

На правах рукописи

**Калинин
Алексей Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДВЕСКИ АВИАЦИОННЫХ
СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ НА ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ**

05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

_____/Калинин А.В./

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана на кафедре «Специальная робототехника и мехатроника»

Научный руководитель:

к.т.н., доцент, зав. каф. СМ7
Рубцов Иван Васильевич.

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Тягунов Олег Аркадьевич
(МИЭРА)
к.т.н. Третьяк Владимир Иванович
(ОАО «Аэроэлектромашина»)

Ведущая организация:

Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина.

Защита состоится _____ 2011г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 в МГТУ им. Н.Э.Баумана по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана

Автореферат разослан 1 августа 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Боевой опыт, полученный в вооруженных конфликтах конца XX – начала XXI веков, убедительно подтверждает возрастающую роль ВВС. Применение авиационных комплексов, оснащенных высокоточным оружием, повышает эффективность воздушных оборонительных и наступательных операций. При этом эффективность боевых действий современной военной авиации определяется как её собственными параметрами, так и параметрами системы подготовки к вылету на аэродроме. Особенно остро проблема подготовки к вылету встаёт при повторном вылете авиации. Проведенные исследования позволяют говорить о том, что перспективный авиационный комплекс фронтовой авиации (ПАК ФА) обязывает разработчиков робототехники обратить внимание на создание роботизированной техники для обслуживания самолетов и вертолетов. Кроме того, задачи роботизации военной техники сформулированы в комплексной целевой программе «Роботизация ВВТ» Минобороны (раздел «Нетрадиционные вооружения»).

Обратимся к рис.1, где частично отражены проблемы, с которыми сталкивается инженерно-технический персонал при подготовке летательного аппарата (ЛА) к боевому применению.

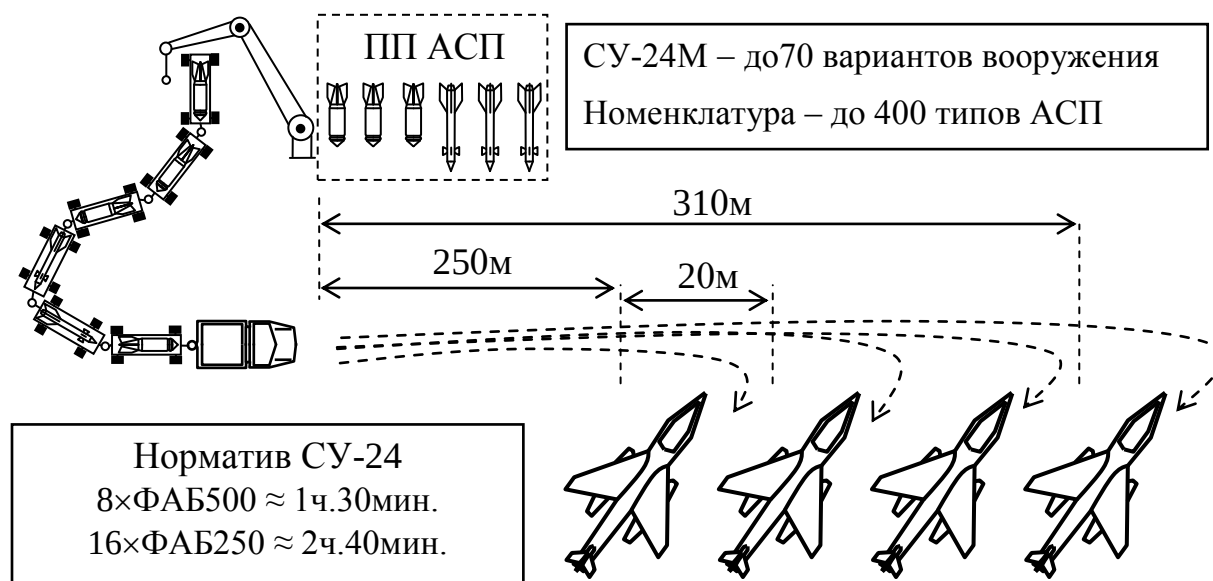


Рис.1. Площадка подготовки ЛА к боевому применению

Средства поражения готовятся к боевому применению на складах и выставляются в места подготовки боеприпасов. Далее они загружаются на транспортировщик, доставляются к площадке подготовки авиационных средств поражения (АСП) и выгружаются. При этом используются технические средства для погрузочно-разгрузочных работ – электрокары, краны, устройства с механическим, электрическим приводом. Их мало, а в большинстве случаев они вообще отсутствуют. Из-за этого погрузка и разгрузка часто выполняются вручную.

Далее на площадке подготовки АСП боеприпасы выкладывают на тележки-подъемники и доставляют к летательному аппарату. Здесь тележки отцепляют от транспортной машины (которой может и не быть) и вручную закатывают под точки подвески ЛА. Затем боеприпасы с помощью гидравлического насоса поднимают и крепят на узлах подвески. Все это требует сноровки и особых навыков в подготовке личного состава. По сути, тележка-подъемник предназначена только для поднятия боеприпаса. Она имеет ограниченную рабочую зону и с ее помощью трудно сместить в сторону ракету или бомбу. Если, выставляя тележку, специалист ошибется на считанные сантиметры, то все придется начинать сначала: откатывать, разворачивать, подкатывать. В ряде случаев подвеска боеприпаса вручную требует меньше времени, а поэтому на выполнение данной операции привлекается весь имеющийся инженерно-технический состав. На технике пятого поколения такой способ подвески будет невозможным. К примеру, у ПАК ФА по ряду причин точки подвески вооружения расположены в грузоотсеке. Его размеры не позволяют выполнить подвеску боеприпасов с использованием физической силы. В случае с подвеской ракет задача намного усложняется ввиду того, что ракета должна иметь более точное базирование при выполнении операции подвески. Анализ существующих систем и технологий подготовки и снаряжения ЛА к вылету показывает их недостаточную эффективность и производительность. Это делает актуальными исследования в области разработки новых средств автоматизации, позволяющих существенно повысить готовность ЛА к вылету. Основанием для разработки робота снаряжения являются следующие положения:

