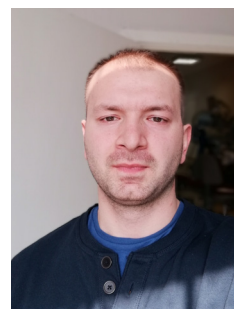




**Четвертаков А.А.**  
**Chetvertakov A.A.**  
магистрант Московского  
государственного  
технического университета  
им. Н.Э. Баумана  
г. Москва,  
Российская Федерация



**Санников А.С.**  
**Sannikov A.S.**  
аспирант, младший  
научный сотрудник  
Института конструкторско-технологической  
информатики  
Российской академии наук,  
г. Москва,  
Российская Федерация



**Глашев Р. М.**  
**Glashev R.M.**  
аспирант, младший  
научный сотрудник  
Института конструкторско-технологической  
информатики  
Российской академии наук,  
г. Москва,  
Российская Федерация

УДК 621.396

## СИСТЕМА ЧПУ ДЛЯ КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕТА В КАБИНЕ ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

Существует большое количество станков и комплексов, которые работают по стандартному протоколу STEP/DIR. При их модернизации возникают задачи, связанные с установкой дополнительного оборудования, содержащего в себе различные системы обратной связи, в частности, системы инерциальной навигации. Системы ЧПУ, установленные на данных комплексах, в основной своей массе не имеют возможности работы со специализированными интерфейсами, которые имеют дополнительные устройства и системы. Системы, которые имеют такую возможность, дорогостоящие и требуют высокой квалификации персонала для внедрения дополнительных систем, а следовательно, использование таких систем экономически нецелесообразно.

Объектом исследования является авиасимулятор – программно-аппаратный комплекс для моделирования процессов, происходящих при полете пассажирского самолета. Предметом исследования является система ЧПУ для управления данным комплексом.

Целью данной работы является создание системы ЧПУ, использующей систему инерциальной навигации в качестве системы обратной связи, имеющей дополнительные устройства и датчики для безопасной работы комплекса.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки универсальной системы числового программного управления с возможностью подключения различных видов датчиков обратной связи и интерфейсом прикладного программирования.

Для решения поставленной задачи в работе решен следующий комплекс задач:

1. Был изучен состав комплекса авиасимулятора, указаны его конструктивные особенности, которые необходимо было учесть при создании системы ЧПУ.
2. После анализа доступных интерфейсов был определен оптимальный интерфейс работы с сервоприводами.
3. Были определены и освещены дополнительные устройства для корректной и безопасной работы системы ЧПУ и комплекса в целом.
4. Согласно техническим требованиям и особенностям системы была выбрана необходимая элементная база. С помощью программных средств была создана печатная плата, после

изготовления была протестирована ее работоспособность на готовом устройстве.

**Ключевые слова:** микроконтроллер, сервопривод, авиасимулятор, инерциальная навигация, система ЧПУ, система обратной связи.

## THE CNC SYSTEM FOR THE FLIGHT MODELLING COMPLEX IN THE CABIN OF THE PASSENGER PLANE

There is a large number of machines and complexes which work under the standard STEP/DIR protocol. At their modernization there are tasks connected with installation of the additional equipment comprising various systems of feedback, in particular, of the system of inertial navigation. The CNC systems installed on these complexes in the main weight have no possibility of work with specialized interfaces which have additional devices and systems. Those systems which have such opportunity – expensive and demand high qualification of personnel for introduction of additional systems, and, therefore, use of such systems is economically inexpedient.

Object of a research is the aviasimulator – a hardware and software system for modeling of the processes happening when flying the passenger plane. An object of research is the CNC system for management of this complex.

The purpose of this work is creation of the CNC system, the using system of inertial navigation as the system of feedback and having additional devices, and sensors for safe work of a complex.

The relevance of work is caused by need of development of universal system of numerical program control with a possibility of connection of different types of sensors of feedback and the application programming interface.

For the solution of an objective in work the following complex of tasks is solved:

1. The structure of a complex of an avia simulator was studied, its design features which needed to be considered during creation of the CNC system are specified.

2. After the analysis of available interfaces, the optimum interface of work with servo-drivers was defined.

3. Additional devices for correct and safe work of the CNC system and a complex in general were defined and lit.

4. According to technical requirements and features of system, the necessary element base was chosen, by means of software the printed circuit board was created, after production its working capacity on the ready device was tested.

