

УДК 64.011.56

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ**

*канд. техн. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕСКИЙ, П.В. ПАВЛОВЕЦ, Д.Г. РУГОЛЬ, И.С. РУСЕЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлена реализация автоматизированной системы управления параметрами электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером на основе микроконтроллеров фирмы Atmel как части разрабатываемого программно-аппаратного комплекса управления электронно-лучевой установкой.*

**Введение**

Расширение области применения электронно-лучевых технологий невозможно без глубокой автоматизации технологического процесса в целом. Это предполагает поиск конкретных решений по автоматизации отдельных блоков и систем. Если в области автоматизации позиционирования обрабатываемой детали и вакуумной системы существуют промышленные разработки, то задача автоматизации электронно-лучевого энергокомплекса на базе плазменных источников электронов остается нерешенной. Тогда как плазменные источники заряженных частиц представляют собой эффективную альтернативу традиционным термокатодным пушкам в плане импортозамещения наукоемкого оборудования, поэтому задача автоматизации электронно-лучевого комплекса на базе плазменных источников представляется актуальной и необходимой. При этом автоматизированная система управления параметрами электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером либо должна быть совместима с существующей системой управления технологическим процессом (вакуумный пост, позиционирование детали), либо представлять собой часть разрабатываемого комплексного программно-аппаратного продукта.

Готовые системы автоматизации отечественного производства отсутствуют, а зарубежные аналоги, как правило, реализуются на промышленных микроконтроллерах и представляют собой завершенную и отлаженную программно-аппаратную систему, разработанную под конкретный электронно-лучевой комплекс на базе термокатодной пушки. Узкая направленность зарубежных разработок делает необходимой адаптацию существующих разработок по автоматизации электронно-лучевого комплекса для использования плазменных источников заряженных частиц, обладающих рядом существенных отличий. Внесение подобного рода изменений сопряжено с повышенным риском создания ошибочного программного кода и зачастую намного сложнее создания собственной разработки. Следует также отметить высокую цену зарубежных разработок и тот факт, что продается, как правило, только разработанный продукт, а приобретение исходных кодов и средств разработки не входит в стандартную поставку. Таким образом, целесообразна разработка собственного программно-аппаратного комплекса автоматизации электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером, с использованием современной элементной базы и методов программирования.

**Структурная схема электронно-лучевой пушки, системы электропитания и управления**

Схема представлена на рисунке 1 и включает следующие элементы:

- электронно-лучевую пушку с плазменным эмиттером;
- блок питания разряда (БПР) с установленными датчиками напряжения и тока для измерения тока и напряжения разряда. Блок питания разряда управляется напряжением  $U_{пр}$ ;
- высоковольтный источник питания (ВИИ) предназначенный для получения ускоряющего напряжения, необходимого для формирования электронного пучка (выходные напряжения: 10, 15, 30 кВ). Высоковольтный источник питания имеет датчики напряжения и тока пучка;
- шаговый двигатель для выбора ускоряющего напряжения;
- фокусирующую линзу (электромагнитная катушка) с датчиком тока;
- блок питания фокусирующей линзы (БПФЛ). Управление БПФЛ осуществляется путем подачи на вход требуемого напряжения  $U_{ф}$ ;
- систему отклонения электронного пучка, которая включает две расположенных ортогонально электромагнитных катушки. Это обеспечивает перемещение луча в плоскости независимо по двум координатам  $X$  и  $Y$ ;
- усилитель отклоняющего напряжения по оси  $X$  –  $УОН_x$ , управляемый напряжением  $U_{ox}$ ;
- усилитель отклоняющего напряжения по оси  $Y$  –  $УОН_y$ , управляемый напряжением  $U_{oy}$ ;
- натекаТЕЛЬ, предназначенный для подачи в разрядную камеру ЭИИ плазмообразующего газа (воздуха) с требуемой скоростью;

- электромагнитный клапан (ЭМК) для управления натекателем;
- вакуумную камеру (отдельный объект автоматизации);
- систему позиционирования детали (отдельный объект автоматизации).

