

**Создание стенда главного конструктора для отработки
методом полунатурного моделирования изделий класса
«поверхность-воздух»**

*Буслаев А.В., Гагарин С.А., Захаров А.Г.,
Кислицын Ю.Д., Князь В.А., Лазиков Д.В.,
Филенков А.Ю., Хазанов А.В., Якушева А.Б.
(ФГУП «ГосНИИАС»), Акимов В.Н., Курдяев
Е.А., Мартынов О.Ю. Саломатин А.В., Уласевич
В.П. (ПАО «ДНПП»)*

В настоящее время полунатурное моделирование является одним из наиболее эффективных методов наземной отработки бортовой авиационной аппаратуры, который позволяет существенно сократить затраты на проведение натурных лётных испытаний и в то же время значительно расширяет объём проводимых исследований, предоставляя возможность воспроизведения сценариев функционирования изделия в условиях, отличных от полигонных, в том числе с моделированием ошибок и нештатных ситуаций. Метод полунатурного моделирования применяется на этапах создания, эксплуатации и модернизации изделий и позволяет отрабатывать полный цикл применения изделия.

В период с 2015 по 2019 гг. предприятиями ФГУП «ГосНИИАС» (г. Москва) и ПАО «ДНПП» (г. Долгопрудный) был создан и введён в эксплуатацию комплекс полунатурного моделирования (КПМ) для отработки изделий класса «поверхность-воздух» с радиолокационными головками самонаведения (ГСН). Данный КПМ включает в свой состав:

- стендовое оборудование в составе трёхступенного динамического стенда СЗ-500, пространственного динамического координатора ПДК-2 и механического нагрузочного стенда блока электрических рулевых приводов (БЭРП);
- вычислительную часть (ВЧ);
- систему формирования СВЧ-сигналов (СФСВЧ);
- сетевую инфраструктуру, обеспечивающую информационное взаимодействие блоков реальной аппаратуры с ВЧ, стендовым оборудованием и СФСВЧ;
- радиобезэховую камеру (РБК), оснащённую вспомогательными системами (системой видеонаблюдения, системой электроснабжения, системой пожаротушения и системой кондиционирования).

Структурная схема КПМ приведена на рисунке 1. Радиолокационная ГСН и инерциальная система управления (ИСУ) исследуемого изделия устанавливаются на трёхступенной динамический стенд СЗ-500 (далее по тексту - «динамический стенд»), который в процессе моделирования воспроизводит пилотажные углы, возникающие в процессе движения исследуемого изделия по траектории. Углы визирования цели воспроизводятся движением рупорной антенны, установленной на подвижной каретке пространственного динамического координатора ПДК-2 (далее по тексту - «координатор»). Совместное движение каналов динамического стенда и пеленгационной антенны, установленной на подвижной каретке координатора, позволяют моделировать относительное угловое положение изделия и цели.

Имитация таких свойств отражённого сигнала, излучаемого рупорными антеннами, как изменение мощности и доплеровское смещение частоты в зависимости от дальности и скорости сближения с целью в соответствии с законами распространения СВЧ-сигналов в атмосфере, обеспечивается СФСВЧ.

СФСВЧ, разработанная совместно ПАО «ДНПП» и ФГУП «ГосНИ-ИАС», обеспечивает:

- режим формирования отражённого сигнала цели;
- режим формирования шумоподобного непрерывного сигнала с заданной полосой спектра;
- режим формирования шумоподобного непрерывного сигнала с заданной полосой спектра, чередующегося с сигналом цели;
- режим формирования уводящей по доплеровской частоте помехе;
- режим непрерывного подсвета;
- режим импульсного подсвета с переключаемой частотой подсвета;
- установку затухания аттенюаторов в соответствии с дальностью и ЭПР целей;
- установку расписания работы каналов.

Механический нагрузочный стенд БЭРП посредством пружинного механизма имитирует аэродинамический шарнирный момент сопротивления на рулевых приводах изделия.

Процесс моделирования начинается с выбора конфигурации имитаторов. Управляющая программа позволяет проводить моделирование для любого сочетания блоков реальной аппаратуры БКУ изделия и имитаторов.

