статуса окрашивается красным цветом и выводится, согласно спецификации, код ошибки.

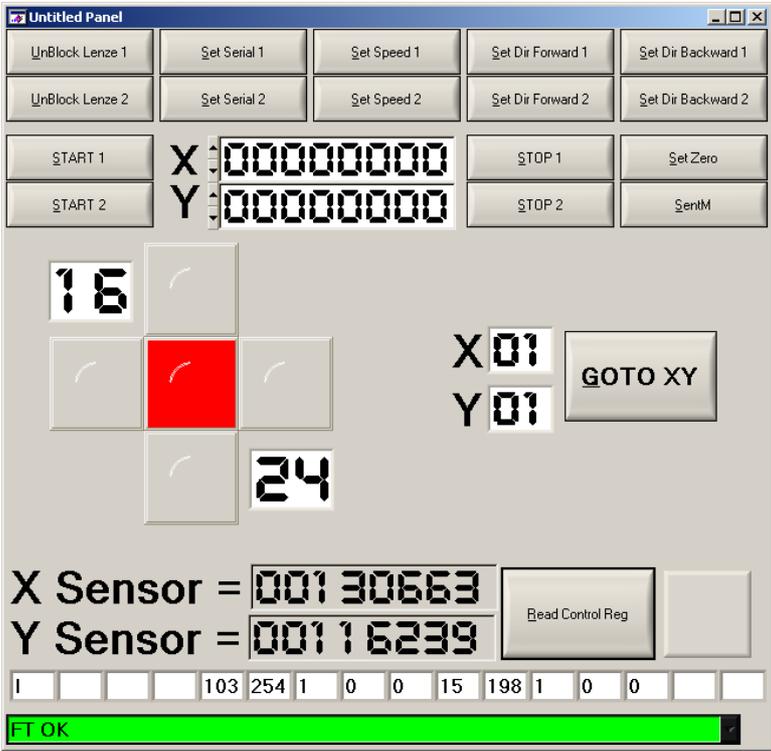


Рис. 4. Консоль программы.

Управляющий контроллер имеет два идентично программируемых канала управления для перемещения по осям X и Y, при этом первый канал отвечает за горизонтальное перемещение, а второй – за вертикальное.

Подготовка управляющего контроллера перемещений к работе состоит в его последовательной инициализации и установке рабочих параметров. Первый этап состоит из подачи кода разблокировки и задания режима обмена, скорости и перемещения платформы. Вторым этапом двигатели запускаются в ход. При этом допускается как простое включение двигателей, при котором они перемещают установку до момента срабатывания концевых выключателей, так и задание непосредственных координат, в которые детектор должен быть перемещён. В первом случае перемещение платформы может быть прекращено кнопкой немедленной остановки двигателей. Для определения текущих координат детектора предусмотрена кнопка “Read Control Reg”, при нажатии которой осуществляется чтение и декодирование информации из

контрольного регистра. При этом результат декодирования представляется как в «сыром» – для целей отладки, так и в комбинированном представлении в виде координат детектора в единицах отсчёта поворотных кодирующих датчиков. Предусмотрен режим, в котором РС опрашивает контроллер автоматически по таймеру 1 раз в секунду. Возможно задание и иного периода опроса.

Для целей калибровки детектора гамма-квантов на пучке электронов предусмотрен режим, при котором управляющий перемещением контроллер принимает от компьютера координату точки останова не в виде кодов поворотного датчика, а в системе координат, привязанной к детекторам частиц установки. При этом необходимые преобразования координатной информации производятся в управляющем контроллере, основываясь на загруженном в него наборе калибровочных констант.

Разработанное программное обеспечение было использовано при отладке системы управления перемещением гамма-детектора и в дальнейшем часть кода вошла в систему контроля и управления калибровкой детектора.

### **Заключение**

В результате проведенной модернизации системы управления перемещением гамма-детектора удалось поднять на качественно новый уровень надёжность работы механических узлов гамма-детектора и точность его позиционирования. На рис. 5 представлена фотография передней панели пульта управления системой перемещения гамма-детектора. Продемонстрированы преимущества использования серийных промышленных контроллеров асинхронных электродвигателей с частотным управлением. Описано разработанное программное обеспечение для управления перемещением гамма-детектора.