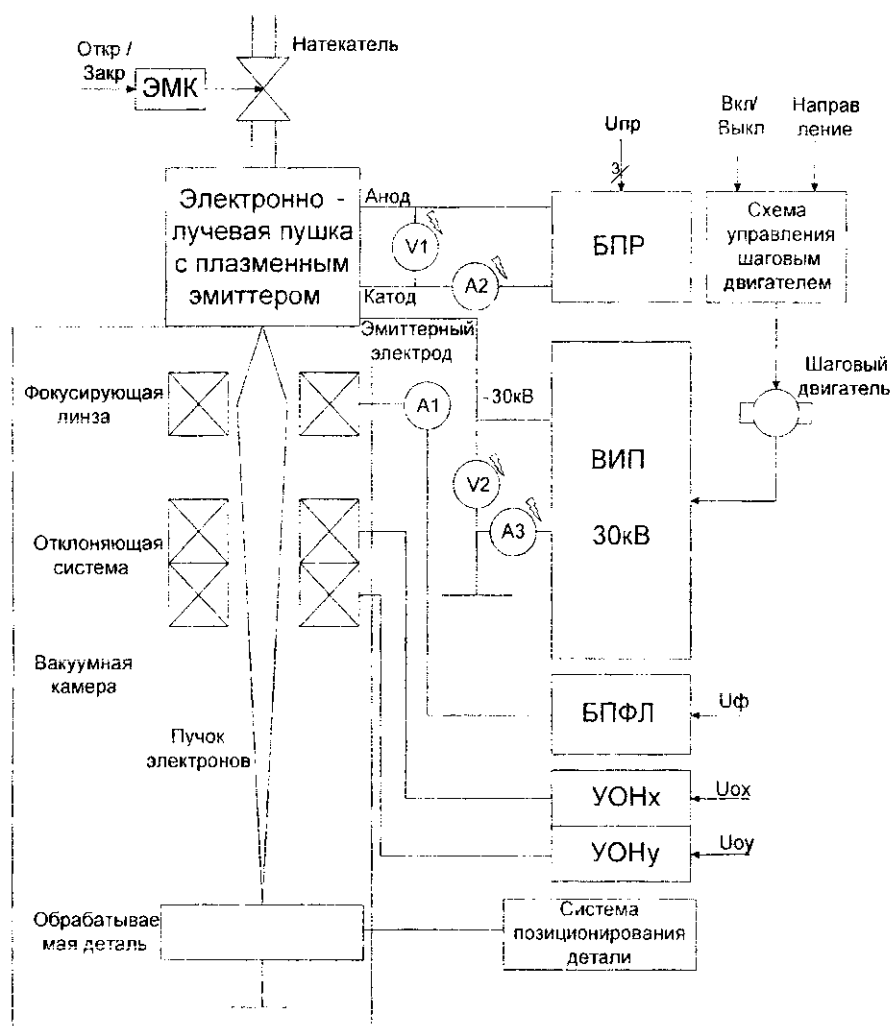


Рис. 1. Структурная схема электронно-лучевой пушки, системы электропитания и управления

(Символ молнии, изображенный рядом с датчиками, говорит о том, что подключение этих датчиков к цифровым схемам управления должно быть реализовано через гальваническую развязку)

### Входные/выходные сигналы системы автоматизации

Согласно структурной схеме (см. рис. 1) входными являются аналоговые сигналы, поступающие с датчиков (табл. 1). Выходными – управляющие сигналы, поступающие на исполнительные устройства (табл. 2).

