

## РЕФЕРАТ-ПРЕЗЕНТАЦИЯ

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ АЭРОБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ, ОСНАЩЁННЫХ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРОЙ ПОТРЕБИТЕЛЯ**

АО "Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики"

1. Костюков Вадим Вячеславович-первый заместитель генерального директора и главного конструктора АО «ЦНИИАГ», доктор технических наук, руководитель работы
2. Кахетелидзе Валерий Пименович – ведущий инженер-конструктор АО «ЦНИИАГ»
3. Новиков Александр Иванович -главный научный сотрудник АО «ЦНИИАГ», доктор технических наук, старший научный сотрудник
4. Растворов Алексей Юрьевич-начальник научно-технического отделения АО «ЦНИИАГ»
5. Чулюк Дмитрий Сергеевич-начальник лаборатории АО «ЦНИИАГ»

Объектом исследований являются система управления (СУ) комплексом высокодинамичных аэробаллистических летательных аппаратов (ЛА) наземного базирования, состоящая из бортовой системы управления (БСУ) и наземной системы управления (НСУ). Схема деления СУ представлена на рисунке 1. БСУ обеспечивает устойчивый и управляемый полёт ЛА к пункту назначения. НСУ обеспечивает, доставку мобильной пусковой установки (МПУ) и ЛА с исходной (ИП) на стартовую позицию (СП), контроль, информационную поддержку пуска и пуск ЛА.

В 2006...2014 годах в развитии данных комплексов произошло качественное изменение, проявившееся переходом к бортовой многорежимной системе управления (МСУ) на базе инерциального измерительного блока (ИИБ), отличающейся наличием пополняемой номенклатуры режимов управления. Функциональная схема МСУ представлена на рисунке 2.

Номенклатура режимов включает режимы автономного и неавтономного управления ЛА. Каждой группе режимов управления соответствует своя комбинация используемых навигационных модулей. Под режимами инерциально - спутникового управления (ИСУ), понимается группа режимов, обеспечивающих управление ЛА, по информации, доставляемой ИИБ и бортовой навигационной аппаратурой потребителя (БНАП) спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС.

БСУ состоит из структурно-избыточного бортового измерительного навигационного комплекса (БИНК) со свободной архитектурой построения, прибора бортовой электроники (ПБЭ) и рулевого привода (РП). БИНК включает ИИБ, БНАП и систему конечной навигации (СКН) и бортовой спецвычислитель (БСВ). НСУ, расположенная на МПУ, состоит из контрольно-пусковой аппаратуры (КПА), системы топопривязки и навигации (СТПН), включающей навигационную аппаратуру потребителя (НАП), навигационный вычислитель (НВ) и навигационные модули одометрического

канала, и системы прицеливания (СПр), состоящей из наземного гирокомпаса (НГК) и оптической системы передачи азимута (ОСПА).

