

УДК 519.876.2 : 303.094.7 : 629.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И СОПРОВОЖДЕНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Роднищев Н.Е., Земляков А.С. (Казань), Сомов Е.И. (Самара),
Опарин Г.А. (Иркутск), Емалетдинова Л.Ю., Новикова С.В. (Казань)

Введение

В 1972 г. в Казанском авиационном институте (КАИ) [1], ныне Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ), был организован факультет Вычислительных и управляющих систем, в настоящее время Институт компьютерных технологий и защиты информации. На сайте <https://kai.ru/web/institute-of-technical-cybernetics-and-informatics/about-the-institute> представлены юбилейный альбом с историей этого института и выставка, посвященные его 50-летию. Все авторы этой обзорной статьи – выпускники КНИТУ-КАИ, связанные научными работами с кафедрами «Прикладной математики» и «Кибернетики», здесь кратко представляют свои результаты по методам и программным средствам математического и имитационного моделирования в проектировании и сопровождении вычислительных и управляющих систем, реализованным в аэрокосмической технике.

Разнообразные методологические аспекты математического и имитационного моделирования, включая перспективные интеллектуальные технологии мониторинга и анализа динамики управления сложными техническими объектами [2], представлены в известных монографиях, в докладах научно-практических конференций ИММОД, например в пленарных докладах [3] и [4]. Актуальность практического применения методов и средств имитационного моделирования регулярно выдвигается на этих конференциях, например в пленарных докладах [5] и [6] из Казани. Авторы статьи используют общепринятые понятия: «математическое моделирование» (*mathematical modeling*) – *составление математических моделей* и «компьютерная имитация» (*computer simulation*), которая реализуется программно-аппаратными вычислительными комплексами.

Термин «проектирование» понимается в классическом смысле для специалиста по разработке систем управления движением (СУД) и подразумевает структурно-параметрический синтез с последующим динамическим анализом. При этом цель проектирования определяется совокупностью требований к динамическим показателям функционирования СУД – точность в различных режимах, быстродействие, запасы устойчивости и др. По существу, речь идет о формировании динамического облика СУД в процессе научно-исследовательских работ (НИР), выполняемых с математическими моделями на основе аналитических и численных методов их исследования.

Традиционно процесс исследования динамики и проектирования СУД представляет логически организованную последовательность многовариантных расчетов (вычислительных процедур), на каждом шаге которой в соответствии со стратегией исследования и поиска приемлемых решений варьируются структура и параметры законов управления, используемых методов, выполняются расчетные работы, производится оценка результатов и принимается решение о дальнейшем направлении исследований.

Уникальность динамического облика СУД аэрокосмической техники проявляется в комплексном сочетании таких факторов, как гибридный характер математической модели, упругость конструкции аэрокосмических объектов со слабым демпфированием колебаний, высокая размерность вектора состояния и жесткость уравнений динамики, наличие существенно нелинейных элементов, реализация алгоритмов навигации, наве-

дения и управления с использованием БЦВМ, множество уровней детализации моделей, построенных на различных принципах декомпозиции и редукции.

Методы исследования и проектирования систем управления движением

При исследовании, проектировании и далее эксплуатационном сопровождении вычислительных и управляющих систем аэрокосмической техники используются как известные математические методы, так и фундаментальные результаты НИР, выполненных кафедрами *Прикладной математики и информатики (ПМИ)* и *Кибернетики*.

На кафедре ПМИ в научной школе профессора *Юрия Васильевича Кожеевникова* по проблеме «Общая теория оптимального управления детерминированными и стохастическими объектами» установлены статистические закономерности процессов и систем с достижением экстремальных значений их осредненных характеристик. Разработанная здесь теория оптимального осреднения привела к методам решения широкого круга задач статистической оптимизации летательных аппаратов [7,8] и предложила оригинальный вероятностный подход к проблеме синтеза программного управления.

В монографии [9] выявлены условия оптимального осреднения стохастических систем со случайными параметрами с помощью идей и методов математического программирования и вариационного исчисления, которые позволили применить конструктивные численные методы поиска оптимального управления, разработанные в математическом программировании для решения задач оптимизации стохастических систем.

