

УДК 629.7.05

**П.С. ВОРОНЦОВ,**  
**С.Г. БРАЙТКРАЙЦ,** доктор  
технических наук, старший  
научный сотрудник

## **РОЛЬ И ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ВОЕННО-НАУЧНОМ СОПРОВОЖДЕНИИ НИОКР ПО СОЗДАНИЮ АВИАЦИОННЫХ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ**

*В статье показана значимая роль имитационного моделирования в военно-научном сопровождении научно-исследовательских работ по созданию информационно-управляющих систем. Рассмотрена технология моделирования современных информационно-управляющих комплексов летательных аппаратов, основанная на математических моделях динамики полета летательного аппарата и геофизических полях Земли, позволяющая выработать рекомендации по разработке технических заданий на информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов в части корректного задания требований к их точностным характеристикам. Для отладки программного обеспечения информационно-управляющих комплексов предлагается решение обратной задачи динамики.*

**Ключевые слова:** технология моделирования; математическое моделирование; информационно-управляющие комплексы; обратная задача динамики; цифровой двойник.

Военно-научное сопровождение НИР по разработке авиационных и морских информационно-управляющих систем (ИУС) осуществляется в целях контроля в установленном порядке сроков и качества выполняемых в интересах Минобороны России научно-исследовательских работ в рамках государственного оборонного заказа, оценки выполнения требований Минобороны России к создаваемой научно-технической продукции, на всех этапах разработки образцов ВВСТ.

Существующей нормативной базой по порядку организации научной работы в Вооруженных Силах Российской Федерации, определено, что одной из основных форм научной работы является моделирование с использованием компьютерных технологий в интересах разработки систем поддержки принятия решений, автоматизированных систем, обучающих и тренажерных комплексов, систем и комплексов проектирования ВВСТ и их компонентов, а также перспективных информационных технологий в области обороны и информационной безопасности. Однако, не указано, каким образом должно проводиться моделирование.

Научно-методический аппарат моделирования для применения при военно-научном сопровождении исследований по разработке ИУС в настоящее время не создан и, соответственно, не применяется при контроле качества и сроков выполнения НИР.

Основу научно-методического аппарата должна составлять совокупность согласованных конкретных частных методик, которая будет способствовать наращиванию мощности научно-методического аппарата, что обеспечивает увеличение эффективности военно-научного сопровождения НИР.

Таким образом, применение моделирования при военно-научном сопровождении НИР по разработке авиационных и морских ИУС является актуальной задачей, способствующей выполнению следующих задач:

оценка соответствия проводимых исследований в НИР требованиям ТЗ;

оценка научно-технического уровня результатов НИР, выполняемых в рамках ГОЗ;

разработка предложений и рекомендаций, обеспечивающих повышение качества проводимых исследований;

оценка перспектив реализации (внедрения) результатов исследований и разработок в образцы ВВСТ.

При проведении научных исследований, связанных с разработкой новых образцов ВВСТ, возникает необходимость проведения испытаний с целью подтверждения заданных технических характеристик. Проведение предварительных испытаний для определения соответствия образца требованиям тактико-технического задания и последующих государственных (межведомственных) испытаний является весьма сложной, долговременной и дорогостоящей задачей, осуществление которой происходит с привлечением большого количества специалистов, а также требует использования инфраструктуры военных полигонов [1].

Одним из вариантов решения проблемы сокращения финансово-временных ресурсов испытаний является проведение имитационного моделирования с использованием современных информационных технологий.

Использование таких технологий позволяет решать задачи весьма высокого уровня сложности, включая моделирование процессов управления летательными аппаратами в воздушном пространстве, отработку алгоритмов управления и отладку программного обеспечения.

В последнее время в разработке находится целый ряд образцов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), крылатых ракет (КР), гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЗЛА) и других многофункциональных высокоманевренных летательных аппаратов (ВМЛА), которые будут составлять основу применяемых образцов ВВСТ в ходе будущих военных действий. Бортовые информационно-управляющие комплексы (БИУК) являются основой ВМЛА, позволяющие путем обработки поступающей информации управлять ими в различных условиях и выполнять сложные маневры. При разработке таких технически сложных образцов ВВСТ также возникает необходимость применения имитационного моделирования<sup>1</sup>.