Таблица 1

Входные сигналы системы

Параметры	Обозначение	Датчик
Напряжение разряда	$U_p$	V1
Ток разряда	$I_p$	A2
Ускоряющее напряжение	$U_y$	V2
Ток пучка	$I_n$	A3
Ток фокусировки	$I_f$	A1

Таблица 2

Управляющие сигналы системы

Исполнительное устройство	Количество информационных разрядов	Аналоговый (обозначение)/ цифровой
Блок питания разряда	3	Цифровые
Высоковольтный источник питания	2	Цифровые
Блок питания фокусирующей линзы	1	Аналоговый (U <sub>f</sub> )
Усилитель отклоняющего напряжения X	1	Аналоговый (U <sub>ох</sub> )
Усилитель отклоняющего напряжения Y	1	Аналоговый (U <sub>оу</sub> )
Электромагнитный клапан	1	Цифровой

**Программно-аппаратный комплекс**

Разработанная автоматизированная система управления параметрами электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером представляет собой программно-аппаратный комплекс, структурная схема которого изображена на рисунке 2.

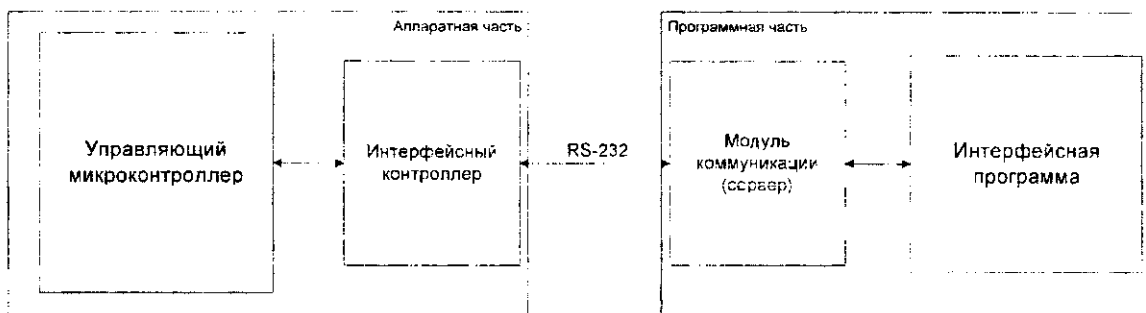


Рис. 2. Структура системы автоматизации управления электронно-лучевой пушкой с плазменным эмиттером

Аппаратная часть комплекса содержит:

- датчики, снимающие основные параметры электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером (места установки датчиков показаны на рис. 1);
- микроконтроллер AVR фирмы Atmel, обрабатывающий поступающую с датчиков информацию и выдающий управляющие сигналы (управляющий микроконтроллер);
- микроконтроллер AVR фирмы Atmel, в задачи которого входит обмен данными с компьютером по интерфейсу RS-232 (интерфейсный микроконтроллер).

Функциональная схема аппаратной части устройства изображена на рисунке 3.