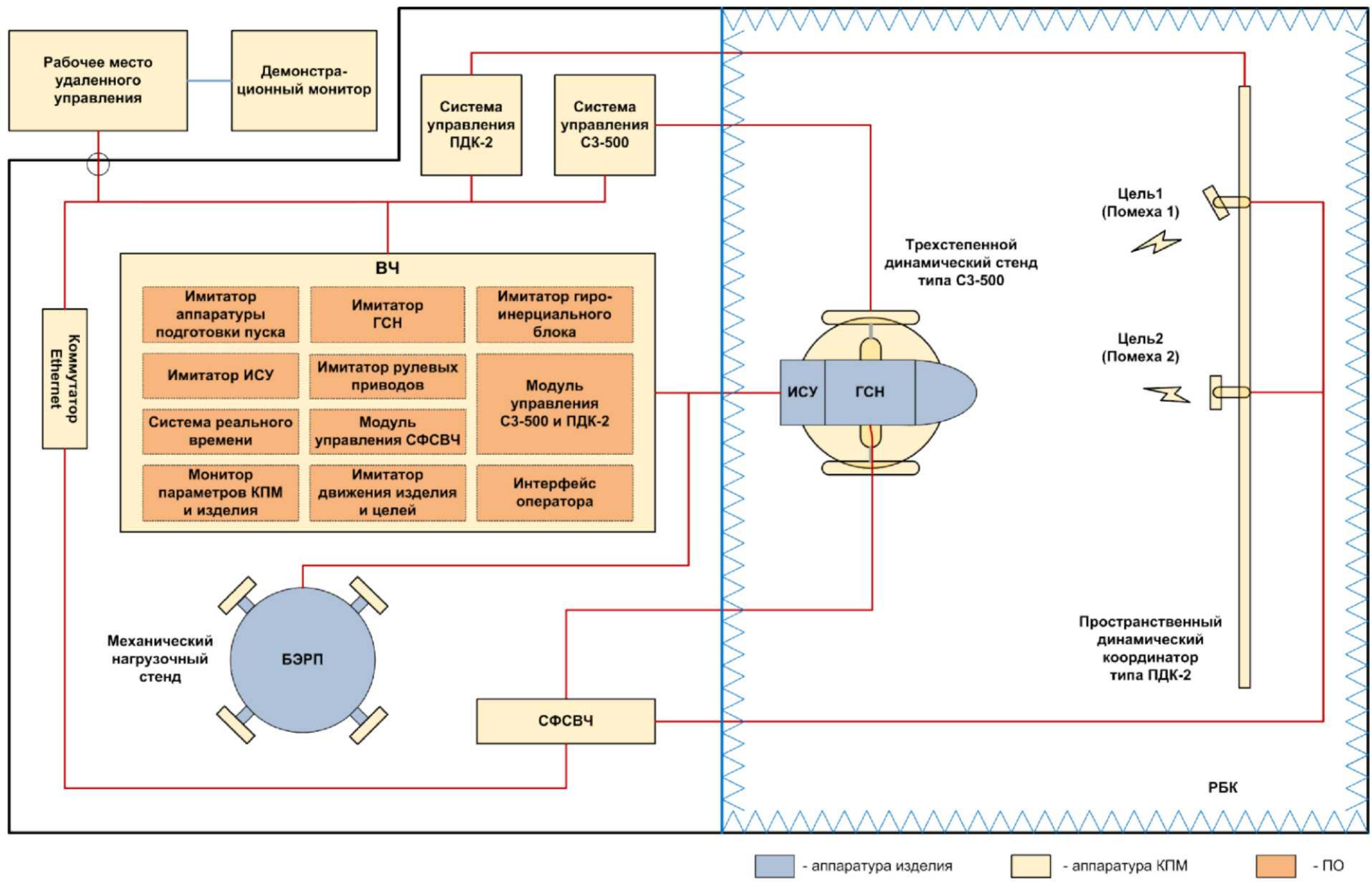


Рисунок 1 - Структурная схема КПП

После выбора конфигурации имитаторов проводится подготовка и ввод полётного задания для изделия в управляющую программу, настройка параметров движения целей, выставка динамического стенда и координатора в исходное положение, соответствующее начальным условиям моделирования.