Высокий уровень развития вычислительной техники, с одной стороны, позволяет успешно решать задачи моделирования практически любого уровня сложности, с другой стороны, объективно существует необходимость разработки все более сложных алгоритмов обработки в реальном масштабе времени разнообразной информации измерительных устройств о внешней обстановке и состоянии бортовых систем, имитировать воздействие по воздушным и наземным целям управляемыми средствами поражения (УСП).

Математическое моделирование при создании вычислительных комплексов позволяет заменять работу с дорогостоящими компонентами БИУК, одновременно сокращая при этом трудоемкость и стоимость испытаний.

Математическое моделирование может применяться на всех этапах создания бортовых комплексов, начиная от этапов разработки, испытаний и заканчивая техническим сопровождением [2].

Основными направлениями развития прикладных методов обработки информации и моделирования являются:

моделирование работы БИУК как элемента технологического процесса разработки и исследований бортовых алгоритмов и систем;

моделирование состояния и поведения ЛА и его бортового оборудования в информационном пространстве в реальном времени как основного содержания комплексной обработки информации БИУК.

---

<sup>1</sup> Бабиченко А.В. Прикладные методы обработки информации и моделирования при проектировании информационно-управляющих комплексов высокоманевренных летательных аппаратов: автореф. дис. ... доктора техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 32 с.

К задачам, решаемым с помощью математического моделирования, можно отнести следующие:

- анализ и корректировка требований технического задания к точности, информационным возможностям комплекса и систем;
- формирование требований к аппаратно-измерительной части БИУК;
- разработка и лабораторные испытания методов и алгоритмов решения функциональных задач БИУК;
- формирование математических моделей, алгоритмов и программ комплексной обработки информации;
- обеспечение проведения полунатурных испытаний;
- анализ результатов летных испытаний и корректировка программно-математического обеспечения (ПМО) БИУК;
- разработка алгоритмов послеполетного анализа и экспресс-анализа результатов работы БИУК;
- формирование научно-технического задела для будущих разработок и прогнозирование перспектив развития БИУК ВМЛА.

При разработке нового БИУК ВМЛА основным методом и инструментом исследований является базовая версия бортового ПМО, которая затем испытывается в натурных условиях и дорабатывается по результатам испытаний.

Для осуществления моделирования БИУК необходимо создание системы моделирования. Наиболее рациональный подход в рассматриваемом случае – имитационное моделирование, представляющее процесс конструирования модели реальной системы и постановку экспериментов на этой модели с целью изучения поведения системы в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или совокупностью критериев.

Система имитационного математического моделирования (СИММ) БИУК должна включать в себя: модель БИУК; модель ВМЛА как механической системы; модель информационного пространства. При проектировании допускается пренебрежение деформациями летательного аппарата и замена динамической модели летательного аппарата кинематической.

- Задача моделирования решается в два этапа:
- создание эталонных траекторий движения ВМЛА в информационном пространстве;
  - моделирование работы БИУК ВМЛА на этих траекториях.

Основной вопрос обеспечения качества имитационного математического моделирования – формирование эталонной траекторной информации как совокупности данных о состоянии ВМЛА и взаимодействующих с ним объектов в информационном пространстве. Эталонная траекторная информация должна удовлетворять противоречивой системе требований: полнота, целостность, непрерывность, корректность (в смысле физической реализуемости), точность, априорность и фундаментальность.

Для построения эталонной траектории применяется двухэтапный метод.

На первом этапе строится траектория, удовлетворяющая требованиям полноты, корректности и целостности. Для этого может использоваться один из следующих подходов:

численное решение дифференциальных уравнений движения летательного аппарата;

на основе выборки информации из записей полетных данных реальных летательных аппаратов;

на основе отдельных типовых маневров.