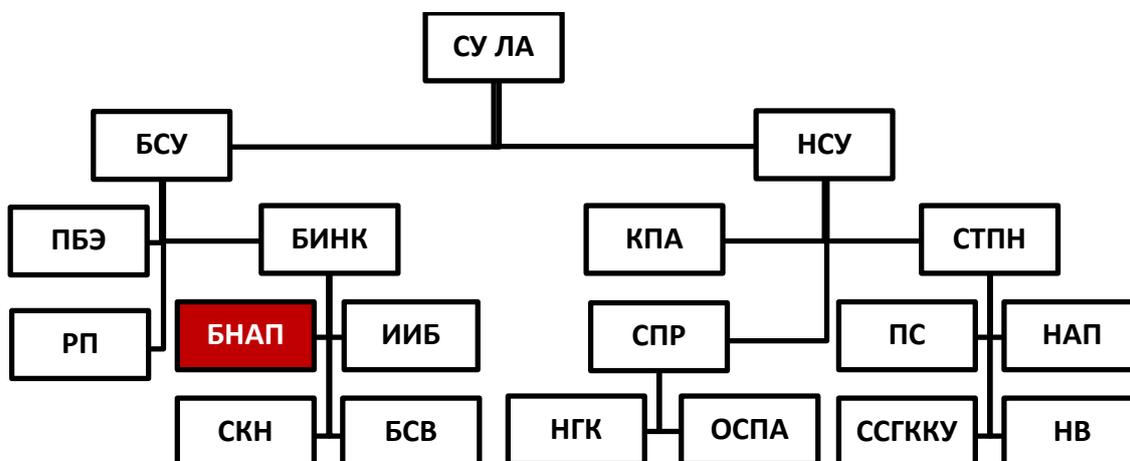


Рисунок 1.-Схема деления системы управления

Базовым режимом управления является режим автономного инерциального управления, формирующий требования ко всем составным частям БСУ, кроме БНАП. Функциональное объединение ИИБ, БСВ и программного обеспечения инерциальной навигации образует БИНС. Уравнения инерциальной навигации решаются в БСВ по информации, доставляемой триадой акселерометров и триадой датчиков угловой скорости.

Начальными условиями интегрирования являются координаты стартовой позиции (СП), вычисляемые в навигационном вычислителе (НВ) СТПН по информации с путевой системы (ПС), самоориентирующейся системы гирокурсоренуказания (ССГККУ) и НАП, а также матрица начальной ориентации, связанной с ИИБ системы координат (ССК), азимут ориентирного направления ИИБ в которой доставляется СПр, а углы начального негоризонта определяются акселерометрами ИИБ.

Для реализации режимов ИСУ базовый приборный состав МСУ дополняют БНАП, формирующей навигационные определения (координаты и проекции скорости) по радиосигналам навигационных спутников СРНС. Объединение

ИИБ, БНАП, БСВ и специального программно-математического обеспечения (ПМО) образует инерциально – спутниковую навигационную систему (ИСНС).