После подачи питания на изделие начинается моделирование процесса предстартовой подготовки. Процесс предстартовой подготовки соответствует штатному протоколу информационного взаимодействия изделия с аппаратурой подготовки пуска. В соответствии с протоколом в изделие по интерфейсу по ГОСТ Р 52070-2003 выдаётся полётное задание и целеуказание, подсистемы бортового комплекса управления выполняют встроенные тесты самоконтроля и выдают признаки исправности и готовности к пуску.

После нажатия кнопки «Пуск» моделируется автономный полёт изделия к цели, который включает участки инерциального управления и самонаведения. В процессе автономного полёта в управляющей программе в реальном времени рассчитывается и корректируется аэродинамическая модель изделия, кинематические параметры движения изделия и целей, осуществляется управление динамическим стендом в соответствии с пилотажными углами и координатором в соответствии с углами визирования заданных целей, осуществляется управление СФСВЧ в части формирования отражённого сигнала и помех в соответствии с дальностью и скоростью сближения изделия и целей. В процессе моделирования в соответствии с рассчитанными в модели приращениями кажущихся скоростей осуществляется подыгрыш сигналов датчиков линейных ускорений гироинерциального блока ИСУ.

При срабатывании критериев окончания полёта фиксируется промах, снимается питание с изделия, на жёстком диске сохраняются файлы с результатами моделирования для последующей обработки, динамический стенд и координатор возвращаются в исходное положение.

Используемый в составе КПМ трёхстепенной динамический стенд СЗ-500 является собственной разработкой ФГУП «ГосНИИАС». Основной задачей динамического стенда является воспроизведение в реальном времени (с тактом 2 мс) угловых движений изделия в пространстве в соответствии с управляющими сигналами, поступающими от ВЧ КПМ по сетевому интерфейсу Ethernet.

Опорно-поворотный механизм (рисунок 2) динамического стенда имеет три управляемые оси вращения, оснащённые автоматизированными электроприводами и цифровыми системами управления и измерения на основе современной элементной базы. Первая ось вращения (внешняя, вертикальная ось) соответствует каналу «Курс», вторая ось вращения (промежуточная) каналу «Гангаж», третья ось (внутренняя) - каналу «Крен». В кольцо канала «Крен» устанавливается полезная

нагрузка максимальным диаметром 500 мм и максимальной длиной от центра прокачки 780 мм. Конструкция опорно-поворотного механизма оптимизирована таким образом, чтобы обеспечивать высокую жёсткость при сравнительно небольших инерционных характеристиках, что позволяет обеспечивать при полезной нагрузке массой до 100 кг технические характеристики, указанные в таблице 1.

В стойке управления сосредоточена аппаратура системы цифрового управления, которая выполнена по принципу подчинённого регулирования с реализацией трёх контуров управления: токовый, или моментный (внутренний), скоростной (промежуточный) и контур управления положением (основной).

При создании динамического стенда большое внимание было уделено разработке комплекса программно-аппаратных и механических средств защиты, исключающих повреждение как исследуемого изделия, так и самого динамического стенда. Для ограничения диапазона рабочих углов предусмотрена система программных плавающих концевых выключателей, которая в реальном времени отслеживает фактическую скорость движения каждого канала динамического стенда. Если расчётное значение тормозного пути при движении с данной скоростью превосходит остаточное расстояние до границы диапазона рабочих углов, то начинается процесс торможения. Дублирующей системой ограничения углов является система аппаратных концевых выключателей, которые отключают электроприводы канала при его выходе за допустимый угол. Другими системами защиты являются программный модуль анализа и ограничения входных управляющих сигналов, система защиты от зависания встроенного компьютера, система электродинамического торможения, позволяющая преобразовывать кинетическую энергию движения каналов в тепловую в случае аварийных ситуаций, программно-аппаратные средства защиты электроприводов от перенапряжения, превышения тока и перегрева и другие системы.

Пространственный динамический координатор ПДК-2, также как и динамический стенд СЗ-500, является собственной разработкой ФГУП «ГосНИИАС». Координатор обеспечивает пространственное перемещение рупорных антенн, имитируя таким образом движение линии визирования относительно ГСН по азимуту и углу места. Особенностью данного координатора является наличие сразу двух подвижных кареток, что позволяет реализовать сложные сценарии отработки изделия с различной целевой и помеховой обстановкой.