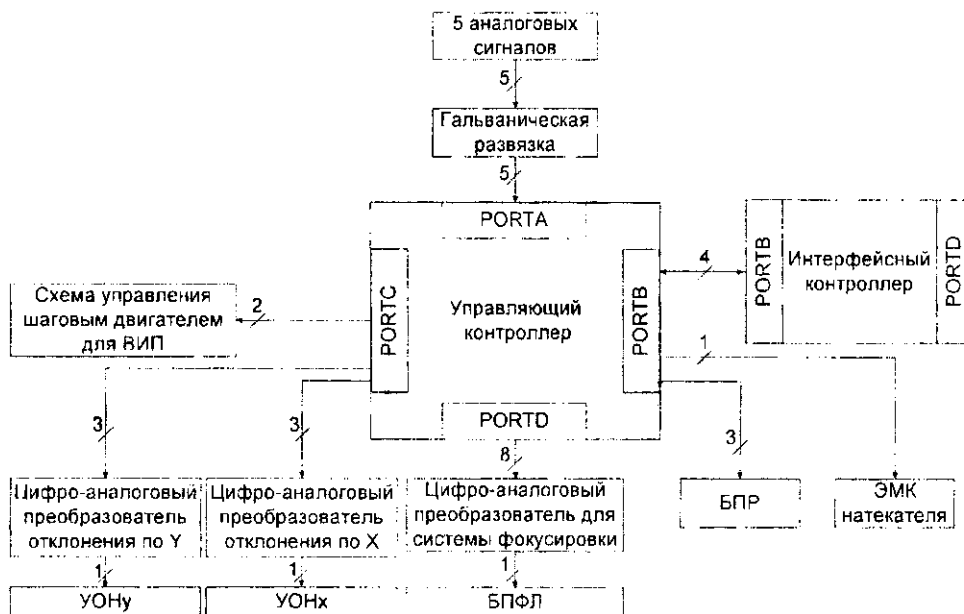


Рис. 3. Функциональная схема аппаратной части устройства

Аналоговые сигналы подаются через гальваническую развязку на встроенный в управляющий микроконтроллер многоканальный аналого-цифровой преобразователь. Для связи интерфейсного контроллера с управляющим контроллером используется последовательный интерфейс SPI. Следует отметить, что интерфейс SPI позволяет реализовать расширяемость системы путем подключения к общей шине нескольких устройств.

Два сигнала порта *C* управляющего контроллера подаются на схему управления шаговым двигателем высоковольтного источника питания для выбора величины ускоряющего напряжения: первый – включение/отключение шагового двигателя; второй – направление движения. Оставшиеся шесть сигналов порта *C* используются для управления отклонением электронного пучка. Три бита задают отклонение пучка по оси *X* и три бита – по оси *Y*. Цифровые значения отклонений по осям *X* и *Y* подаются на соответствующие цифро-аналоговые преобразователи, после чего полученные аналоговые сигналы поступают на входы усилителей отклоняющего напряжения по осям *X* и *Y*. Восемь разрядов порта *D* контроллера подаются на цифро-аналоговый преобразователь, после чего сформированный аналоговый сигнал подаётся на блок питания фокусирующей линзы. Порт *A* настроен на работу в режиме многоканального АЦП. Четыре сигнала порта *B* задействованы для обмена данными между управляющим и интерфейсным контроллерами по интерфейсу SPI. Один сигнал порта *B* подается на электромагнитный клапан натекателя (открыт/закрыт), оставшиеся три сигнала служат для управления блоком питания разряда.

В программной части спроектированы и реализованы: микропрограмма для управляющего микроконтроллера; микропрограмма для интерфейсного микроконтроллера; программа-сервер; интерфейсная программа.

Микропрограмма для управляющего микроконтроллера состоит из четырёх частей. Первая часть – это основная программа, которая выполняется при старте и перезагрузке контроллера. В этой части происходит инициализация контроллера. Вторая часть – это обработчик прерывания приёма пакета по SPI. Эта часть реализует обмен информацией между интерфейсным и управляющим микроконтроллерами. Третья часть – это обработчик прерывания завершения преобразования АЦП. Четвертая часть – это процедура обработки принятого пакета, вызываемая обработчиком прерывания приёма пакета по SPI. Схема работы управляющего микроконтроллера приведена на рисунке 4.



Рис. 4. Схема работы управляющего микроконтроллера

При старте контроллера осуществляется инициализация регистров стека, АЦП и SPI. Также производится конфигурация вводов-выводов контроллера, считываются входные аналоговые сигналы. Это необходимо для корректного включения устройства во время работы установки. После инициализации подается разрешающий сигнал работы выходных выводов. Завершение преобразования сигнала с каждого канала АЦП вызывает соответствующее прерывание. В обработчике этого прерывания считывается значение аналогового сигнала и передается по SPI дальше в интерфейсный контроллер. При приеме по SPI пакета, устанавливающего выводы, запускается процедура установки дискретных выводов, с которых будут выдаваться управляющие сигналы.