При этом рассчитываются значения ключевых параметров, которые записываются в массивы, на основе которых строятся аппроксимирующие функции, восстанавливающие законы изменения ключевых параметров, близкие к фактическим. Результатом работы первого этапа являются конкретные выражения для аппроксимирующих функций.

Для формирования аппроксимирующих функций для массивов опорной информации могут быть применены следующие методы [3]:

кусочная аппроксимация элементарными кривыми, когда для каждого ключевого параметра на типовом маневре подбирается элементарная функция из специальной библиотеки;

аппроксимация с помощью тригонометрических рядов Фурье на интервале  $[0, T]$ , где  $T$  – продолжительность моделирующего движения летательного аппарата. Главное достоинство метода – минимальное количество параметров аппроксимирующих функций, простота аппроксимирующих выражений и гарантированная целостность траекторной информации. Недостатком является то, что на краях интервала  $[0, T]$  суммы рядов Фурье могут иметь колебательный характер, обычно не присущий траектории движения летательного аппарата. Это может исказить траекторию и делать её не вполне корректной;

аппроксимация табулированных значений ключевых параметров кубическими сплайнами. Подбор параметров сплайнов осуществляется путем решения трехдиагональной системы  $(n+1)$  линейных уравнений, полученных из условий гладкости стыков на  $n$  временных интервалах ( $n \leq 1000$ ).

Существуют следующие методы формирования ключевых параметров:

разбиение траектории на типовые элементы (типовые маневры): взлет, горка, крейсерский полет, пикирование, разгон, торможение, правый/левый виражи, правая/левая бочки, петля Нестерова и т.д., описываемые участками элементарных линий, в простейшем случае – отрезков прямых и дуг окружностей;

численное интегрирование системы дифференциальных уравнений движения ВМЛА – динамической или кинематической модели;

использование записанных с помощью контрольно-записывающей аппаратуры выходных параметров навигационного комплекса во время полета летательного аппарата, представляющих собой гипотетическую траекторию, с точностью до погрешностей комплекса, совпадающую с реальной. Малые величины погрешностей комплекса и физическая устойчивость движения летательного аппарата гарантируют, что она будет отражать основные свойства реальной: корректность, целостность и полноту.

Вторым этапом построения эталона является разработка алгоритмов восстановления полной траекторной информации для каждого момента времени по известным значениям ключевых параметров. Эта задача решается на втором этапе. В зависимости от вида выбранных ключевых параметров алгоритмы восстановления траекторной информации могут быть различными. Перечень вычисляемых параметров зависит от конкретной задачи моделирования и, как правило, включает в себя следующее:

параметры навигационного пространства (кривизны уровневых поверхностей, параметры взаимной угловой ориентации ортогональных трехгранников, их угловые скорости, расстояния между выбранными точками и т.п.);

параметры информационных полей (гравитационное поле тяготения, поле высот рельефа, поле движения атмосферы, поле координат ориентиров и т.п.);

координаты центра масс летательного аппарата и выбранных точек интереса;



векторы абсолютных и относительных линейных и угловых скоростей и ускорений выбранных точек летательного аппарата, отнесенных к разным системам координат;

параметры угловой ориентации летательного аппарата;

параметры перегрузок и ускорений.

На втором этапе единая служба времени СИММ рассчитывает модельное время, для каждого модельного времени рассчитываются аппроксимации ключевых параметров, по значениям ключевых параметров рассчитывается полный вектор траекторных данных.

Правильный выбор аппроксимирующих функций гарантирует, что восстановленные значения ключевых параметров будут удовлетворять требованиям точности, непрерывности и априорности при сохранении корректности и целостности исходных массивов выборок. Фундаментальность и полнота обеспечивается выбором вида ключевых параметров. В качестве ключевых параметров рекомендуются: географические или декартовы координаты центра масс; углы курса, тангажа, крена или составляющие вектора конечного поворота относительно гринвичского трехгранника. Параметры деформации, рассчитываемые в функции параметров движения твердого тела, уточняют поведение отдельных точек.

В целом, применение методов математического моделирования позволяет в ограниченных условиях решать важную научно-техническую задачу проведения испытаний БИУК и последующей доработки их программного обеспечения.