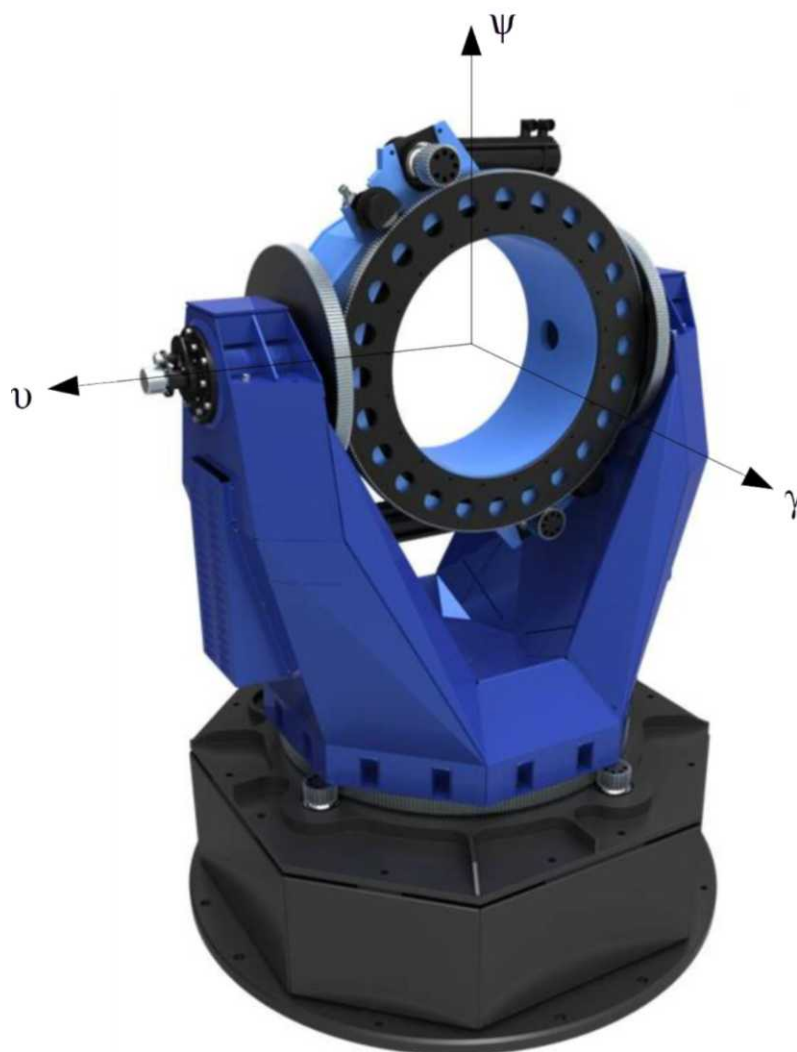


Рисунок 2 - Опорно-поворотный механизм трёхстепенного динамического стенда СЗ-500 (трёхмерная компьютерная модель)

Таблица 1 - Основные технические характеристики трёхстепенного динамического стенда СЗ-500

Техническая характеристика	Канал		
	«Курс»	«Тангаж»	«Крен»
Минимальная скорость	0,1 °/с	0,1 °/с	0,1 °/с
Максимальная скорость	140 °/с	250 °/с	300 °/с
Максимальное ускорение	2800 °/с ²	4000 °/с ²	6000 °/с ²
Среднее квадратическое отклонение статической погрешности позиционирования	2'	2'	2'
Максимальная рабочая частота	6 Гц	6 Гц	8 Гц
Максимальные динамические погрешности в полосе рабочих частот	±10 % / ±10°	±10 % / ±10°	±10 % / ±10°

Опорно-передвижной механизм координатора (рисунок 3) выполнен по кинематической схеме «плоского имитатора», отличительной чертой которой является движение кареток по прямолинейным направляющим. При этом имитация их движения по сферической поверхности достигается за счёт оснащения каждой каретки двухступенным устройством доворота рупора (рисунок 4), которое в автоматическом режиме поворачивает установленные на них рупорные антенны так, чтобы оси симметрии их диаграмм направленности были направлены в точку прокатки испытуемого изделия, установленного в динамический стенд.