Дальнейшее развитие на кафедре ПМИ теории оптимального осреднения управлений в стохастических системах выполнялось в рамках теории марковских процессов по научному направлению «Разработка общей теории оптимального управления и идентификации нелинейных стохастических систем с функциональными ограничениями». Здесь исследованы условия управляемости и оптимальности в нелинейных стохастических системах при смешанных ограничениях на параметры, функции управления и вектор состояния [10-12], созданы численные методы поиска оптимальных параметров и управлений; исследованы условия управляемости и необходимые условия оптимальности в разрывных стохастических системах с разнообразной структурой возмущений и ограничений, в которых моменты времени разрывов и их характеристики в этих точках отнесены к совокупности оптимизируемых в среднем параметров [11,13]; созданы численные процедуры поиска оптимальных параметров и управлений в системах с переменной структурой; установлены необходимые условия оптимальности в нелинейных стохастических системах со случайной структурой, обусловленной неуправляемым потоком отказов, с ограничениями; для параметрических динамических систем разработаны алгоритмы эффективной несмещенной идентификации и процедуры адаптивной коррекции параметров систем с разнообразной структурой, выявлены условия корректируемости таких систем при наличии функциональных ограничений на вектор состояния и корректируемые параметры [14 -16]. На основе общей теории экстремальных задач для диффузионных марковских процессов определены условия идентифицируемости параметров и функций управления нелинейных стохастических систем с ограничениями в классе настраиваемых моделей, разработаны итерационные алгоритмы идентификации, которые обеспечивают сходимость к необходимым условиям, и процедуры совместного оптимального оценивания и идентификации параметров и функций управления с использованием апостериорных семиинвариантов [9-13].

На кафедре ПМИ выполнены исследования по направлению «Прикладные информационные технологии принятия оптимальных управленческих и проектных решений». Разработанные здесь методы, непосредственно связанные с имитационным моделированием и проектированием вычислительных и управляющих систем авиационной техники, представлены в монографиях [17- 21]. Здесь же под руководством профессоров Ш.И. Га-

лиева и В.И. Заботина выполнялись исследования по баллистическому построению спутниковых систем информационного назначения – связи, навигации и геодезии, созданы методы оптимизации [22-30] устойчивых структур таких космических систем.

Организатором и первым заведующим кафедрой *Кибернетики* с 1972 г. был доктор физико-математических наук, профессор *Владимир Мефодьевич Матросов* [31], [32], [33, с. 7-90]. По приглашению председателя Сибирского отделения (СО) АН СССР академика Г.И. Марчука в 1975 г. В.М. Матросов и ряд его учеников, сотрудников кафедры и последователей в области теоретической механики, процессов управления, прикладной математики и информатики переехали в Иркутск для организации академического института – Иркутского вычислительного центра (ИрВЦ) СО АН СССР. В ноябре 1980 г. этот институт был открыт – ныне Институт динамики систем и теории управления СО РАН имени В.М. Матросова (ИДСТУ СО РАН, <http://idstu.irk.ru/>).

В научной школе В.М. Матросова выполнены фундаментальные исследования метода векторных функций Ляпунова (ВФЛ) в теории устойчивости, динамике нелинейных систем и теории управления, а также применения этого метода при изучении динамических свойств нелинейных процессов в механических системах, физике, энергетике, технике, экономике, экологии и др. [32, 33, с. 7-90], некоторые теоретические результаты авторов статьи в этих аспектах кратко представлены в [34-46].