1. Необходимость боевого обеспечения до 5-ти вылетов в сутки.
2. Трудозатраты на подготовку ЛА ко второму вылету в 4-10 раз превосходят необходимые трудозатраты по другим работам, их объем составляет до 80% общих трудозатрат на подготовку самолета к боевым вылетам, в них участвует до 60% инженерно-технического состава (ИТС), а уменьшение численности ИТС на 20% увеличивает время подготовки на 15-26%.
3. Энергозатраты технического состава составляют 550-767 Дж/с в условиях приближенных к боевым, что в два раза выше установленных ГОСТом нормы.
4. Установка АСП на различно расположенные агрегаты подвески.
5. Для перспективных ЛА предусмотрено размещение СП в отсеке вооружения, поэтому подвеска АСП на внутрифюзеляжные точки крепления накладывает определенные требования на средства снаряжения, а именно:
 - а) подвеска АСП осуществляется вне зоны видимости оператора с учетом пространственных ограничений отсека и особенностей конструкции АСП;
 - б) существует необходимость пространственного манипулирования АСП, обладающих большой массой, размерами и сложной конфигурацией;

в) предъявляются высокие требованиями к точности позиционирования АСП;

г) соблюдения мер безопасности, т.к. процесс подвески не безопасен;

д) существуют жесткие ограничения на динамику перемещений АСП под ЛА.

В данной работе рассмотрены проблемы, связанные с роботизированной подвеской авиационных средств поражения на летательные аппараты. Задача автоматической подвески АСП на ЛА решается с помощью робота снаряжения, оснащённого шестикоординатным приводом специальной компоновки, что в свою очередь потребовало создания сложных алгоритмов формирования задающих воздействий на многокоординатную систему. Результаты данной работы могут быть использованы в промышленности и в других отраслях, например:

- автоматизированные и роботизированные склады – точная установка контейнеров и паллет на стеллажи и их съём;

- автоматизированные и роботизированные цеха – подача и съём в заданных точках конвейера деталей и блоков при их точном позиционировании;

- автоматизация при проведении сборочных и ремонтных работ с крупногабаритными изделиями, например, замена авиационных двигателей;

- роботизированное позиционирование больных при диагностике и лечении и др.

Роботизация является важной составляющей развития новых технологий военной и специальной техники, энергетики, промышленного оборудования, авиа- и судостроения, транспорта и других сфер деятельности, которые указаны в «Приоритетных направлениях развития науки, технологии и техники Российской Федерации», в «Направлениях целевых фундаментальных исследований» в рамках программ Федерального агентства по промышленности.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является развитие методов проектирования комплекса роботизированной подвески авиационных средств поражения на ЛА и его экспериментальные исследования. Для этого автором поставлены и решены следующие задачи:

- 1) разработана оригинальная конструкция исполнительного устройства робота снаряжения (РС), обеспечивающая прецизионное позиционирование тяжелых крупногабаритных объектов и проведена оптимизация его параметров;
- 2) разработана структура и состав информационной системы РС для выполнения необходимых высокоточных операций;
- 3) создана система управления РС, обеспечивающая прецизионное позиционирование тяжелых крупногабаритных объектов;

- 4) синтезированы алгоритмы и программное обеспечение дистанционного и автоматического управления роботизированного комплекса снаряжения;
- 5) разработана и обоснована методика проектирования автоматической системы управления РС;
- 6) проведена экспериментальная проверка разработанного и созданного исполнительного механизма, информационной системы и системы управления РС.

Научная новизна работы. В диссертации разработана и обоснована методика проектирования автоматической системы управления роботов для подвески АСП на ЛА. Разработано алгоритмическое обеспечение дистанционного и автоматического управления РС. Разработана оригинальная конструкция исполнительного устройства РС и проведена оптимизация его параметров.

Практическая ценность. Результаты экспериментальных и полунатурных исследований показали целесообразность использования предложенной методики создания роботизированных средств снаряжения АСП. Разработанные конструкция исполнительного устройства, информационная система и система управления позволяют существенно сократить время снаряжения ЛА средствами поражения. Практическая полезность результатов диссертации подтверждается актом о внедрении в НИР «Автоматика» и на кафедре «Эксплуатация комплексов авиационного вооружения и робототехника» Военно-воздушной инженерной академии им. профессора Н.Е. Жуковского.

Апробация работы и публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ. Результаты работы в достаточной степени опубликованы в журналах «Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана», «Оборонная техника», «Математико-статистический анализ» МЭСИ. Докладывались на Международной научно-технической конференции (Геленджик, 2009), Всероссийской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 2009) и других конференциях. В рамках работы выполнены исследования по гранту РФФИ в 2008-2009. Основные результаты диссертации внедрены при разработке систем снаряжения авиационной техники средствами поражения в НИР "Автоматика", в учебный процесс на кафедре СМ-7 МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсах «Системы управления РТК и С» и «Проектирование РТК и С» и на кафедре «Эксплуатация комплексов авиационного вооружения и робототехника» Военно-воздушной инженерной академии им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина.

Методы исследования. В теоретических исследованиях использовались частотные методы теории автоматического регулирования. Моделирование кинематики ИК производилось в среде MATLAB с приложением Robotics. При оценки погрешностей использовались средства пакета анализа данных Excel, управляющее и моделирующее программное

обеспечение написано на языке C++, при разработке электрических схем использовался пакет анализа LTSpice.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложения. Содержит 172 страниц текста, 26 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы положения, определяющие ее практическую ценность и научную новизну. Показано, что работа имеет прямое отношение к комплексной целевой программе «Роботизация ВВТ» Минобороны (раздел «Нетрадиционные вооружения»).

В первой главе рассмотрено состояние вопроса о средствах механизации, предназначенных для снаряжения ЛА (самолётов, вертолёт) боекомплектами АСП, которые имеются в распоряжении наземных служб, как Российских Вооруженных Сил, так и иностранных. Приведены сравнительные характеристики средств, обеспечивающих подвеску АСП. Показана актуальность разработки снаряжательного робота для нужд современных ВВС. Дана оценка размерных соотношений робота снаряжения, позволяющего выполнить данную операцию, исходя из анализа высот подвески современных ЛА. Определены характеристики устройства подвески и определен ее кинематический тип. Показано, что наиболее