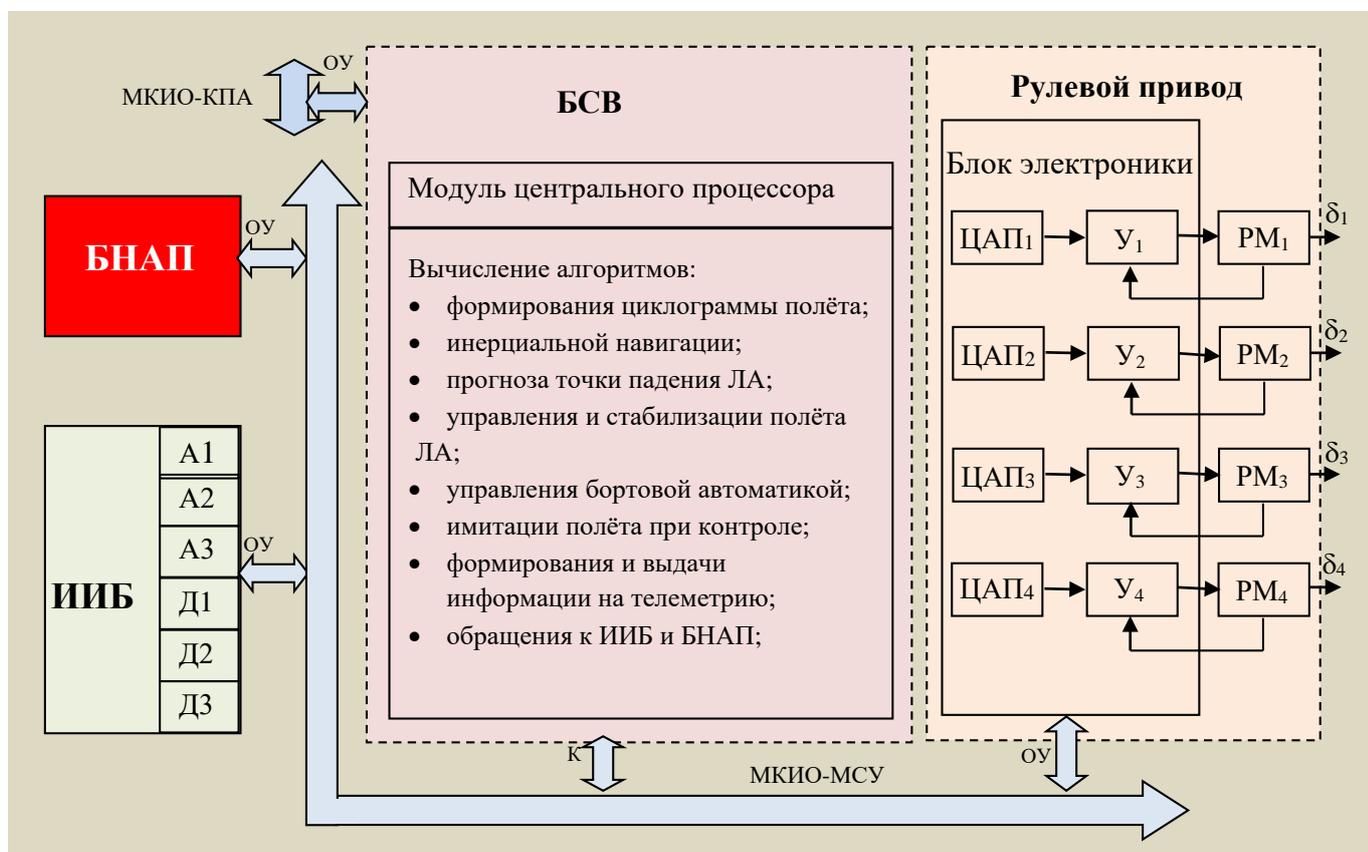


Рисунок 2- Структурная схема МСУ, соответствующая режиму ИСУ ИИБ-инерциальный измерительный блок; БНАП - бортовая навигационная аппаратура потребителя; СКН-система конечной навигации; БСВ - бортовой спецвычислитель; ПБЭ - прибор бортовой электроники; ЦАП<sub>1,2,3,4</sub>- цифроаналоговый преобразователь; У<sub>1,2,3,4</sub>- усилитель; РМ<sub>1,2,3,4</sub>- рулевая машинка; МКИО – мультиплексный канал информационного обмена; К – контроллер; ОУ –оконечное устройство; А1-А3 - акселерометры; Д1-Д3- датчик угловой скорости; КПА- контрольно-пусковая аппаратура;  $h_{1,2,3,4}$ -ход штоков силовых цилиндров

Поскольку основные приборные модули (ИИБ, ПБЭ, РП) и законы программно-терминального управления определены режимами автономного инерциального управления, то синтез режимов ИСУ сводится к выбору БНАП, разработке схемы предстартового обеспечения ИСНС и схемы комплексирования навигационной информации, доставляемой ИИБ и БНАП для траекторной калибровки ИИБ и формирования уточняющей траектории полёта ЛА.

Была разработана двухтрактовая БНАП, отвечающая режиму ИСУ высокодинамичного ЛА (рисунок 3). Предложенная топология взаимно-ортогонального размещения приёмных антенн удовлетворяет критериям обеспечения навигационных определений (координат и проекций скорости каждой точке траектории ЛА), малозаметности ЛА, уменьшению влияния средств РЭП и повышению помехоустойчивости режима ИСУ.