Конструкция опорно-передвижного механизма координатора представляет собой пространственную силовую ферму, на которой закреплены горизонтальные направляющие, по которым в горизонтальном направлении перемещаются две вертикальные балки - каналы «Азимут 1» и «Азимут 2». По вертикальным балкам в вертикальном направлении перемещаются каретки координатора - каналы «Угол места 1» и «Угол места 2». Каждая вертикальная балка приводится в движение двумя электроприводами, размещёнными в её верхней и нижней части. Использование двух электроприводов позволило равномерно распределить усилие и избежать перекосов вертикальной балки при движении. Вертикальное движение каждой из двух кареток координатора осуществляется с помощью одного электропривода.

Устройство доворота рупора, установленное на каждую из двух кареток координатора, представляет собой двухступенной карданный подвес, рамки которого приводятся в движение автоматизированными прецизионными малогабаритными мехатронными модулями с электрическими приводами.

Применение кинематической схемы «плоского имитатора» наряду с независимым управлением движением рамок устройства доворота рупора существенно снизило требования к юстировке взаимного расположения динамического стенда и координатора за счёт того, что погрешности их взаимного расположения были скомпенсированы путём программной коррекции положения кареток, принятого за нулевое, таким образом, чтобы нормаль к плоскости движения кареток координатора, проведённая через точку прокатки динамического стенда, проходила через начало системы координат координатора.

Структура системы управления координатора во многом аналогична структуре системы управления динамического стенда. Однако прикладное ПО, функционирующее на встроенном компьютере стойки управления координатора, содержит дополнительные блоки прямого и обратного преобразования сферической и декартовой системы координат.