Предлагаемая технология моделирования современных ВМЛА, представляющая собой процесс выработки рекомендаций по разработке тактико-технического задания (ТТЗ) на перспективные БИУК, приведена на рисунке 1.

Исходными данными являются модель динамики полёта летательного аппарата (блок 1), блок формирования траекторий (блок 2) и блок формирования моделей физических полей Земли (блок 3).

В блоке формирования моделей физических полей Земли могут создаваться модели магнитного, гравитационного рельефа поверхности, оптического, теплового или радиолокационного контраста полей Земли. Навигация по геофизическим полям с определением местоположений основана на сопоставлении информации, получаемой с помощью бортовой системы наблюдения поля (датчика поля), с информацией о поле, хранящейся в бортовой памяти.

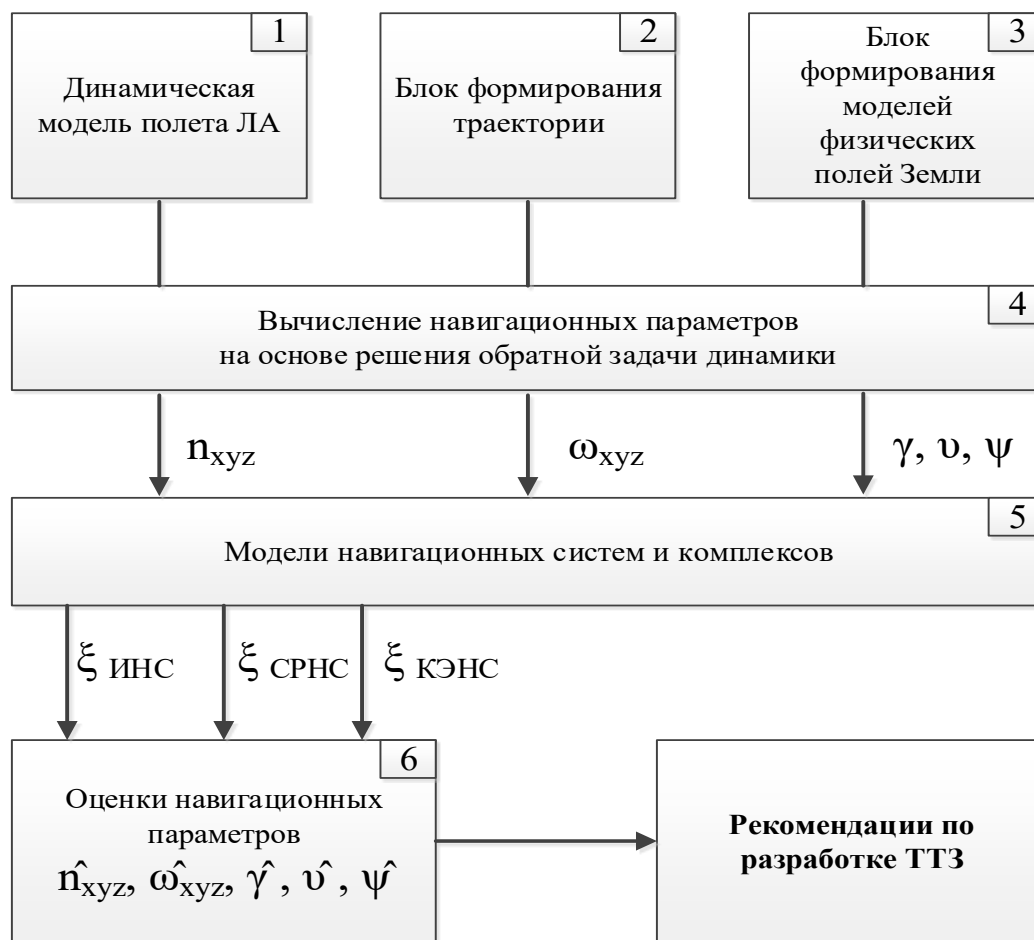


Рисунок 1 – Схема выработки рекомендаций по разработке ТТЗ на БИУК ( $n_{xyz}$  – проекции вектора кажущегося ускорения,  $\omega_{xyz}$  – проекции абсолютной угловой скорости,  $\gamma$  – крен,  $\nu$  – тангаж,  $\psi$  – рыскание)

На основе моделей взаимодействия пилотажно-навигационного комплекса и физических полей (блок 4) формируются основные навигационные параметры, поступающие на вход моделей навигационных систем и комплексов (блок 5).