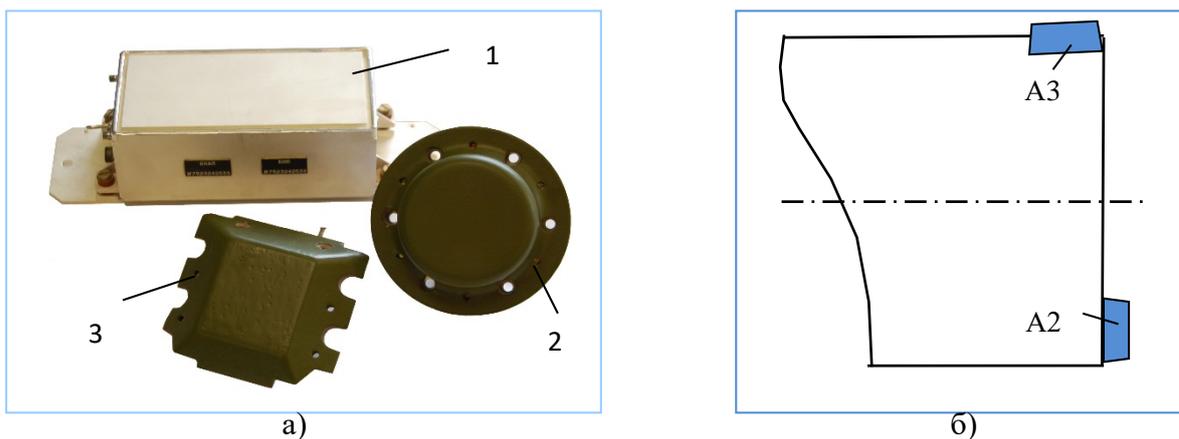


Рисунок 3- Общий вид БНАП и схема размещения приёмных антенн (а-общий вид, б-схема размещения, 1 –блок навигационного приёмника, 2- торцевая приёмная антенна А2, 3-приёмная антенна А1, расположенная на цилиндрической поверхности ЛА

Предпочтение было отдано размещению одной из антенн на цилиндрической поверхности хвостового отсека, обеспечивающему вертикальное положение оси антенны при горизонтальном положении ЛА, а второй - на торцевой нижней части наружной поверхности хвостового отсека. Внешняя часть боковой антенны вписывалась в обводы наружной боковой поверхности ЛА, не образуя неоднородности электрофизических свойств, порождающих увеличение эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) в направлении воздействующего радиолокационного излучения. Установка термозащитных колпаков из радиопрозрачного материала, позволила снизить температуру на рабочей поверхности антенны до уровня менее 60°C. Взаимноортогональное размещение приёмных антенн на наружной поверхности ЛА обеспечивает видимость навигационных спутников в каждой точке траектории и на 10...15дб повышает помехоустойчивость БНАП,

исключает обнаруживаемость приёмных антенн наземными средствами обнаружения со стороны пункта назначения.

Как показали результаты (рисунок 4) натурных работ ЛА наблюдается

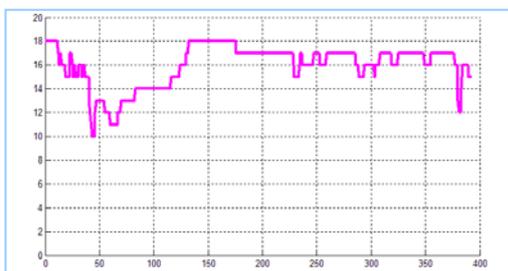


Рисунок 4.-Типовая диаграмма распределения числа видимых спутников

избыточное для получения навигационного определения число навигационных сигналов, принимаемых БНАП с момента старта до момента приземления.

Ускоренному формированию БНАП навигационных определений способствует предстартовая поддержка эфемеридно-временной информацией, доставляемой наземной НАП СТПН, и раскрытие крышки МПУ перед и при подъёме пусковой направляющей с ЛА.

В зависимости от способа использования навигационной информации реализованы режимы ИСУ: с разомкнутой схемой интеграции навигационных определений БИНС и БНАП; с комплексированием навигационной информации с БИНС и СРНС; смешанного управления. Синхронизация определений БИНС и БНАП осуществляется с помощью метки времени, формируемой БНАП.

Общим в рассматриваемых вариантах режима ИСУ является вывод ЛА на попадающую траекторию за счёт коррекции параметров движения (координат и проекций скорости) и «списания» накопившихся ошибок БИНС. Замещение проекций скорости, численных БИНС, скоростной информацией, доставляемой БНАП, позволяет «списать» погрешности, накопленные в первом интеграле динамического уравнения инерциальной навигации, замещение координат- во втором интеграле.

Успешный опыт реализации разомкнутой схемы интеграции позволяет авторам дать удовлетворительную оценку этой схеме в рассматриваемом классе ЛА при условии обеспечения регулярности навигационных определений БНАП. Регулярная информационная поддержка БНАП со стороны БИНС координатами, проекциями скорости и ускорениями ЛА,

размещение приёмных антенн на поверхности ЛА, с учетом возможной эволюции его траекторного движения, признак достоверности своих определений, формируемый БНАП, позволили во всех натурных работах получать избыточное число радионавигационных сигналов, принимаемых с момента предстартовой готовности до момента приземления ЛА, а предстартовая калибровка и выставка лазерного ИИБ с помощью СПр снизить погрешности счисления на "беспутниковом" интервале. В натурных работах ЛА, оснащённых МСУ с ИСНС, реализующей разомкнутую схему интеграции, погрешность их приземления не превышала 6м.