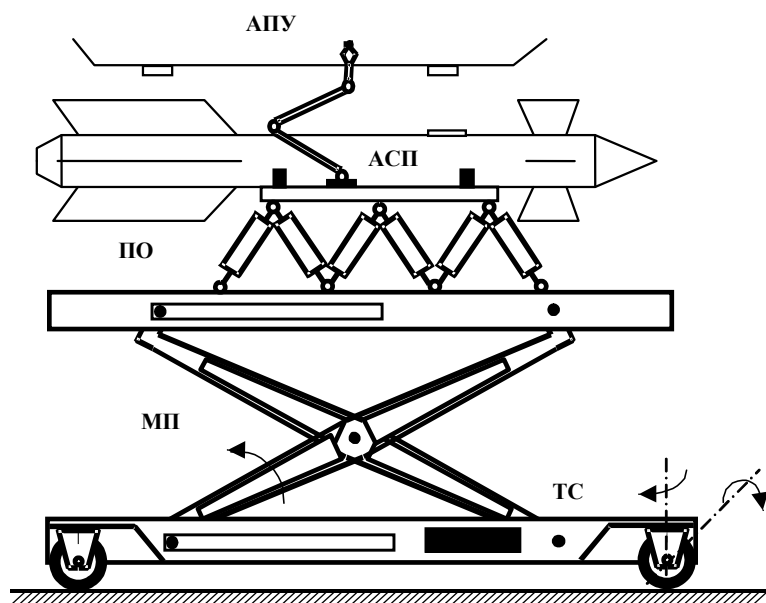


Рис.2. Робот снаряжения

оптимальным для решения данной проблемы является выбор кинематики ориентирующей платформы как L-координатного механизма. Определены ее конструктивные параметры. Исходя из того, что перемещаемые объекты имеют большой вес (до 500кг) и значительные длины (до 5м) и того, что конструкция механизма подъема имеет ограниченную жесткость, сделан вывод о том, что работа платформы ориентации РС должна рассматриваться

как работа на упругом основании, что в свою очередь может вызвать недопустимые колебания АСП в процессе подвески. Внешний вид РС представлен на рис. 2

Дан анализ допусков на подвеску АСП. Показано, что схема подвески может быть представлена так, как показано на рис.3. При этом допуски на подвеску АСП, имеющих самые малые зазоры, определяют точность приводов платформы ориентации (ПО) и определяются соотношением (1).

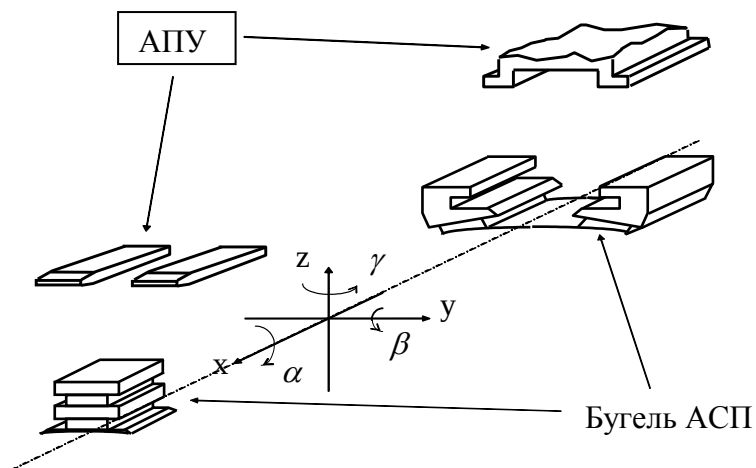


Рис.3. Схема подвески АСП на ЛА

$$\begin{aligned} 0,3 \geq |dz + 14\alpha + 1100\gamma| &= d_1; \\ 0,3 \geq |dy + 5\alpha + 1100\beta| &= d_2; \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрены проблемы, связанные с дальней и ближней навигацией РС. Дан краткий анализ систем дальней навигации, на основе которого сделан вывод о том, что точность позиционирования РС под ЛА может составлять 3-5см по перемещениям и 3-5 град. по углу. На основании этой информации синтезирована система ближнего радиуса действия с помощью которой можно обеспечить подвеску АСП на ЛА. Показано, что в наилучшей степени заданным условиям удовлетворяет механическая система измерителя координат (ИК). Кинематика разработанного ИК, расположенного на ПО, представлена на рис.4, ее модель описана с помощью представления Денавита-Хартенберга.

Моделирование кинематики ИК проводилось в среде MATLAB с приложением Robotics. Рабочая конфигурация ИК так же представлена в главе. С использованием функций, входящих в приложение, определялась разрядность датчиков измерений, установленных в ИК в объединенной кинематической модели ПО-ИК, удовлетворяющей условию точности, сформулированной в п.1.4. В результате датчики должны иметь точность не ниже 14 разрядов. Такой точностью обладает, например, аналого-цифровой преобразователь сигналов вращающихся трансформаторов (ВТ) - АЦПВТ-14П-02И-03, работающий с ВТ типа 2,5БВТ-П, выпускаемый отечественной промышленностью и допускающий диапазон температур -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$. В реальных электромеханических системах, когда источник сигнала достаточно удалён от преобразователя, в кабелях, соединяющих источник

сигнала и преобразователь возможно наведение помех от расположенных рядом электромеханизмов и линий управления. В подобных ситуациях ряд наблюдений, оказывается засорённым «неправильными» наблюдениями и возникает задача их исключения. В виду того, что ИК должен обеспечивать