Для имитации функционирования БИУК может быть использовано решение обратных задач динамики<sup>2</sup>. Решение обратных задач динамики позволяет определить параметры управления – перегрузки и угловые скорости, воздействующие на ЛА для движения управляемого объекта по заданной траектории. В рамках рассматриваемой задачи вычисляемые на основе решений обратных задач динамики параметры одновременно представляют собой показания гипотетических

<sup>2</sup> Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления: уч. пособие. М.: Машиностроение, 2004. – 573 с.



«идеальных» чувствительных элементов (ЧЭ) – гироскопов и акселерометров, установленных на борту моделируемого ЛА.

Для придания реалистичности имитируемым процессам к показателям идеальных ЧЭ добавляются шумы и дрейфы реальных ЧЭ. Далее показания (теперь уже реальных ЧЭ) поступают в блок модулей навигационных систем и комплексов (блок 5).

Основой всех современных навигационных систем и комплексов являются инерциальные навигационные системы (ИНС), обладающие абсолютной помехозащищенностью, автономностью, глобальностью и приемлемой точностью.

В настоящее время широко используются бесплатформенная версия ИНС, в которой движение собственной платформы и сопровождающих трехгранников воспроизводятся алгоритмически. Помимо преимуществ по массогабаритным параметрам БИНС обеспечивают простоту комплексирования с внешними навигационными системами и устройствами.

Структурная схема моделирования БИНС с навигационной аппаратурой потребителей спутниковой навигационной системы (НАП СНС) и системой комплексной обработки навигационной информации (КОИ) представлена на рисунке 2.