Режимы ИСУ с комплексированием навигационной информации осуществляются по оценкам навигационных и калибровочных параметров, доставляемым ИСНС, реализующей схемы связанного комплексирования БИНС (ИИБ) и БНАП. Особенностью разработанного АО "ЦНИИАГ" направления слабосвязанных схем комплексирования является учёт специфики траекторного движения ЛА, использования результатов автономной калибровки и выставки ИИБ и построения ИСНС с редуцированным вектором оцениваемых параметров, удовлетворяющих общему для всех алгоритмов условию независимости числа идентифицированных при комплексной калибровке параметров от размера редуцированного вектора.

Режимы ИСУ смешанного управления сочетают управление с замещением и комплексированием. Примером является управление ЛА с замещением координат, численных БИНС, позиционными определениями СРНС и оцениванием проекций скорости и калибровочных параметров БИНС по скоростной информации от СРНС.

В развитие методологии синтеза МСУ предложены различные варианты ИСНС, реализующие схемы инвариантного и неинвариантного комплексирования навигационной информации в рамках слабосвязанной интеграции ИИБ (БИНС) и БНАП. Информационно- навигационной основой режима ИСУ может стать любой из предложенных алгоритмов ИСНС при

соблюдении условия  $\mathcal{G}_{ПН}^2 + \mathcal{G}_{CV}^2 \leq \mathcal{G}_{доп}^2$ , где  $\mathcal{G}_{ПН}$  - погрешность местоопределения пункта назначения;  $\mathcal{G}_{CV}$  - техническое рассеивание ЛА;  $\mathcal{G}_{доп}$  - допустимое рассеивание.

Соблюдению этого условия способствуют применение процедур оптимизации обработки всей текущей навигационной информации, проведение предстартовой калибровки ИИБ, используя особенности предстартовой подготовки и высокоточную информацию с СПр, проведение полётной автономной калибровки акселерометров на участке траектории с отсутствием кажущегося ускорения, коррекция траектории с целью обеспечения большей точности оценивания отдельных калибровочных параметров ИИБ, снижение динамической погрешности МСУ и прочие факторы.

На рисунке 5, в качестве примера, приведена схема ИСНС с инвариантной схемой комплексирования калибровочных параметров и погрешностей предстартовой ориентации ИИБ по каналу скорости  $Z_{\bar{v}}^{ИСНС} = Z_{\bar{v}}^{БИС} - Z_{\bar{v}}^{БНАП}$  и получения окончательной оценки  $\tilde{u}_0$ . Приведённое решение ИСНС отличается

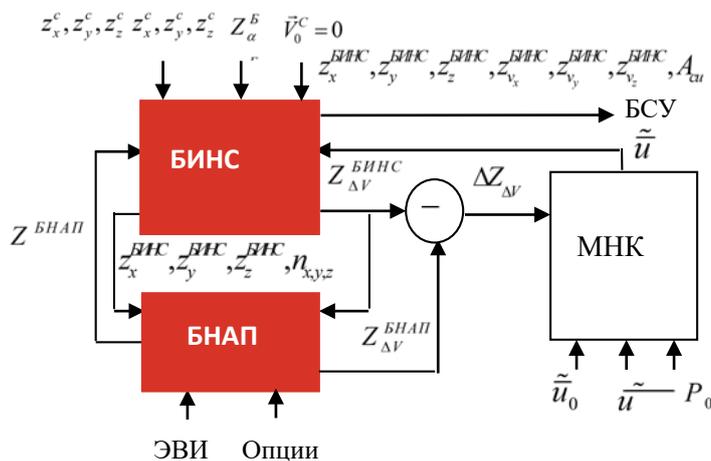


Рисунок 5- Пример схемы инвариантной ИСНС с оцениванием калибровочных параметров и погрешностей ориентации ИИБ ( $\tilde{V}_0, \tilde{R}_0, \tilde{A}_0$  - начальные условия для интегрирования уравнений инерциальной навигации,  $\tilde{u}$  - вектор оценок калибровочных параметров и погрешностей ориентации, МНК- алгоритм оценивания на базе метода наименьших квадратов, ЭВИ - эфемеридно - временная информация,  $R_v^{БНАП}$  - измерительный шум скоростного канала БНАП,  $P_0$  - ковариационная матрица погрешностей исходной информации о векторе оцениваемых параметров  $\tilde{u}_0$ )

сравнительно простым алгоритмом, что не создаёт трудности его реализации в БСВ. При прекращении приёма спутниковых сигналов управление ЛА продолжается в режиме автономного инерциального управления с откорректированным на активном участке траектории ИИБ.