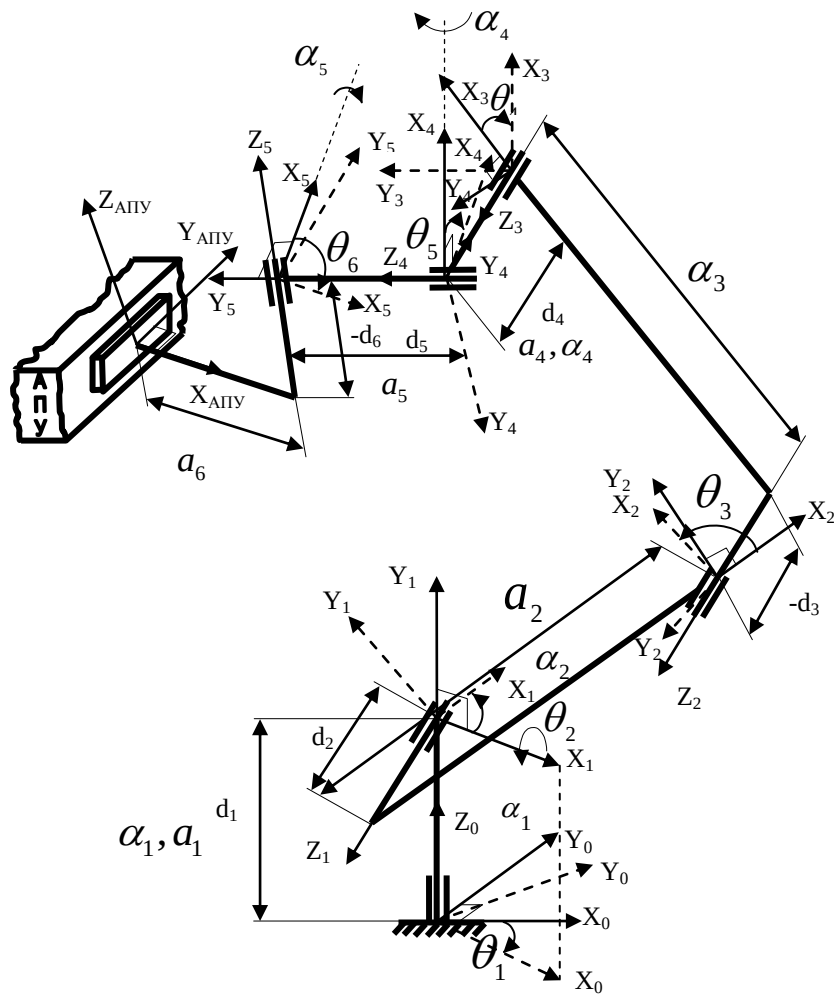


Рис.4. Кинематика измерителя координат

необходимую точность измерений, был разработан алгоритм фильтрации помех на основе критерия Дурбина-Уотсона. В основу данного алгоритма положена гипотеза о том, что математические ожидания всех наблюдений (измеряемых параметров) одинаковы, в то время как математическое ожидание одного наблюдения отлично от остальных. Критерием проверки является некое число d , которое определяется как $d = \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta_{i+1} - \Delta_i)^2 / \sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ и колеблется в пределах от 0 до 4. При $d \approx 2$, гипотеза о независимости отклонений принимается. В противном случае требуется уточнение функции тренда. Если отклонения измерений Δu_i независимы, приступаем к исключению резко выделяющихся отклонений с последующим утонением функции тренда. Приведённый алгоритм работает более корректно и точно с рядом наблюдений, чем известное правило “трёх сигм”, где данные проверяются на принадлежность интервалу $\pm 3S$ и не выдвигается каких либо

гипотез о параметрах наблюдений. Данный алгоритм позволил существенно поднять достоверность получаемых данных от датчиков ИК и осуществлять их прогнозирование на момент ввода данных в вычислительный процесс.

Также была выполнена калибровка ИК с использованием станочного оборудования и программного обеспечения из пакета MATLAB с приложением Robotics, позволившая найти и скомпенсировать неточности изготовления и сборки ИК, также подняв достоверность получаемых результатов (см. рис.5).

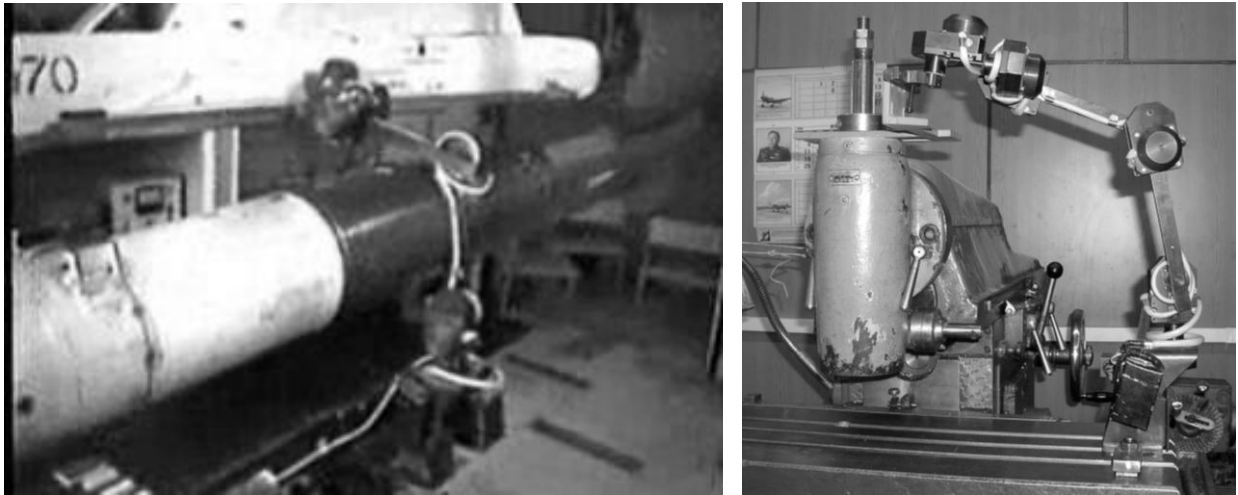


Рис.5. Установка ИК на объекте и его калибровка

Во второй главе рассмотрена структура L-координатного механизма показанного на рис.6. Даны кинематические соотношения ПО (2) и проведен кинематический анализ для ряда конструкций. Определены коэффициенты

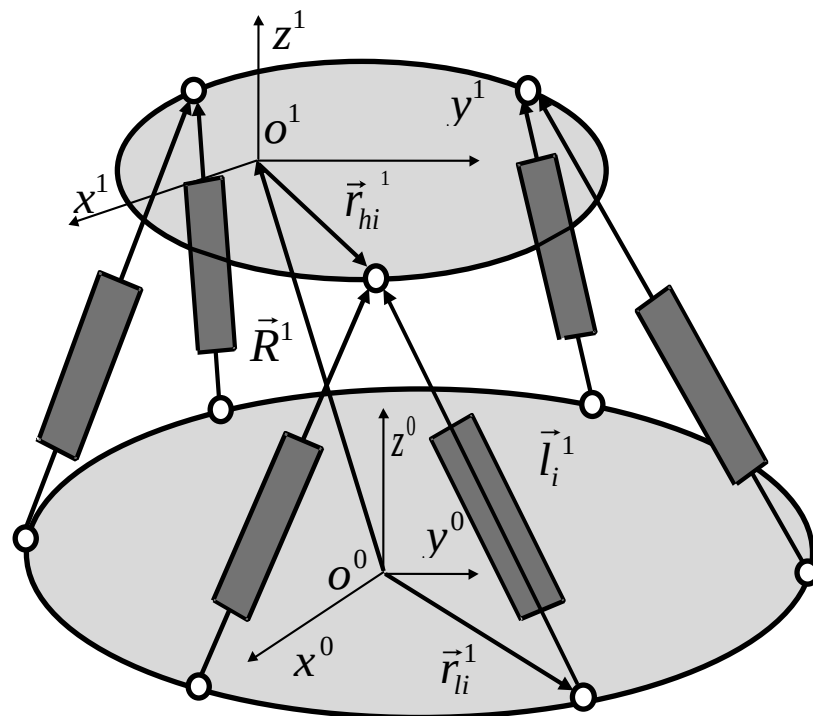


Рис.6. Кинематическая структура ПО

влияния кинематических параметров L-координатного механизма на размерные соотношения платформы ориентации при выполнении заданных характеристик на перемещения АСП, полученных в первой главе.