Программные средства для исследования, проектирования и имитации

За последние четыре десятилетия множество исследовательских усилий было направлено на разработку программных средств для автоматизированного исследования и проектирования СУД с применением компьютерной имитации. Разработки такого программного обеспечения интенсивно проводились в зарубежных странах – программные системы CSSL, MATLAB, CONTROL.LAB, AUTOCON, LAS, MADPAC, CYPROS, SIRENA, ORACLS, MATRIXx, CAMCSD, SIMPLE, SSPAC и др. В СССР и далее в России программное обеспечение для исследования и проектирования СУД разрабатывалось ведущими техническими университетами, отраслевыми НИИ и академическими институтами. Так, на кафедре Кибернетики сразу же после её организации в 1972 г. началась разработка программных средств автоматизации моделирования и проектирования СУД, некоторые результаты авторов опубликованы в [47] и [48]. В ИрВЦ СО АН СССР в конце 1980-х под руководством В.М. Матросова была создана система прикладного программного обеспечения (СППО) при непосредственном участии авторов [49]. Работа этой системы осуществлялась на основе инструментально-технологического комплекса САТУРН [50]. В начале 1990-х в России стали доступны персональные компьютеры и с учётом результатов СППО в ИДСТУ СО РАН была создана программная система ДИНАМИКА, которая работала в среде MS-DOS и поддерживала функции моделирования, синтеза и анализа, имитации СУД, обработку результатов проектирования и оформление документации. Основным языком реализации этой системы был Borland C++ с использованием Turbo Vision. Здесь использовался разработанный язык моделирования MATFOR с созданным авторами транслятором на язык Borland C++, который обеспечивал создание и объединение нелинейных непрерывно-дискретных моделей компонентов в векторно-матричном представлении [51, 52].

В середине 2000-х появилась современная версия MATLAB с транслятором на язык C++, поэтому в Самарском государственном техническом университете (СамГТУ) была создана программная система SIRIUS-S [53], которая предназначена для автоматизированного проектирования систем наведения, навигации и управления движением информационных спутников и космических роботов. Многие годы эта система регулярно поддерживается и применяется как для автоматизированного исследования и проектирования СУД космических аппаратов (КА), так и для поддержки их орбитального

полета с использованием средств компьютерной имитации и анимации [54 -56]. Программная система SIRIUS-S применяется для анализа различных вариантов служебных систем КА и формирования требований для измерительной и исполнительной подсистем бортового комплекса управления. Эта система работает в среде Windows 7/10 и содержит диалоговый монитор, подсистемы моделирования, синтеза и анализа, а также технологические подсистемы анимации пространственного движения КА и документирования. Управление SIRIUS-S осуществляется системой иерархического меню. В результате инженер-конструктор получает эскизный облик СУД проектируемого КА в отношении периодичности, производительности и оперативности информационного обслуживания, точности наведения и стабилизации целевого оборудования (телескопов, антенн) и др. с учётом возмущений, ограничений и других факторов.

В системе SIRIUS-S реализованы модели Земли, внешней среды, конструкции КА, его поступательного и вращательного движений как при объектовой, стерео- и площадной съёмке, так и при поворотных маневрах. Эти модели позволяют рассчитывать все кинематические параметры пространственного движения КА и формировать хт-файлы для подсистемы визуализации.

Документируемые результаты представляются сценами маршрутов съёмки в виде изображений, таблиц и графиков изменения координат и перемещений КА с электромеханическими исполнительными органами в зависимости от времени, значениями характеристик качества связи / наблюдения и критериев оптимальности.

Подсистема моделирования содержит следующие компоненты:

- модель Земли и электронные карты с базами данных объектов земной поверхности;
- модель конструкции КА – геометрические и инерционные характеристики, параметры телескопов, антенн, приводов, измерительных подсистем и др.;
- баллистические модели движения центра масс КА и модели углового движения КА – схемы съёмки поверхности Земли, методы расчета маршрутных движений и поворотных манёвров с граничными условиями общего вида, наблюдения объекта и др.;
- модели среды – методы расчёта освещения наблюдаемых объектов, облачности и др.;
- модели оптико-электронного преобразования – методы расчета скорости движения изображения на ПЗС-матрицах, разрешающей способности и др.;
- модели целевых условий – базы данных наблюдаемых объектов с приоритетами.