Научно-методический аппарат единого для всех типов ЛА программно-терминального метода управления без предварительного формирования попадающей траектории с разделением каналов управления, позволяет реализовать как навесные, так и настильные траектории движения ЛА в режиме ИСУ.

В БСВ поступает навигационная информация, доставляемая ИИБ и БНАП, а также данные полётного задания на пуск, содержащие формализованную информацию о координатах стартовой позиции, координатах точки цели и другие сведения. В него закладывается основная цель управления (полётное задание), процессы, протекающие в ней соизмеримы со временем движения ЛА. БСВ реализует алгоритмы и циклограмму режима ИСУ в реальном масштабе времени и формирует разовые команды управления движением ЛА из условия достижения конечной цели управления. БСВ переданы также функции навигационного вычислителя:

- БИНС, осуществляющего решение уравнений инерциальной навигации по текущей первичной информации, доставляемой ИИБ, и начальным данным, доставляемым СТПН и СПр;

- ИСНС, осуществляющей совместную отработку навигационной информации и являющейся навигационной базой БСУ в режиме ИСУ.

Многолетний цикл теоретических и экспериментальных исследований в развитие СУ с режимами ИСУ привёл к созданию методологии их синтеза и появлению серийных образцов СУ для рассматриваемого класса ЛА с пополняемой номенклатурой режимов управления.

Режим ИСУ положен в основу разработанных технических решений СУ: с безыллюминаторным исполнением ЛА; с помехоустойчивой БСУ; с двухэтапной методикой выставки ИИБ без НГК и оптической системы

передачи азимута; аппаратно-агрегатной пусковой платформы, включающей основную и дополнительную (на базе ТЗМ) МПУ.

В нижеприведённой таблице приведены некоторые качественные и количественные показатели системы управления

№	ПАРАМЕТР	ПОКАЗАТЕЛЬ
1	Бортовая система управления высокодинамичным ЛА	Многорежимная
2	Режим управления	Режим инерциально спутникового управления
3	Бортовая навигационная система	Инерциально-спутниковая
4	Схемы интеграции	Разомкнутая и связанные
5	Варианты схем комплексирования	Инвариантная, неинвариантная
6	Выставка и калибровка бортового инерциального измерительного блока	Предварительная на стартовой позиции одним из предложенных способов и доводочная на активном участке траектории
7	Размер вектора оцениваемых параметров	От 3 до 9 (инвариантная схема) От 6 до 12 (неинвариантная схема)
8	Инерциальный измерительный блок	Лазерный трёхосный блок на эффекте Зеемана
9	Бортовая навигационная аппаратура потребителя СРНС	Двухтрактовая по 12 каналов на каждую из двух взаимноортогональных приёмных антенн
10	Формирование БНАП навигационных определений	На всей траектории полёта ежесекундно
11	Методика функционирования в полёте	Калибровка и доводочная выставка ИИБ на активном участке траектории с целью переключения СУ в режим автономного инерциального управления ЛА при прекращении приёма спутниковых сигналов на оставшейся части траектории
12	Погрешность приземления	5 м и менее
13	Требования к точности предварительной выставки ИИБ	Инвариантность в допустимом диапазоне
14	Сокращение времени боевого цикла применения	При доработке транспортно-заряжающей машины до уровня МПУ, обеспечивающей пуски ЛА в режиме инерциально-спутникового управления, может достигать 79 мин.
15	Сокращение времени пусковой готовности	В 9...15 раз.

Таким образом, ставшая возможной с появлением режимов ИСУ модернизация комплекса, приводит к существенному повышению эффективности и расширению его оперативных возможностей.