Микропрограмма для интерфейсного микроконтроллера реализует следующие функции:

- получение низкоуровневых пакетов-запросов от программы-сервера по интерфейсу RS-232;
- вычисление и проверка контрольной суммы;
- разбор полученного пакета-запроса;
- передача номера команды и данных управляющему микроконтроллеру по интерфейсу SPI;
- прием результата выполнения команды от управляющего микроконтроллера по интерфейсу SPI;
- формирование пакета-ответа для программы-сервера;
- передача пакетов-ответов программе-серверу по интерфейсу RS-232;
- формирование и передача программе-серверу служебных команд, в случае обнаружения ошибки контрольной суммы.

Наличие отдельного микроконтроллера реализующего функции коммуникации с персональным компьютером по интерфейсу RS-232 дает следующие преимущества:

- возможность расширения системы путем подключения других устройств на шину SPI без необходимости использования дополнительных коммуникационных портов RS-232;
- управляющий (управляющие) контроллер (контроллеры) освобождается от таких второстепенных действий, как вычисление и проверка контрольной суммы, разбор пакетов от программы-сервера и т.п.;
- обеспечивается единый формат передаваемой информации, что значительно упрощает взаимодействие частей системы.

В программу-сервер вынесены все функции коммуникации с устройством:

- получение пакетов от программ-клиентов;
- вычисление контрольной суммы;
- формирование низкоуровневых пакетов и отправка их на устройство;
- получение пакетов от устройства;
- определение наличия связи с устройством;
- оповещение программ-клиентов о событиях пропажи/восстановления связи с оборудованием;
- контроль подключения и отключения интерфейсных программ.

Интерфейсная программа предоставляет пользователю возможность управления электронно-лучевой пушкой и отображает визуальную информацию о текущих значениях датчиков. Пользователь, основываясь на показаниях датчиков, может регулировать основные параметры электронно-лучевой пушки. Интерфейсная программа должна быть запущена при начале работы с электронно-лучевой пушкой, и должна функционировать до завершения техпроцесса. В случае выхода контролируемых параметров за установленные пределы пользователю выдается соответствующее сообщение.

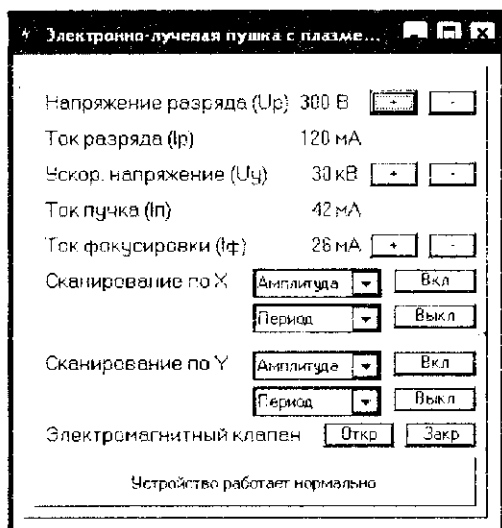


Рис. 5. Внешний вид программы-интерфейса

Для связи программы-сервера с интерфейсной программой используется технология «клиент – сервер». Внешний вид формы интерфейсной программы представлен на рисунке 5. В верхней части формы интерфейсной программы представлены текущие значения датчиков и созданы основные элементы управления. Внизу находится панель статуса, которая уведомляет пользователя о текущем состоянии системы. Если система функционирует нормально, то эта панель будет иметь зеленый цвет и выводить сообщение о том, что устройство функционирует нормально. В случае каких-либо неполадок (нет связи с контроллером и т.д.) эта панель будет иметь красный цвет, и на ней будет отображаться, какая именно неполадка произошла.

Следует также отметить, что программа отслеживает превышение пороговых значений основных параметров. При этом обеспечивается быстрое реагирование на аварийные ситуации, что повышает надежность электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером за счет исключения человеческого фактора.

### Протокол взаимодействия программной и аппаратной частей комплекса

Для осуществления обмена данными между программной частью и аппаратными устройствами был разработан собственный протокол передачи. Он представляет собой систему «запрос – ответ», в которой программа на стороне компьютера является ведущим, а устройство – ведомым.