Подсистема синтеза и анализа предназначена для выполнения таких функций:

- отображение наблюдаемых объектов, орбиты и трассы полета КА, зоны обзора;
- расчёт и отображение орбитального и углового движений КА при выполнении целевых задач, проверка их реализации при ограниченных ресурсах приводов;
- синтез алгоритмов навигации, законов наведения КА и управления ориентацией;
- анализ переходных процессов в СУД КА при выполнении законов наведения;
- расчёт освещённости местности, видимости пунктов приема информации и др.;
- расчёт скорости движения изображения в заданных точках ПЗС-матрицы в фокальной плоскости телескопа и достигаемого пространственного разрешения на местности;
- анализ вариантов построения системы управления КА по различным критериям;
- анализ работы КА в отношении периодичности, производительности и оперативности.

Подсистема анимации движения КА является технологическим программным средством, она была разработана в среде Delphi 7 с использованием графической библиотеки OpenGL. 3D-модель конструкции КА реализована в известной среде Blender, отображение ее элементов осуществляется также средствами OpenGL с учетом солнеч-

ного освещения. Здесь осуществляется стандартная процедура «наклеивания» текстуры карты Земли на сферическую поверхность, маркировка наблюдаемых объектов с расчетом их географических координат и собственно анимация пространственного движения спутника. В подсистеме визуализации имеется возможность изменять масштаб изображения и перспективу наблюдения при сканирующей съёмке вращающейся Земли. Созданные методы и средства анимация движения информационных спутников, а также их применение для полетной поддержки СУД, представлены в [57-60].

Проектирование и имитация СУД аэрокосмических объектов



Рис. 1. ССО *Сатурн*

Возникновение внеатмосферной астрономии связано с появлением технических возможностей реализации пространственного разрешения и проникающей силы телескопов при наблюдениях из стратосферы и космоса, исследовании всего спектра излучений небесных тел, что недоступно наземным инструментам. На кафедре *Кибернетики* на основе метода ВФЛ и компьютерной имитации проведены динамические исследования электромеханических СУД телескопов, установленных на платформах в механических подвесах [61, 62].

Солнечная стратосферная обсерватория (ССО) *Сатурн* (рис. 1, вертикальный размер ≈ 70 м) создана Казанским оптико-механическим заводом (*КОМЗ*) по заказу *ГАО АН СССР*. Общая масса ССО составляла ≈ 7 т, из них 1,2 т непосредственно телескоп с диаметром главного зеркала 1 м. В начале 1970-х при третьем и четвёртом полётах этой обсерватории в турбулентных потоках верхней атмосферы Земли на высоте 20 км удалось получить уникальную научную информацию о тонкой структуре фотосферы Солнца с разрешением 0,2 угл. сек. [61]. Аналогичные исследования были выполнены кафедрой *Кибернетики* для электромеханической СУД стратосферной обсерватории *Галактика*, предназначенной для изучения звёзд в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Полет этой обсерватории на высоте 30 км выполнен в 1977 г. и доказал возможность наблюдений звезд аэростатными средствами при существенно меньших финансовых затратах в сравнении орбитальными [62].

Научноёмкая работа была выполнена кафедрой *Кибернетики* по проектированию электромеханической СУД орбитальной обсерватории *БСТ-1* на борту орбитальной станции *Салют-6*, рис. 2. Бортовой субмиллиметровый телескоп *БСТ-1*, предназначенный для исследования космического пространства в дальней ИК, СМ и УФ областях спектра, был создан *КОМЗ* по заказу *ИКИ АН СССР*. Диаметр главного зеркала телескопа составлял 1,5 м, упругое крепление массивного криостата существенно усложняло задачу прецизионной угловой стабилизации инструмента. Здесь динамические исследования выполнялись также на основе метода ВФЛ и компьютерной имитации. В 1977-1978 гг. на борту орбитальной станции *Салют-6* с обсерваторией *БСТ-1* работали летчики-космонавты СССР. В результате выполнения программы наблюдений была получена уникальная научная и ценная прикладная информация.