$$\begin{aligned}\vec{l}_i^1 &= \vec{R}^1 + \theta \vec{r}_{li}^0 - \vec{r}_{hi}^1 \\ \dot{\vec{l}}_i &= \dot{\vec{R}} + A_i \dot{\vec{\phi}} \quad \|\dot{\vec{l}}\| = C_i \dot{\vec{R}} + C_i A_i \dot{\vec{\phi}} \\ \dot{\vec{L}} &= B \dot{\vec{Z}} \quad B = \begin{bmatrix} C_1; C_1 A_1 \\ C_2; C_2 A_2 \\ \dots\dots\dots \\ C_6; C_6 A_6 \end{bmatrix} \quad (2) \\ D &= [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z] \quad D = BF\end{aligned}$$

Сформулированы предложения о том, как наилучшим способом достичь требуемых кинематических характеристик платформы ориентации РС при соблюдении конструктивных ограничений в виду того, что одним из основных требований при разработки РС является его малая высота в связи с тем, что самая нижняя точка подвески, например для ЛА СУ27 находится на высоте 750см. Разработан комплекс программных средств в среде С++, позволяющий выполнить поставленную задачу и оптимизировать габариты ПО.

В третьей главе рассмотрены алгоритмы подвески АСП на ЛА как в ручном, так и в автоматическом режимах. Реализованы три режима ручного управления операцией подвески АСП на АПУ. Показано что выбранная конструкция ПО имеет достаточно линейную характеристику, что позволяет достаточно просто реализовать систему управления (СУ) при использовании ручного управления, а также в ряде случаев отказаться от применения датчиков длины приводов ПО при подвеске АСП, имеющих «простые» места крепления, что упрощает конструкцию в целом. Данный режим работы возможен на начальном этапе процесса подвески или может быть использован как резервный режим управления в случае выхода из строя основной СУ. Блок схемы показаны на рис.7. Были проведены сравнительные испытания возможностей данного метода, которые отражены в гл.5. В качестве одного из режимов ручного управления опробовано

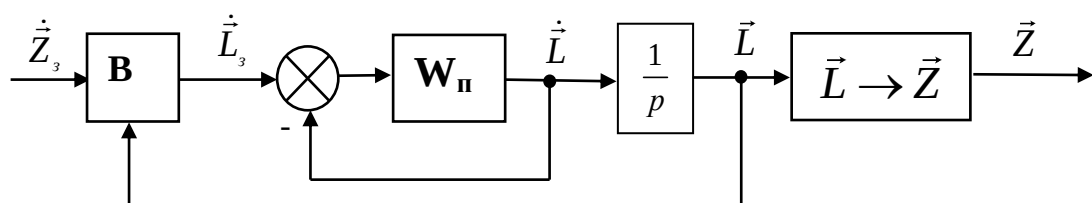


Рис.7

моментно-скоростное управление от шестикоординатной рукоятки. Для этого специально была разработана, изготовлена, откалибрована и испытана рукоятка управления на основе шестикоординатного моментного датчика.

Основным элементом рукоятки управления является упругая система типа «крест» на крестовые стержни которой наклеены тензодатчики представляющие полную мостовую схему и запитаны переменным током. Сигналы с датчиков усиливаются усилителем переменного тока, демодулируются и поступают на вход аналого-цифрового преобразователя и далее вводятся в вычислительный процесс. Для уменьшения влияния помех усилители и демодуляторы собраны в корпусе датчика, между крестовыми стержнями. При обработке сигналов так же применен метод фильтрации помех, описанный в гл.2. Блок схема СУ на основе этого метода приведены на рис.8. Система была испытана проверена на натурно-моделирующем стенде. Результаты приведены в гл.5.

Рис.8

Предложена СУ с шестикоординатным датчиком сил и моментов рис.9, дающим информацию о нагрузке (сплошная линия) или с шестью однокоординатными датчиками сил (пунктир), расположенными в каждом из приводов ПО.

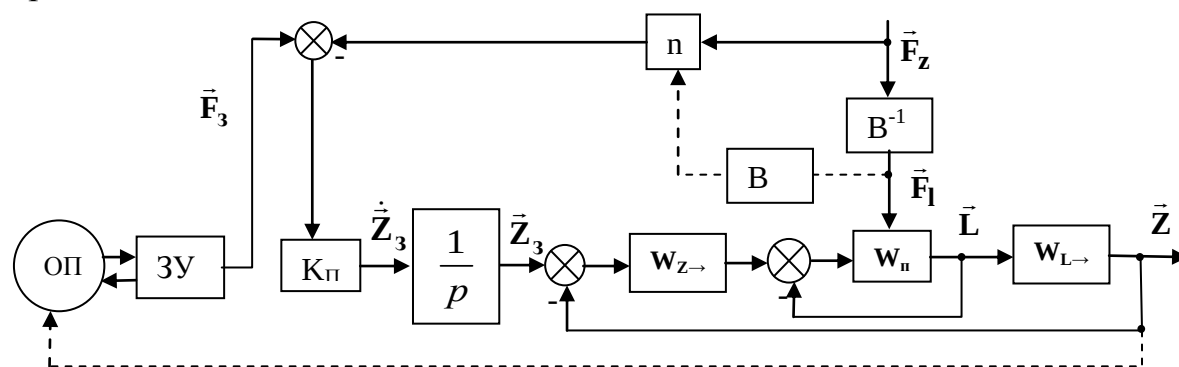


Рис.9

Предложенная СУ позволяет определять вес и нагрузки, действующие на АСП в месте касания бугелей авиационно-пускового устройства (АПУ), и своевременно корректировать траекторию движения АСП.