Для передачи информации используется пакет фиксированного размера – 8 байт. Формат пакета представлен на рисунке 6.

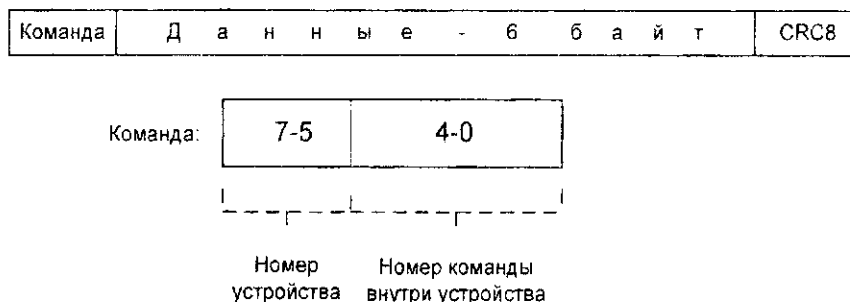


Рис. 6. Формат пакета обмена

Байт команды является уникальным идентификатором команды в рамках всей системы. Старшие 3 бита кодируют номер устройства. Это означает, что в системе может присутствовать до восьми устройств. Младшие 5 бит являются уникальным идентификатором команды внутри устройства, определяемого тремя старшими битами. Команда с номером 0 является служебной и генерируется программой-сервером и обрабатывается интерфейсным контроллером. Введено несколько типов команд с индексом 0 – это команды опроса при отсутствии информационных пакетов, команды-сообщения об ошибке передачи. Шесть байт данных содержат информацию, формат которой определяется номером команды. Байт CRC8 – контрольная сумма, вычисляемая по алгоритму полиномиального деления с полиномом CRC8.

Диаграммы обмена данными в системе изображены на рисунке 7.