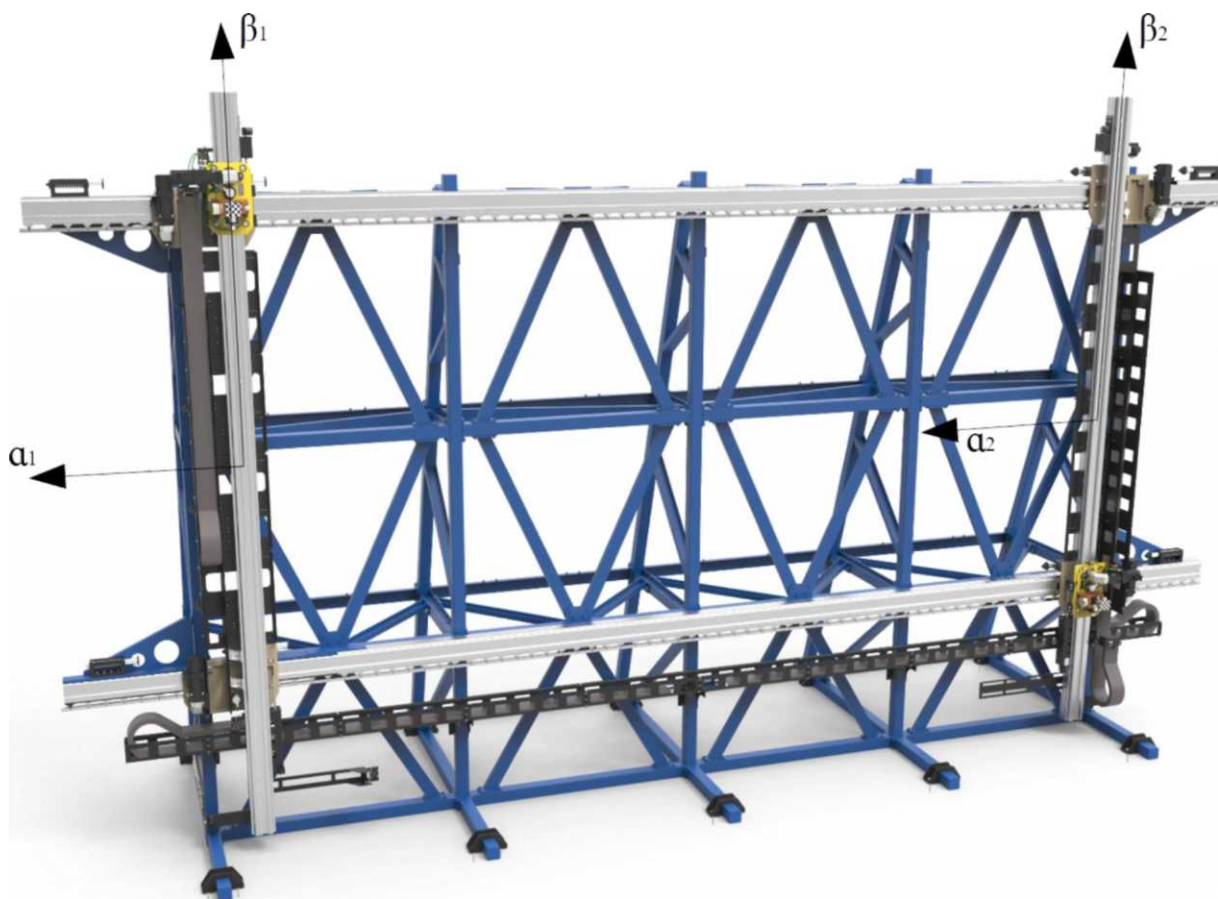


Рисунок 3 - Опорно-передвижной механизм пространственного динамического координатора ПДК-2 (трёхмерная компьютерная модель)

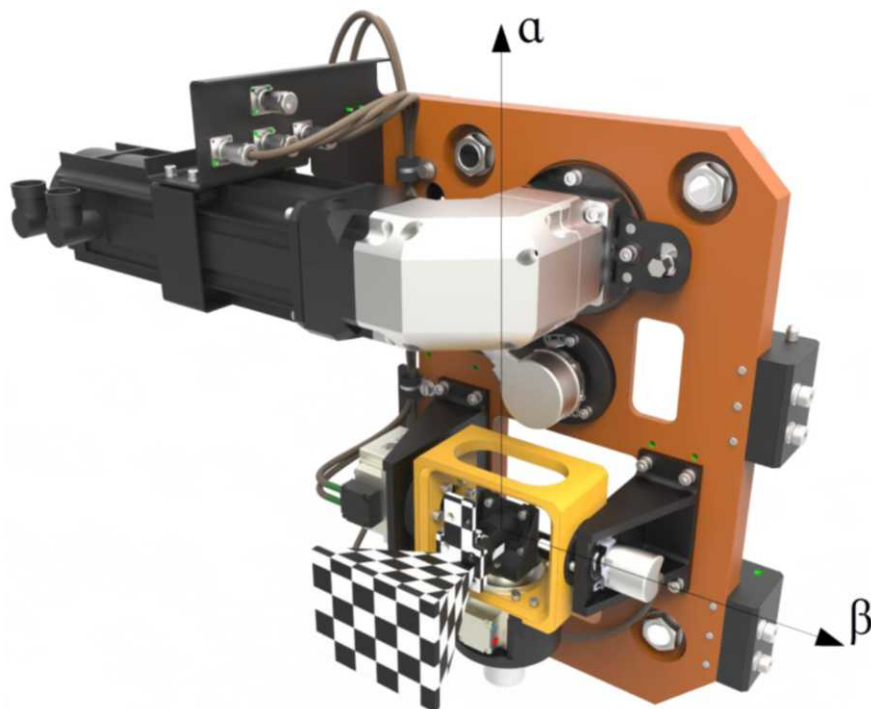


Рисунок 4 - Подвижная каретка с двухступенным устройством доворота рупора пространственного динамического координатора ПДК-2 (компьютерная трёхмерная модель)

Основные технические характеристики координатора приведены в таблице 2, а его внешний вид в РБК на рисунке 5.

Таблица 2 - Основные технические характеристики пространственного динамического координатора ПДК-2

Техническая характеристика	Канал	
	«Азимут 1», «Азимут 2»	«Угол места 1», «Угол места 2»
Минимальная скорость	0,05 м/с	0,05 м/с
Максимальная скорость	5 м/с	5 м/с
Максимальное ускорение	14 м/с ²	25 м/с ²
Среднее квадратическое отклонение статической погрешности позиционирования	0,002 м	0,002 м
Максимальная рабочая частота	1 Гц	2 Гц
Максимальные динамические погрешности в полосе рабочих частот	±10 % / ±10°	±10 % / ±10°