Разработаны два режима автоматического управления, в основе которых лежат измерения, выполненные с использованием ИК, разработанного в гл.2. Обоснована возможность реализации СУ в автоматическом режиме с измерением вектора ошибки, как наиболее рациональной с технической точки зрения. Показано, что операция подвески может быть выполнена в два этапа. Для практического применения выбран метод автоматического управления с измерением вектора ошибки, который обладает тем преимуществом, что с эргономической и технической точки

зрения является самым удобным. Кроме того, данный метод позволит подвешивать АСП в скрытых объемах, где присутствие человека не возможно или опасно, например, в отсеке вооружения современных самолетов.

В третьей главе так же дана оценка и анализ погрешностей, влияющих на работу ПО. Их можно разделить на статические – возникающие от конечной жесткости приводов, и кинематические. Нужно отметить, что статические погрешности обусловлены тем обстоятельством, что привода ПО работают в большом динамическом диапазоне, поскольку в зависимости от конфигурации ПО привода испытывают нагрузки как сжимающие, так и растягивающие. Кинематические погрешности в свою очередь можно разделить на две составляющие. Это погрешности, связанные с точностью изготовления узлов и деталей ПО (например, расточка посадочных мест под приводы нижнего основания и подвижного стола ПО), и погрешности от линейной интерполяции при перемещении ПО из начальной точки в конечную. Анализ данных погрешностей производился по разработанной программе "static_precision_privods".

Ход решения задачи о статических погрешностях следующий:

- рассматриваем ПО с установленным на ней АСП для нескольких характерных точек траекторного движения. При этом задаем координаты этих точек $\vec{Z}_3$;
- зная $\vec{Z}_3$, переходим к длинам приводов $\vec{L}_3$;
- находим усилия, действующие в осевом направлении механизмов подач – $\vec{F}_n$;
- используя $\vec{F}_n$, жесткость приводов $\vec{G}_n$ и полагая жесткость шарниров много больше жесткости приводов, переходим к их деформациям $\Delta\vec{L}_n$;
- полагая, что изменение $\vec{F}_n$ от $\vec{Z}(\vec{L}_3 + \Delta\vec{L})$ ничтожно мало, вычисляем реальные координаты ПО – $\vec{Z}_n$;
- вычисляем вектор статических ошибок как $\vec{Z} = \vec{Z}_3 - \vec{Z}_n$.

В качестве примера можно рассмотреть координаты точки рабочей области, находящиеся на краю рабочей зоны ПО. Эта точка имеет координаты $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ (мм/град) (-231; 0; 265,5; 0; -26; 0). При этом силы, действующие в приводах, при максимальной нагрузке в 350кг будут: (-1620Н; 3270Н; -2,7Н; -2,7Н; 3270Н, -1620Н). Иными словами, в этой точке приводы "растягивают" ПО в "разные стороны". Анализируя, таким образом, данные характерных точек рабочей области можно сделать вывод о том, что условие сопряжения (1) выполняется даже при наименьшей жесткости привода, что позволяет проектировать ПО на базе ШВП без предварительного натяга, что в свою очередь уменьшает габариты всего механизма. Однако надо применять ШВП с возможно большим диаметром винта – это позволит свести к минимуму погрешности от статической нагрузки без применения более точного датчика обратной связи в приводах

ПО. В противном случае статическую ошибку необходимо учитывать путем введения поправки в алгоритмах управления.

В связи со спецификой эксплуатации РС при выполнении операции подвешивания АСП на АПУ желательно сначала скомпенсировать угловые рассогласования, а затем обеспечить плоскопараллельное перемещение АСП. В свою очередь плоскопараллельное перемещение разбивается на два участка: участок подвода АСП к бугелям АПУ и участок, где происходит непосредственное перемещение АСП сначала «вверх», до захода бугелей на направляющие, а затем сдвиг вдоль направляющих. Исходя из выводов, сделанных в главе 3.1, кинематические погрешности на участке компенсации угловых рассогласований на первом участке плоскопараллельного перемещения не являются существенными. При этом перемещения могут происходить с максимально возможными скоростями. Однако на последнем участке, где необходимо руководствоваться условием сопряжения (1), погрешности от линейной интерполяции могут привести к эффекту "заклинивания", что не желательно. Оценим эти погрешности.

При движении ПО из начальной точки $\vec{Z}_n$ в конечную $\vec{Z}_k$ начальные и конечные длины приводов ПО будут соответственно $\vec{L}_n$ и $\vec{L}_k$. При этом приращение координат будет: $\vec{L}^* = \vec{L}_n - \vec{L}_k$. При линейной интерполяции приращение каждой координаты Δl^* происходит за одинаковое время t_0 . Соответственно скорость по каждой координате l_i будет $v_i = l_i^* / t_0$. Приращение координаты l_i за некоторое время $t = t_0 / n$ равно: $l_i = v_i t = l_i^* / n \rightarrow \vec{L}$, где n - число шагов счета. Приращение координат будет соответственно:
$$\vec{L} = \vec{L}_n + \sum_{p=0}^{p=k-1} \vec{L}_p \quad k=1, 2..n \quad \vec{L}_0 = 0.$$
 Далее находим $\vec{Z} = \vec{Z}(\vec{L})$. На каждом шаге необходимо проверять условие соблюдения сопряжения (1). Если оно не выполняется, необходимо участок траектории $\vec{Z}_n - \vec{Z}_k$ разбить на два участка и процедуру повторить заново и т.д. Эту операцию необходимо промоделировать для нескольких характерных точек траекторного движения ПО. Результатом этой работы является необходимое число разбиений траектории, на участках которых возможно применение линейной интерполяции при соблюдении условия сопряжения. В главе приведены результаты работы программы, моделирующей движение бугелей АСП по прямой при смещении на 80мм. Именно на столько необходимо продвинуть АСП, чтобы выполнить операцию подвески (движение бугелей вдоль направляющих до момента срабатывания запирающего устройства) Из анализа видно, что для выполнения условия траекторию необходимо разбить на 3-4 участка. В этих точках приводы ПО меняют свою скорость.

Другим источником кинематических погрешностей может быть, например, расточка посадочных мест под приводы нижнего основания и подвижного стола ПО. Методика оценки этих погрешностей следующая:

1. По заданным координатам $\vec{Z}_3$ определяем длины приводов $\vec{L}_3$, используя выражение $\vec{l}_i = \vec{R} + \theta \vec{r}_{li} - \vec{r}_{hi}$.