Испытания автоматизированной системы перемещения платформы гамма-детектора показали удовлетворительную погрешность позиционирования:

- по горизонтальной координате – 0,25 мм,
- по вертикальной координате – 0,45 мм при перемещении платформы вверх и 0,75 мм при перемещении вниз.

Погрешность позиционирования определена экспериментально с использованием индикатора, цена деления 0,01 мм.

Применение рассмотренных аппаратно-программных средств может быть использовано в аналогичных экспериментальных установках.

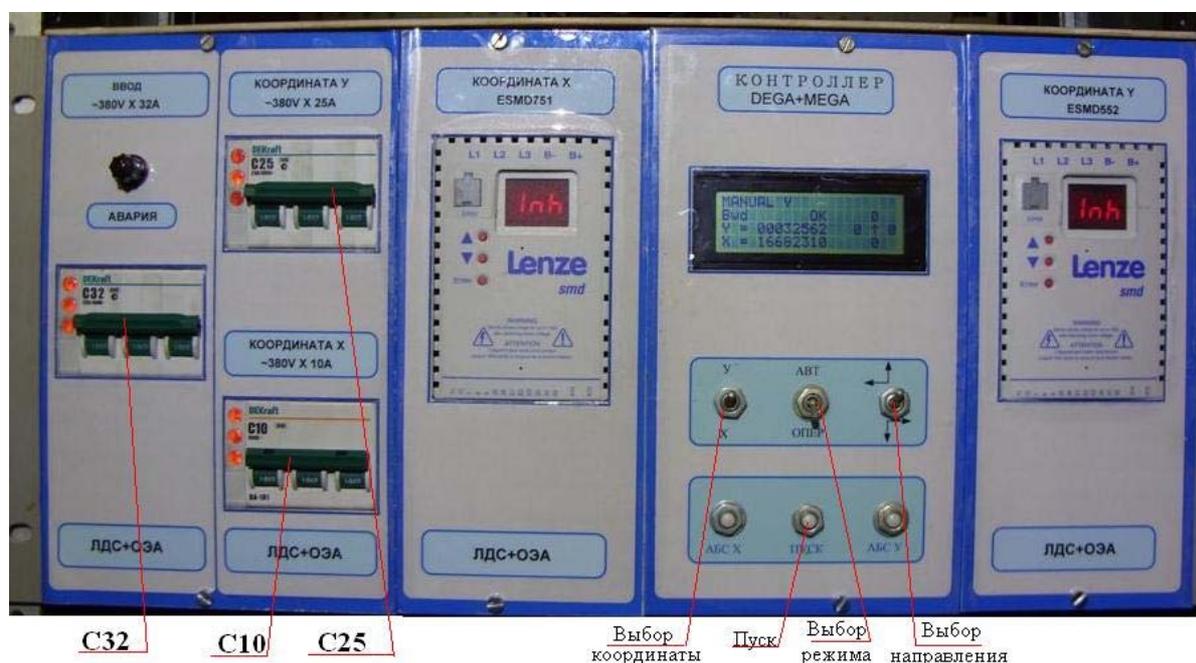


Рис. 5. Фотография передней панели пульта системы управления.

## Список литературы

- [1] Руководство по организации сети MODBUS. Техническая коллекция Schneider Electric, выпуск 08. – Schneider Electric Publisher, 2007.
- [2] Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя – Додека XXI век, Москва, 2007.
- [3] Лебедев М.Б. Code Vision AVR. Пособие для начинающих. – Додека XXI век, Москва, 2010.
- [4] <http://www.atmel.com/Images/doc2490.pdf>

*Рукопись поступила 26 декабря 2012 г.*

В.Ф. Головкин, С.Н. Головня, С.А. Горохов, Е.А.Устинов

Система перемещения гамма-детектора установки СВД.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 27.12.2012.      Формат 60 × 84/16.      Цифровая печать.  
Печ.л. 1,2.      Уч.– изд.л. 1,63.      Тираж 80.      Заказ 64.      Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2012-26, ИФВЭ, 2012

---