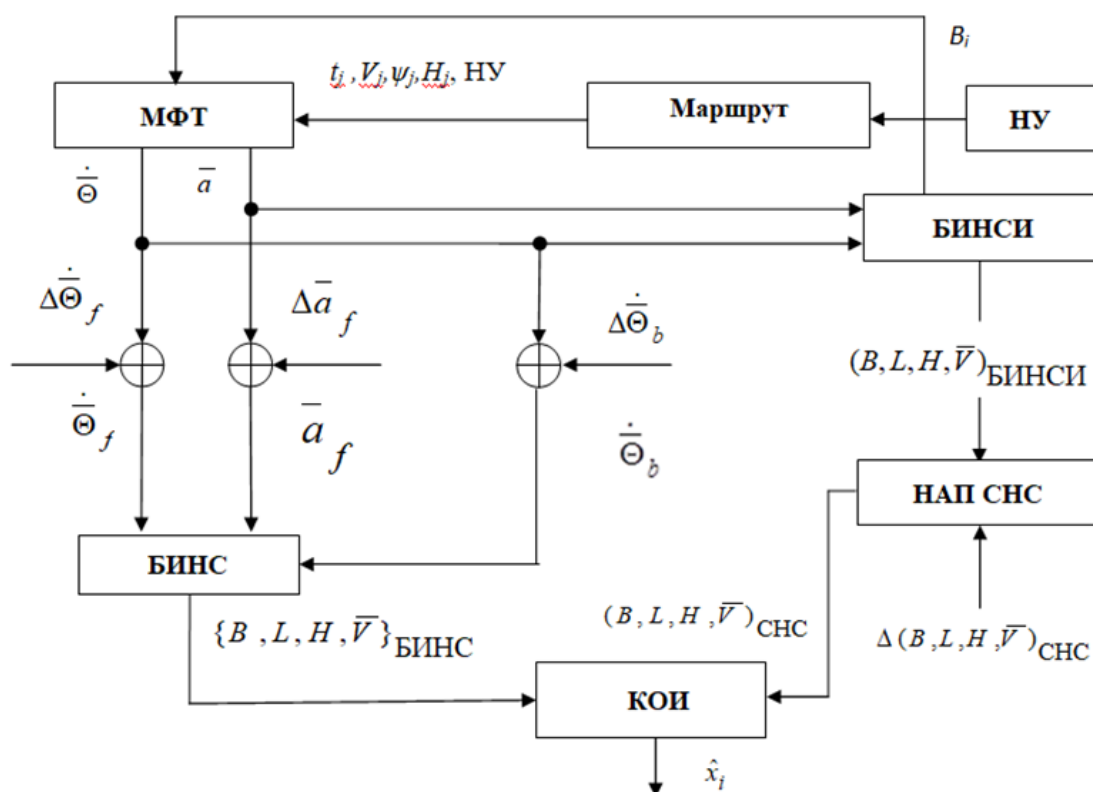


Рисунок 2 – Структурная схема моделирования БИНС и НАП СНС

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: МФТ – модуль формирования параметров траектории;  $t_j$ ;  $V_j$ ;  $\psi_j$ ;  $H_j$  – соответственно время, величина путевой скорости, истинный курс и высота над земным эллипсоидом в  $j$ -х узлах траектории, на основе которых с учетом законов аэромеханики и начальных условий (НУ) определяются («подыгрываются») остальные параметры движения объекта, например, летательного аппарата (ЛА) в околоземном пространстве; БИНСИ – модуль идеальной (без учета погрешностей чувствительных элементов (ЧЭ): гироскопов и акселерометров) бесплатформенной инерциальной навигационной системы; БИНС – модуль реальной (с учетом дрейфов ЧЭ) БИНС;  $B_i$  – матрицы направляющих косинусов, используемые для формирования сигналов ЧЭ;  $\{B, L, H, \bar{V}\}_{\text{БИНС}}$  – счисляемые в БИНС геодезические широта и долгота местоположения ЛА, а также высота над соответствующим земным эллипсоидом и траекторная скорость;  $\{B, L, H, \bar{V}\}_{\text{СНС}}$  – определяемые спутниковой навигационной системой геодезические широта и долгота местоположения объекта, а также высота над земным эллипсоидом и величина траекторной скорости;  $\bar{a}$  – вектор кажущегося ускорения в проекциях на оси измерительного трехгранника блока чувствительных элементов (БЧЭ);  $\bar{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$  – вектор ускорений от действия активных сил;  $\bar{a}_f = [a_x, a_y, a_z]_f^T$  – вектор зашумленных сигналов акселерометров реальной БИНС;  $\Delta\bar{a}_f = [\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z]_f^T$  – вектор случайных смещений сигналов акселерометров;  $\dot{\theta}_f = [\dot{\theta}_{x_f}, \dot{\theta}_{y_f}, \dot{\theta}_{z_f}]_f^T$  – вектор зашумленных угловых скоростей БИНС в прямом канале измерений;  $\Delta\dot{\theta}_f = [\Delta\dot{\theta}_{x_f}, \Delta\dot{\theta}_{y_f}, \Delta\dot{\theta}_{z_f}]_f^T$  – вектор дрейфов гироскопов в прямом канале измерений;  $\dot{\theta}_b = [\dot{\theta}_{x_b}, \dot{\theta}_{y_b}, \dot{\theta}_{z_b}]_b^T$  – вектор зашумленных угловых скоростей БИНС в прямом канале измерений;  $\Delta\dot{\theta}_b = [\Delta\dot{\theta}_{x_b}, \Delta\dot{\theta}_{y_b}, \Delta\dot{\theta}_{z_b}]_b^T$  – вектор дрейфов гироскопов в инверсном канале измерений;  $\hat{x}_i$  – оценки ошибок БИНС и БЧЭ;  $\Delta(\dots)$  символ ошибки;  $\Delta(B, L, H, \bar{V})_{\text{СНС}}$  – ошибки СНС<sup>3</sup>.