2. По заданным координатам $\vec{Z}_3$ определяем длины приводов $\vec{L}_p$ с учетом допусков изготовления, используя выражение $\vec{l}_i^* = \vec{R} + \theta(\vec{r}_{li} + \vec{r}_{li}) - (\vec{r}_{hi} + \vec{r}_{hi})$.

3. По $\vec{L}_p$ определяем $\vec{L}_p$.

4. Находим $\vec{Z} = \vec{Z}_p - \vec{Z}_3$.

5. Проверяем $\vec{Z}$ на условие соблюдения точности (1).

Изложенную процедуру применим к характерным точкам рабочей области ПО. В качестве исходных данных будем использовать координаты мест крепления приводов к нижнему основанию и к подвижной платформе, т.е. $\vec{r}_{li}, \vec{r}_{hi}$, предположив, что технологическая погрешность изготовления имеет нормальный закон распределения. Для каждой характерной точки примем допуск изготовления равным 0,025мм и 0,005мм. Проведем статистический анализ используя критерий Пирсона. Используя программу "Генерация случайных чисел" с нормальным законом распределения пакета анализа данных Microsoft Excel, получим 100 значений погрешности для каждого варианта допуска (в нормальном законе полагаем математическое ожидание $a=0$, а среднее квадратическое отклонение или стандартное отклонение $\sigma=1/6$ от допуска изготовления, что соответствует правилу "трех сигм" для нормального закона; для принятых допусков изготовления $\sigma=0,05/6, \sigma=0,01/6$). Затем по уравнениям сопряжения рассчитаем 100 значений величин d_1 и d_2 . Найдем законы распределения величин d_1 и d_2 , зная которые определим вероятности тех или иных допусков для d_1 и d_2 , что позволит ответить на вопрос о необходимых допусках изготовления. Отметим, что величины d_1 и d_2 условия (1) могут иметь как нормальный, так и логарифмический закон распределения. На основе проведенного анализа заключаем, что если места крепления приводов к основанию и к подвижной платформе изготовлены на оборудовании с точностью $\pm 0,025$ мм, то значения d_1 и d_2 удовлетворяют условию сопряжения, но их значения являются существенными. Это необходимо учитывать при проектировании приводов, например, путем повышения их точности. Если детали изготавливаются на оборудовании с точностью $\pm 0,005$ мм то, повторив расчеты, получим, что значения d_1 и d_2 удовлетворяют условию сопряжения (1) и их значения являются несущественными. Т.е. их влиянием можно пренебречь.

В четвертой главе дан качественный анализ динамических процессов. Предложена динамическая модель РС, которая показана на рис.10. Показана система уравнений (3), описывающих динамику РС как систему на упругом основании. (3)

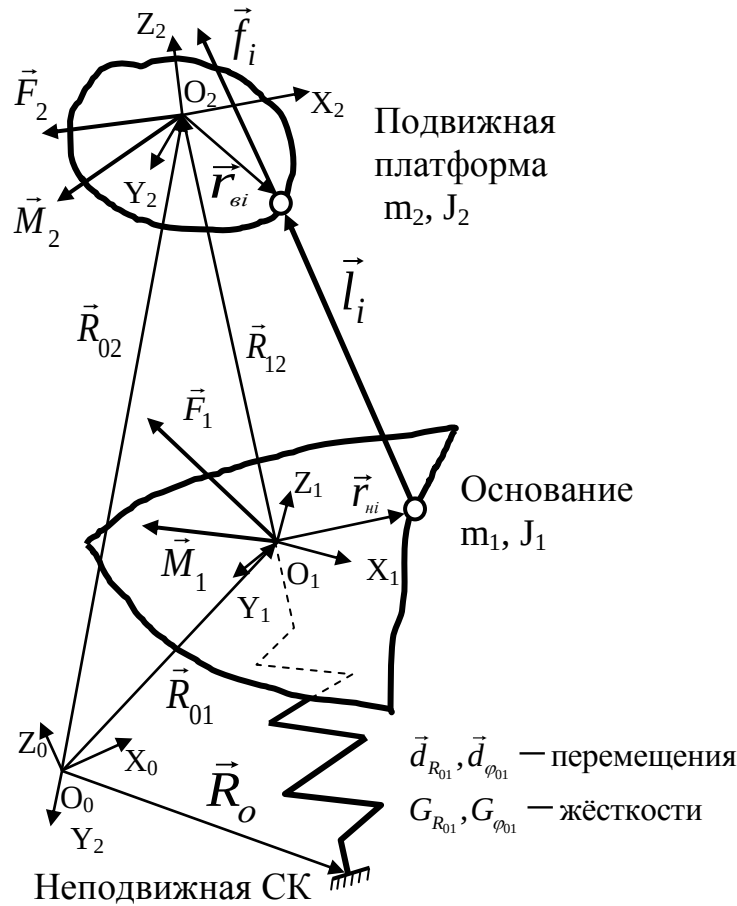


Рис.10. Динамическая модель РС

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{\vec{R}}_{01} = \vec{F}_1 - \sum_{i=1}^6 C_i^T f_i - G_{R01}^T \vec{d}_{R01} \\ m_2 \ddot{\vec{R}}_{02} = \vec{F}_2 + \sum_{i=1}^6 C_i^T f_i \\ I_1^T \ddot{\vec{\phi}}_{01} + \dot{I}_1^T \dot{\vec{\phi}}_{01} + \left[\dot{\vec{\phi}}_{01}^T \left[\frac{\partial I_1}{\partial \vec{\phi}_{01}} \right]^{\sigma} \dot{\vec{\phi}}_{01} \right]^T + G_{\phi}^T \vec{d}_{\phi} = \vec{M}_1 - \sum_{i=1}^6 A_{1i}^T C_i^T f_i \\ I_2^T \ddot{\vec{\phi}}_{02} + \dot{I}_2^T \dot{\vec{\phi}}_{02} + \left[\dot{\vec{\phi}}_{02}^T \left[\frac{\partial I_2}{\partial \vec{\phi}_{02}} \right]^{\sigma} \dot{\vec{\phi}}_{02} \right]^T = \vec{M}_2 - \sum_{i=1}^6 A_{2i}^T C_i^T f_i \end{array} \right. \quad (3)$$