**Key words:** microcontroller, servo-driver, aviasimulator, inertial navigation, CNC system, system of feedback.

### Введение

Существует большое количество станков и комплексов, которые работают по стандартному протоколу STEP/DIR. При их модернизации возникают задачи, связанные с установкой дополнительного оборудования, содержащего в себе различные системы обратной связи, в частности, системы инерциальной навигации. Системы ЧПУ, установленные на данных комплексах, в основной своей массе не имеют возможности работы со специализированными интерфейсами, которые есть у дополнительных устройств и систем. Системы, которые имеют такую возможность, дорогостоящие и требуют высокой квалификации персонала для внедрения

дополнительных систем, а следовательно, использование таких систем экономически нецелесообразно.

Объектом исследования является авиасимулятор – программно-аппаратный комплекс для моделирования процессов, происходящих при полете пассажирского самолета. Предметом исследования является система ЧПУ для управления данным комплексом.

Целью данной работы является создание системы ЧПУ, использующей систему инерциальной навигации в качестве системы обратной связи и имеющей дополнительные устройства и датчики для безопасной работы комплекса.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки универсальной системы числового программного управления с возможностью подключения различных видов датчиков обратной связи и интерфейсом прикладного программирования.

Для решения поставленной задачи в работе поставлен следующий комплекс задач:

1. Изучение состава комплекса и его конструктивных особенностей.
2. Обоснование целесообразности создания собственной системы ЧПУ.
3. Определение интерфейсов взаимодействия и управления.
4. Определение дополнительных устройств для работы и интерфейса их работы.
5. Разработка структуры устройства.
6. Разработка печатной платы устройства.

### Состав комплекса

Комплекс моделирования полета представляет собой конструкцию, кинематическая схема которой позволяет осуществлять поворот модели кабины летального аппарата, с расположенным внутри самолетным креслом (так называемая кабина авиасимулятора)

и человеком, сидящим на нем, по трем осям вращения: крена (поворот вокруг оси  $Ox$ ), тангажа (поворот вокруг оси  $Oy$ ) и рысканья (поворот вокруг оси  $Oz$ ), а также вертикальное перемещение подвижной части установки вдоль оси  $Oz$ .

Приведение в движение частей установки (рисунок 1), совершающих угловые перемещения, осуществляется за счет серводвигателей 3, установленных на каждой из осей вращения. Вертикальное линейное перемещение кабины 4 осуществляется за счет лебедки 1, которая установлена на неподвижной части комплекса на верхних силовых балках. Лебедка оснащена тросом 2. Тяговый двигатель лебедки представляет из себя сервопривод, идентичный тому, что установлен на других осях. Вертикальное перемещение служит для введения вращающихся частей установки в рабочее положение. Под рабочим положением подразумевается такое положение, при котором установка может совершать вращение вокруг заданных осей без контакта кабины с поверхностью пола, на котором установлен комплекс.

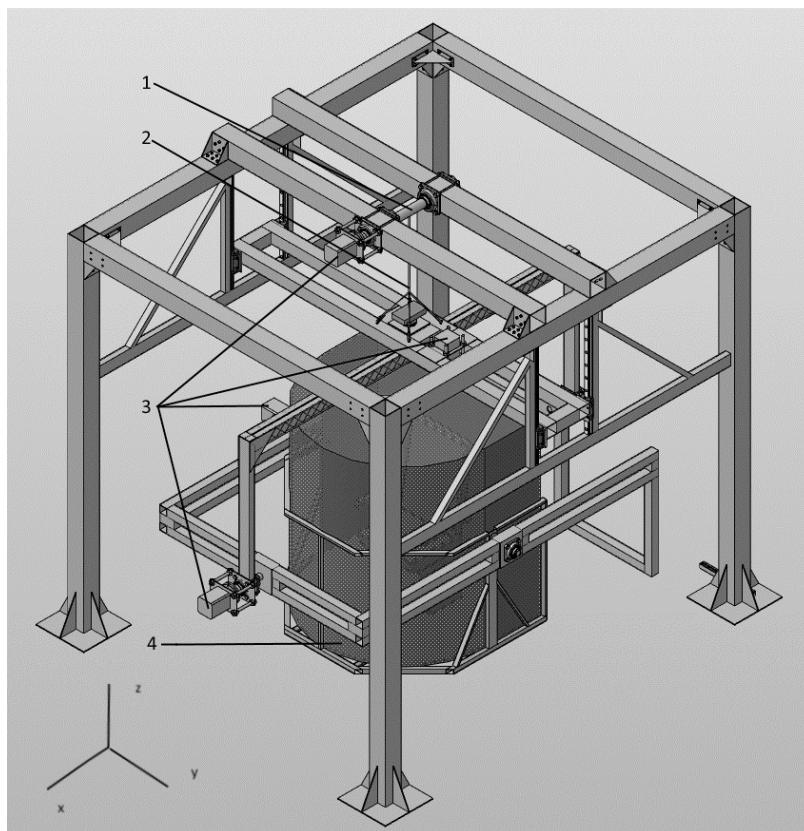


Рисунок 1. 3D-модель комплекса

Обеспечение работоспособности комплекса будет осуществляться путем внедрения системы ЧПУ с учетом следующих требований:

1. Возможность ручного дистанционного управления.
2. Возможность записи программ движения для последующего их воспроизведения в автоматическом режиме.
3. Возможность подключения системы инерциальной навигации в качестве системы обратной связи.
4. Наличие интерфейса прикладного программирования.
5. Наличие систем защиты для обеспечения безопасности эксплуатации установки и предотвращения ее поломки.

Исходя из вышеописанных требований, сформулируем тезисы, которые определяют структуру системы ЧПУ:

1. Обеспечение пропорционального управления четырьмя независимыми сервоприводами.
2. Наличие специализированного интерфейса для подключения системы инерциальной навигации.
3. Наличие энергонезависимой памяти для записи программ и возможность ее замены в случае заполнения установленной.
4. Наличие устройств индикации для упрощения отладки системы.
5. Наличие интерфейсов подключения систем защиты.
6. Наличие интерфейса подключения беспроводных устройств дистанционного управления.

В ходе анализа существующих систем ЧПУ было выяснено, что на рынке существует достаточно большое количество различных систем ЧПУ, однако все они не удовлетворяют требованиям, представленным в данном проекте. Основными недостатками таких систем можно назвать:

1. Невозможность подключения системы инерциальной навигации.
2. Отсутствие возможности замены энергонезависимой памяти.
3. Отсутствие интерфейса прикладного программирования.

В связи с этим было принято решение о разработке системы ЧПУ для комплекса моделирования полетов.

### **Интерфейс работы с сервоприводами**

Сервоприводы Panasonic MINAS A5 имеют следующие интерфейсы для работы:

1. USB.
2. RS-232.
3. RS-485.
4. STEP/DIR.

Для взаимодействия с сервоприводом был выбран интерфейс STEP/DIR, так как он является наиболее универсальным в работе. В случае замены модели или производителя сервоприводов, либо в случае использования данной системы ЧПУ в любой другой установке подобного типа система может быть с минимальными изменениями подключена к серводрайверам.

### **Определение дополнительных устройств для работы комплекса и системы чпу**

#### *Системы защиты*

1. Тормозная система серводвигателей.

Серводвигатели, установленные на комплексе, имеют в своем распоряжении тормозной механизм, предназначенный для предотвращения нежелательного вращения вала двигателя в случае внезапного отключения электропитания комплекса. Механизм расположен внутри корпуса двигателя. Управление механизмом осуществляется путем подачи управляющего напряжения на катушку электрического тормоза. При наличии напряжения на катушке тормоз отпущен.

2. Концевые выключатели.

Для предотвращения поломки установки в случае отказа системы инерциальной навигации на каждой из осей комплекса были установлены концевые выключатели. Выключатели имеют нормально замкнутое включение для дополнительной защиты установки в случае обрыва соединительного кабеля, а также для диагностики обрыва этого кабеля.

#### *Устройство индикации*

Для обеспечения индикации работы установки в конструкции устройства предусмотрен жидкокристаллический дисплей LCD1602. Экран этого дисплея способен отображать одновременно до 32 символов (16 столбцов и 2 строки). Подключение к микроконтроллеру осуществляется по синхронному 8-битному параллельному интерфейсу.

### *Постоянное запоминающее устройство*

В качестве ПЗУ в конструкции была выбрана SD-карта подтипа HDHC емкостью 32 ГБ. Карта имеет 10-й класс скорости записи, что удовлетворяет требованиям технического задания по скорости записи. Карта подключается к контроллеру с помощью адаптера, при необходимости может быть заменена на другую карту такой же емкости или с большей, с учетом того, что класс записи карт должен оставаться не ниже 10-го.

### *Пульт дистанционного управления*

Для дистанционного управления комплексом применена технология Bluetooth. Устройство дистанционного управления представляет собой модельный пульт с четырьмя пропорциональными джойстиками. Джойстики представляют собой потенциометры с повышенной износостойкостью резистивного слоя. В качестве передатчика используется Bluetooth-модуль HC-05. В пульте использован микроконтроллер ATmega 328P.