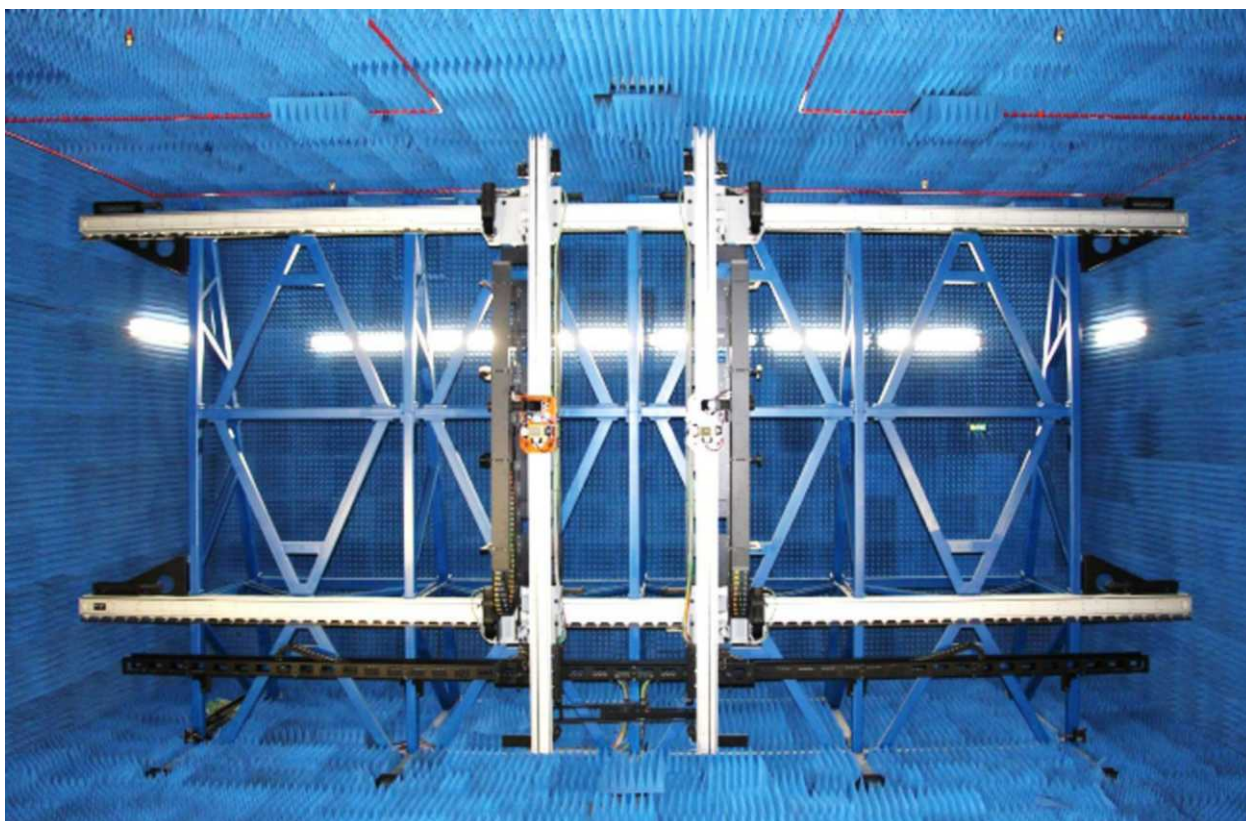


Рисунок 5 - Внешний вид опорно-передвижного механизма пространственного динамического координатора ПДК-2 до покрытия радиопоглощающим материалом (фотография)

Заключение

Созданный комплекс полунатурного моделирования является уникальным инструментом ресурсосберегающей технологии, который позволяет проводить наземную отработку изделий класса «поверхность-воздух» с радиолокационными головками самонаведения на всех этапах жизненного цикла изделий с возможностью гибкого моделирования широкого круга условий применения.

Комплекс полунатурного моделирования позволяет проводить полунатурное моделирование с любым сочетанием реальных подсистем исследуемого изделия и их имитаторов, отрабатывать помехозащищённость изделий, проводить отработку электрического и информационного взаимодействия подсистем и аппаратуры предстартовой подготовки, а также идентифицировать математические модели подсистем исследуемого изделия.