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию процесса подвески. Для этого был специально разработан стенд, моделирующий работу комплекса. В состав испытательного стенда вошли: ПО с разработанной системой управления, измеритель координат, моментная рукоятка управления, натурный макет АСП, натурный макет АПУ, закрепленный на специальном подвесе, с помощью которого можно задавать различные начальные положения АПУ, а так же дополнительные устройства, необходимые для проверки работоспособности комплекса внешний вид которого представлен на рис.11. На данной установке был проведен ряд экспериментов, однозначно показывающих, что операция подвески АСП

может быть выполнена на данном оборудовании, как в автоматическом режиме, так и с использованием полуавтоматического режима при управлении от моментной рукоятки. Наиболее быстро и точно операция снаряжения выполняется с использованием ИК, особенно когда в качестве АСП используются ракеты, т.к. они имеют наиболее малые зазоры при стыковке с АПУ. Однако такие операции как снятие ракеты, навеска и снятие бомб, а так же операции манипулирования тяжелыми объектами удобно выполнять с помощью моментной рукоятки. Даны временные соотношения по выполнению основных операций. По результатам серии экспериментов был снят фильм, наглядно показывающий возможность выполнения операции снаряжения, а так же отражающий преимущества по сравнению со штатными средствами, представленными в видеоматериале ведущей организации

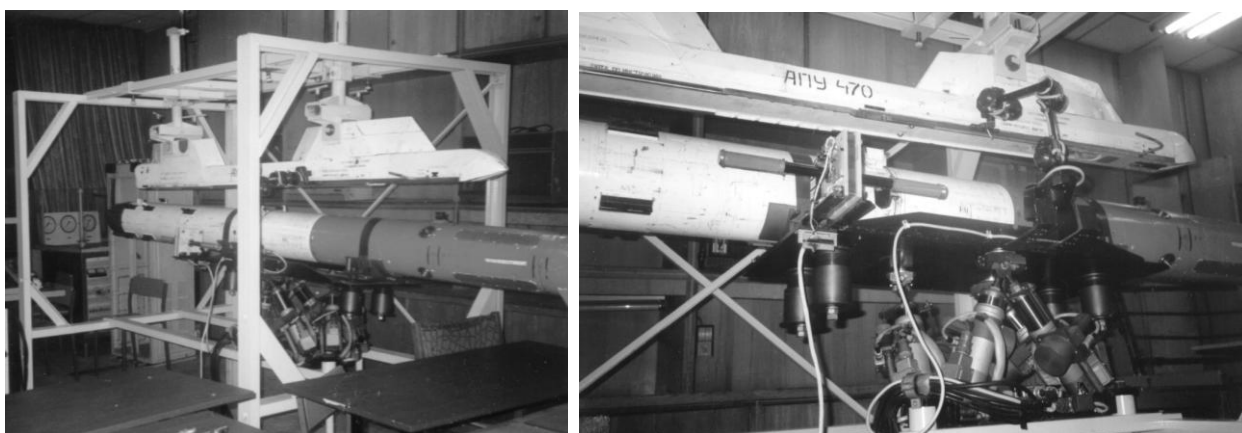


Рис.11. Натурно-моделирующий стенд

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение вопросов, связанных с созданием робототехнического комплекса является, основными результатами работы. Правильность полученных научно-технических решений и теоретических результатов подтверждена полунатурными экспериментами на изготовленном стенде, в состав которого входят реальные механизм подвески, авиационное средство поражения и пусковое устройство. В ходе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных автором, в работе получены следующие научно-технические результаты:

- 1) предложен комплексный подход к проектированию средств обеспечивающих подвеску АСП на ЛА;
- 2) предложена методика создания роботизированных средств снаряжения;
- 3) разработана оригинальная конструкция исполнительного устройства робота снаряжения, обеспечивающая прецизионное позиционирование тяжелых крупногабаритных объектов и проведена оптимизация его параметров;
- 4) разработана и обоснована информационная система робота снаряжения и система управления процессом полуавтоматической и автоматической подвески АСП, разработано алгоритмическое и программное обеспечение;

- 5) проведена экспериментальная проверка разработанного и созданного исполнительного механизма, информационной системы и системы управления робота.

Экспериментальные исследования показали, что при подвеске ракет и при обеспечении малых зазоров более предпочтительным является автоматический режим с использованием ИК. При подвеске АБ и выполнении операций, где не требуется высоких точностей возможно управление от силомоментной рукоятки управления.

Материалы диссертации были отражены в:

1. Калинин А.В., Панков В.А. Система управления робота, выполняющего прецизионную установку тяжелых объектов // Материалы Международной научно-технической конференции; 28сентября – 3октября 2009г. с.Дивноморское (Геленджик, Россия). Таганрог – Санкт-Петербург, 2009. С. 210-213.
2. Калинин А.В., Панков В.А. Система управления робота, выполняющего прецизионную установку тяжелых объектов // Труды Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2009. Том 5. С. 237-239.
3. Результаты создания комплексированных систем технического зрения для обеспечения управления движением / А.В. Калинин [и др.] // Труды Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции Санкт-Петербург, 2009. Том 5. С. 292-294.
4. Результаты создания комплексированных систем технического зрения для обеспечения управления движением / А.В. Калинин [и др.] // Материалы Международной научно-технической конференции; 28сентября – 3октября 2009г. с.Дивноморское (Геленджик, Россия). Таганрог – Санкт-Петербург, 2009. С. 281-284.
5. Калинин А.В. Фильтрация помех при аналого-цифровом преобразовании //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 1999. №4. С. 54-59.
6. Калинин А.В., Панков В.А., Рубцов И.В. L-координатные механизмы в роботизированной технологии прецизионного перемещения тяжелых объектов // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Машиностроение. 2010. Специальный выпуск. С. 79-88.
7. Калинин А.В. Определение допуска на погрешность позиционирования роботизированной платформы статистическими методами // Математико-статистический анализ социально-экономических процессов: Сб. МЭСИ (Москва). 2010. Выпуск 7. С. 58-61.
8. Перспективные разработки в области создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения / А.В. Калинин [и др.] //Оборонная техника. 2003. Сб.1-2. С. 40-44.
9. Исследование L-координатных механизмов в целях создания роботизированной технологии прецизионного позиционирования тяжелых крупногабаритных объектов: Отчет по Грант РФФИ 2008-2009г. / МГТУ. Руководитель И.В. Рубцов. Исполнители А.В. Калинин, В.А. Панков, Д.С. Гримак. Код 08-08-13558-офи_ц. Инв. №78512. М., 2009. 75 с.

Объем_____п.л. Тираж_____экз.
Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.