Для аппроксимации заданных дискретно параметров траекторного движения между узлами применяется математический аппарат кубических сплайнов [4]. Кубический сплайн непрерывен и имеет непре-

<sup>3</sup> Бабич О.А., Боднер В.А., Козлов М.С., Потапов М.Д., Селезнев В.С. Авиационные приборы и навигационные системы: учебник. М.: ВВИА, 1969. – 638 с.

рывные первую и вторую производные, а третья производная может претерпевать разрыв в точках соединения. Т.е. параметры траектории моделируются не ломаными, а плавными кубическими параболами. Основное уравнение сплайн-аппроксимации имеет вид:

$$\frac{\tau_i}{6} M_i + \frac{\tau_i + \tau_{i+1}}{3} M_{i+1} + \frac{\tau_{i+1}}{6} M_{i+2} = \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{\tau_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{\tau_i},$$

где  $\tau_i = t_{i+1} - t_i$  –  $i$ -й интервал аппроксимации;

$M_i$  и  $M_{i+1}$  – вторые производные (моменты) сплайна в узлах;

$y_i$  – известные значения параметра в углах.

После вычисления навигационных параметров в блоке 6 (рисунок 1) могут быть получены их оценки, которые станут основой для формирования рекомендаций по требованиям к точностным характеристикам, задаваемым при разработке тактико-технического задания на БИУК.

В перспективе ввиду необходимости еще более детальной имитации навигационных комплексов во время разработки и проведения испытаний перспективным и вместе с тем весьма сложным инструментом могут выступить цифровые двойники [5].

Цифровой двойник – это виртуальная модель, которая на микро- и макроуровне описывает реально существующий объект (выступая как двойник-экземпляр готового конкретного изделия) или как цифровой двойник-прототип будущего объекта. При этом в идеале любая информация, которая может быть получена при тестировании физического объекта, должна быть получена на базе «тестирования» его цифрового двойника.

Для построения комплексной модели цифровых двойников применяются различные инструменты, в частности, используются численные методы моделирования физических процессов в материалах объекта с целью прогнозирования реакции изделия на различные эксплуатационные нагрузки; применяются модели, которые несут информацию о внешнем виде и структуре объектов, информацию о материалах, процессах, размерах, и прочее, используются модели анализа видов и последствий отказов, основанные на анализе надежности систем, которые могут объединять математические модели отказа со статистической базой данных о режимах отказа.

При проектировании навигационного оборудования в большинстве случаев после создания изделия виртуальная модель не исполь-

зуется. В концепции цифрового двойника виртуальная модель не отбрасывается после создания материального объекта, а используется в связке с физическим на протяжении всего жизненного цикла: на этапе тестирования, доработки, эксплуатации и утилизации.

В связи с высокой сложностью цифровых двойников математическое моделирование остается пока самым востребованным вариантом разработки и тестирования аппаратуры.

Таким образом, в статье показаны возможности имитационного моделирования в военно-научном сопровождении НИОКР по созданию информационно-управляющих систем. Рассмотрена технология моделирования современных информационно-управляющих комплексов летательных аппаратов, основанная на математических моделях динамики полета летательного аппарата и физических полей Земли, позволяющая выработать рекомендации по разработке ТТЗ на информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов в части корректного задания требований к точностным характеристикам БИУК.

#### Список использованных источников

1. Брайткрайц С.Г., Евдокимов В.А., Безденежных С.И., Жданов С.С. Проблемные вопросы проектирования бортовых систем управления беспилотных летательных аппаратов большой дальности // Вооружение и экономика. 2019. №3(49). – С. 19-30.
2. Брайткрайц С.Г., Евдокимов В.А. Аналитический принцип формирования опорных вариантов облика бортовых систем управления высокоточного оружия большой дальности // Системы ВТО. Создание, применение и перспективы: научно-технический журнал АО «КБП им. А.Г. Шипунова». 2020. №1(25). – С. 128-143.
3. Бердышев В.И., Петрак Л.В. Аппроксимация функций, сжатие численной информации, приложения. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 1999. – 295 с.
4. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М: Мир, 2001. – 604 с.
5. Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: КомНьюсГруп, 2019. – 368 с.