Рис. 2. Орбитальная обсерватория *БСТ-1* на борту орбитальной станции *Салют-6*

Для оценки уровня безопасности *автоматической посадки* российского пассажирского самолета ИЛ 96-300 с учетом ветровых возмущений турбулентной атмосферы, разнообразных радиотехнических помех наземной системы взлета / посадки; случайных параметров бортовых систем самолета, уклона взлётно-посадочной полосы, искривления равносигнальных зон, залегания курсовой зоны, времени выравнивания самолета при его посадке и др. при выполнении совместных НИР кафедры ПМИ с *ЛИИ им. М.М. Громова* был разработан метод экстремальных возмущений, позволяющий определить наиболее вероятные предельные отклонения компонент вектора состояния самолета и параметров приземления авиалайнера. С помощью созданных программных средств при использовании апостериорных семиинвариантов была решена задача оценки уровня безопасности автоматической посадки самолета *ИЛ 96-300* по параметрам приземления в боковом движении (отклонений в положении центра масс от оси взлетной полосы и в углах крена, курса, скольжения) по нормам летной годности [63].



Рис. 3. Российский пассажирский авиалайнер *ИЛ-96-300* в процессе приземления



Рис 4. Беспилотный ЛА *Сокол* в полёте

Разработанные методы идентификации и оптимизации нелинейных стохастических систем успешно использованы при синтезе СУД беспилотного ЛА (рис. 4) в условиях ветровых возмущений в турбулентной атмосфере [64]. Здесь выполнена оптимизация параметров автопилота БПЛА при его развороте в процессе поступательного движения с одновременной идентификацией угловых скоростей.



Рис 5. Автожир A-002 в полёте

В отличие от несущего винта вертолета, ротор автожира (рис. 5) вращается под воздействием набегающего воздушного потока. Созданы математические модели несущего ротора автожира, разработаны программные средства и исследована динамика ротора с упругими лопастями, в том числе с применением компьютерной имитации [65]. Полученные результаты успешно использованы при проектировании лопастей винта экспериментального автожира A-002, который был произведён ОАО *Иркут*, рис. 5.



Рис 6. Спутник связи *Sesat*



Рис 7. Спутники связи *Луч-5А* (a) и *Экспресс-АМ5* (b)

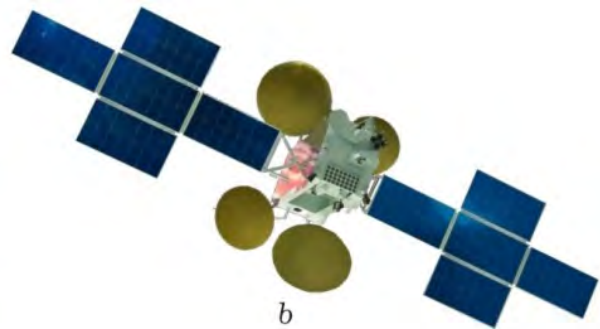


Рис 8. Спутник наблюдения *Ресурс-П*



Рис 9. Схема сканирующей съёмки

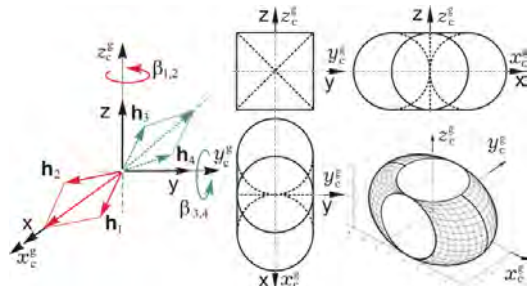


Рис 10. Схема кластера четырёх гироскопов

Авторы выполнили большое число НИР по методам и программным средствам для исследования, проектирования и сопровождения гиросиловых СУД информационных КА, результаты которых использованы предприятиями Роскосмоса – АО *ИСС им. акад. М.Ф. Решетнева* и АО *РКЦ Прогресс*. Геостационарный спутник связи *Sesat*, созданный *ИСС*, представлен на рис. 6. Этот КА более 18 лет успешно

выполнял все плановые задачи связи до исчерпания топливного ресурса его электрореактивной двигательной установки. Крупные российские спутники связи приведены на рис. 7: спутник-ретранслятор *Луч-5А* с двумя антеннами, каждая диаметром 4 м, и геостационарный КА связи *Экспресс-АМ5* с четырьмя крупногабаритными антеннами.