### **Требования и выбор элементной базы**

Для решения задачи выбора элементной базы были сформулированы следующие технические требования:

1. Возможность работы с интерфейсом STEP/DIR.
2. Возможность обработки состояний конечных выключателей.
3. Возможность работы LCD-дисплеем 16\*2 посредством параллельного интерфейса.
4. Возможность работы с SD-картой посредством интерфейса SDIO.
5. Возможность работы с интерфейсом устройства дистанционного управления.
6. Возможность работы с тормозами сервоприводов.

Вышеперечисленные требования подразумевают наличие в структуре системы микроконтроллера. После анализа рынка микроконтроллеров был выбран контроллер STM32F407GT6 от компании STMicroelectronics, характеристики которого представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Характеристики выбранного контроллера

Название характеристики	Значение параметра
Вычислительная мощность	210 DMIPS
Тактовая частота	168 МГц
Напряжение питания	3,3 В
Объем ПЗУ	1 Мбайт
Объем ОЗУ	192 Кбайт
Наличие аппаратного UART	есть
Наличие интерфейса SDIO	да
Количество портов ввода-вывода	82

Характеристики МК удовлетворяют требованиям, и его использование позволяет сконструировать систему управления с установленными функциональными возможностями. Разработка схемотехники системы ЧПУ основывается на том, что данный МК будет являться вычислительным устройством.

При работе с интерфейсом STEP/DIR для согласования уровней сигнала применены транзисторы IRL520NPBF от компании International Rectifier. Пороговое напряжение открытия данных транзисторов лежит в пределах от 1,0 до 2,0 вольт, что позволяет использовать логический уровень 3,3 В микрокон-

троллера для управления транзисторами без использования дополнительных драйверов.

### **Требования к печатной плате**

Наиболее простым решением установки микроконтроллера на плату является использование его отладочной платы со штыревыми разъемами. Использование отладочной платы упрощает конструкцию разрабатываемой печатной платы (ПП), так как вместо установки на плату микроконтроллера с обвязкой, имеющей ко всему прочему еще и уменьшенные допуски на изготовление ПП, устанавливается ответная часть разъемов отладочной платы. Использование разъемов также

упрощает замену микроконтроллера в случае его выхода из строя.

Для установки на плату адаптера SD карт и ВТ приемника HC-05 на плате также применяются штыревые разъемы.

После определения всех требований и задач к системе ЧПУ была предложена принципиальная схема устройства. На основе принципиальной схемы была выпущена печатная плата. После сборки и тестирования комплекса работоспособность системы ЧПУ была подтверждена.

### Вывод

1. Был изучен состав комплекса авиасимулятора, указаны его конструктивные особенности, которые необходимо было учесть при создании системы ЧПУ.

2. После анализа доступных интерфейсов был определен оптимальный интерфейс работы с сервоприводами.

### Список литературы

1. Операционная инструкция MINAS A5 [Электронный ресурс] // URL: [https://industrial.panasonic.com/content/data/MT/PDF/manual/en/acs/minas-a5-2\\_manu\\_e.pdf](https://industrial.panasonic.com/content/data/MT/PDF/manual/en/acs/minas-a5-2_manu_e.pdf)
2. Справочное руководство к STM32F4 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407-417.html>
3. Справочное руководство IRL520NPBF [Электронный ресурс] // URL: <https://www.vishay.com/docs/91298/91298.pdf>
4. Пользовательская инструкция STM32F4 Disco [Электронный ресурс] // URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М.: Мир, 1983. – Т. 1.

3. Были определены и освещены дополнительные устройства для корректной и безопасной работы системы ЧПУ и комплекса в целом.

4. Согласно техническим требованиям и особенностям системы, была выбрана необходимая элементная база; с помощью программных средств создана печатная плата, протестирована ее работоспособность на готовом устройстве.

Данная разработка может быть внедрена в любые подобные комплексы, в которых управление двигателями осуществляется посредством интерфейса STEP/DIR, и требуется наличие обратной связи для позиционирования механизмов и иных нужд с минимальными изменениями, что делает систему ЧПУ универсальной и подготовленной для широкого применения.

### References

1. Operating instruction MINAS A5 [Electronic resource] // URL: [https://industrial.panasonic.com/content/data/MT/PDF/manual/en/acs/minas-a5-2\\_manu\\_e.pdf](https://industrial.panasonic.com/content/data/MT/PDF/manual/en/acs/minas-a5-2_manu_e.pdf)
2. STM32F4 Reference Manual [Electronic resource] // URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407-417.html>
3. Reference Manual IRL520NPBF [Electronic resource] // URL: <https://www.vishay.com/docs/91298/91298.pdf>
4. User instruction STM32F4 Disco [Electronic resource] // URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
5. Horowitz P., Hill U. The Art of Circuit Engineering. - M.: Mir, 1983. - T. 1.