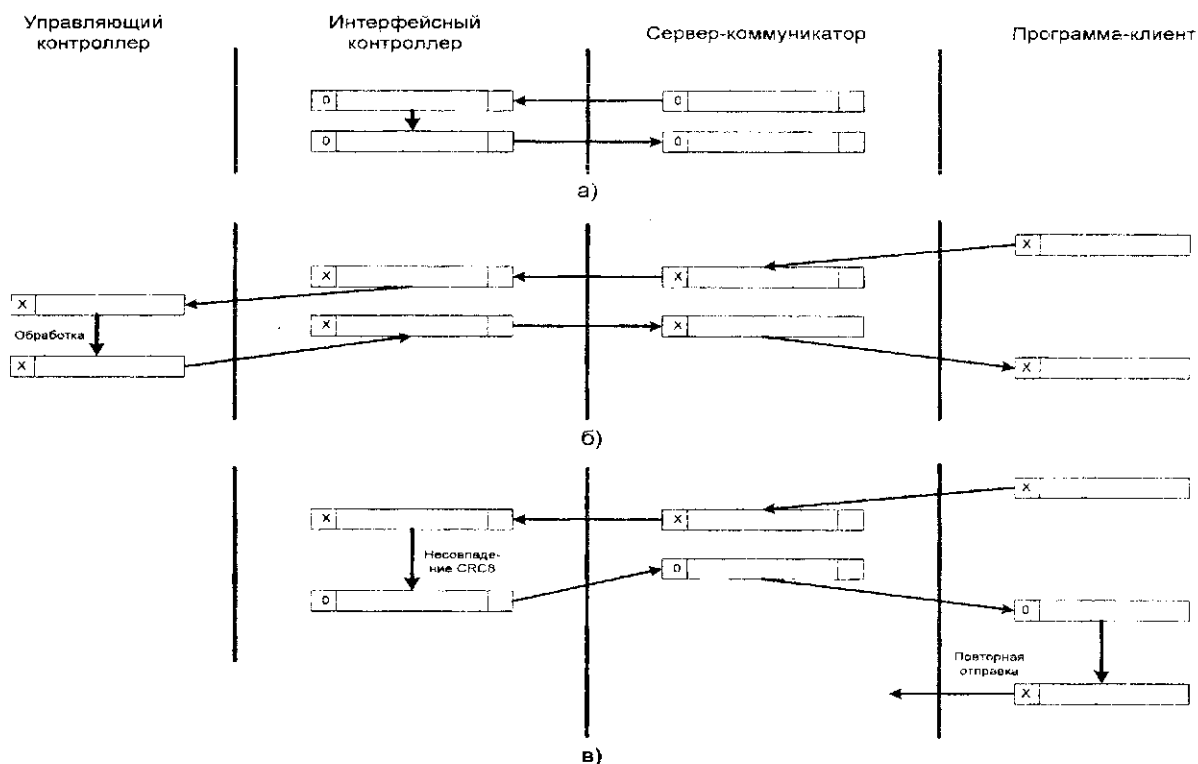


Рис. 7. Диаграммы обмена данными в системе:

а – передача служебного пакета; б – успешная передача команды; в – ошибка при передаче команды

Рисунок 7, а иллюстрирует обмен между программой-сервером и интерфейсным микроконтроллером служебной командой с номером 0 для подтверждения наличия связи с микроконтроллером. Программа-сервер отправляет интерфейсному контроллеру команду с номером 0. Контроллер, обработав эту команду, посылает программе-серверу подтверждение наличия связи. В случае если подтверждение наличия связи не будет получено, программа-сервер информирует интерфейсную программу о событии отсутствия связи с интерфейсным микроконтроллером.

На рисунке 7, б изображена успешная передача команды пользователя в управляющий микроконтроллер. Пользователь выбирает какое-либо действие в интерфейсной программе. Формируется соответствующая команда, которая передается программе-серверу. Программа-сервер отсылает эту команду на интерфейсный микроконтроллер по интерфейсу RS-232. Интерфейсный микроконтроллер проверяет, не произошла ли ошибка при передаче, и если ошибки не было, то посылает команду управляющему микроконтроллеру по интерфейсу SPI. Затем результат выполнения команды возвращается обратно в интерфейсную программу, где и происходит его визуальное отображение.

Рисунок 7, в отображает случай некорректной передачи команды по интерфейсу RS-232. Пользователь, как и в предыдущем случае, выбирает необходимое действие в интерфейсной программе. Формируется соответствующая команда, которая передается программе-серверу. Программа-сервер отсылает эту команду на интерфейсный микроконтроллер по интерфейсу RS-232. Интерфейсный микроконтроллер проверяет, не произошла ли ошибка при передаче. При обнаружении ошибки контрольной суммы интерфейсный контроллер формирует пакет с номером команды 0 и отправляет его обратно серверу-коммуникатору. Сервер-коммуникатор в свою очередь уведомляет интерфейсную программу об ошибке. После чего происходит повторная попытка отправки пакета. Попытки повтора в случае недоставки пакета продолжаются, пока не выйдет время, отведенное на выполнение одной команды, которое может задаваться в параметрах программы-сервера.

### Выводы

Разработанная система автоматизации представляет собой часть разрабатываемого общего программно-аппаратного комплекса для автоматизации электронно-лучевой установки.

Разработанная система позволит эксплуатировать электронно-лучевую пушку с плазменным эмиттером с удаленного терминала (персонального компьютера), предоставляя возможность размещения оператора в отдельном помещении. При этом следует ожидать повышение надежности и безопасности при работе с электронно-лучевой пушкой, а также повышение производительности установки и сокращение технологического цикла.

Кроме того, созданная система автоматизации позволит приблизить электронно-лучевой комплекс отечественного образца к современным зарубежным аналогам, повысить его конкурентоспособность в плане импортозамещения и внедрения в производство новых наукоемких технологий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ланкин Ю.Н. Датчики и преобразователи для процесса электронно-лучевой сварки. – М: Мир, 1991. – 238 с.
2. Электронно-лучевая сварка / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.