Космический аппарат *Ресурс-П* (рис. 8) предназначен для оптико-электронного наблюдения поверхности Земли с солнечно-синхронной орбиты и передачи данных по радиоканалу в пункты приема информации, <https://www.roscosmos.ru/24984/>. Здесь применяется сканирующая оптико-электронная съёмка заданных участков земной поверхности (рис. 9) в режиме временной задержки и накопления. При такой съёмке к СУД спутника предъявляются высокие требования к точности стабилизации вектора скорости движения изображения по ПЗС-матрице в фокальной плоскости телескопа. Для точного управления ориентацией таких маневрирующих КА применяются силовые гироскопические кластеры с избыточным числом гиродинов, рис. 10. Некоторые результаты авторов в исследованиях СУД конкретных КА представлены в [66-102].

Исследована баллистическая схема группировки из 72 мини-спутников землеобзора при трёх КА в окрестности каждой из 24 плоскостей солнечно-синхронных орбит высотой около 600 км. Имитация площадной съёмки выполнена системой SIRIUS-S для акватории Мраморного моря с окрестностями Босфора и Стамбула, рис. 11.

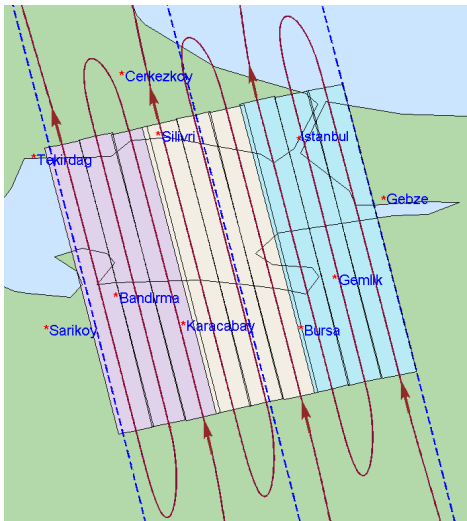


Рис. 11. Съёмка окрестностей Стамбула

Планирование съёмки по три скана каждым КА осуществлялось с обеспечением высокого качества получаемого изображения. На рис. 11 приведена карта с тремя площадками съёмки, каждая с тремя сканирующими маршрутами, которые выполняются тремя КА – левым (КА#1, розовые сканы), центральным (КА#2, жёлтые сканы) и правым (КА#3, синие сканы), на рис. 12 представлен закон наведения КА#3, а ошибки СУД КА #3 и скорости гиродинов при реализации этого закона – на рис. 13 с участками съёмки, выделенными фиолетовым цветом [102].

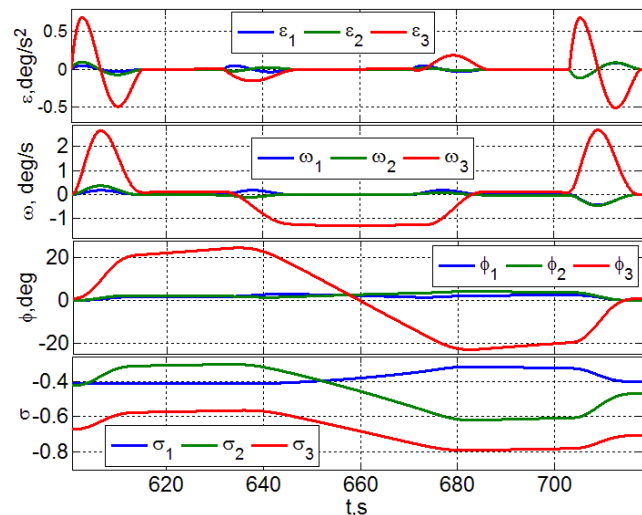


Рис. 12. Закон углового наведения КА#3

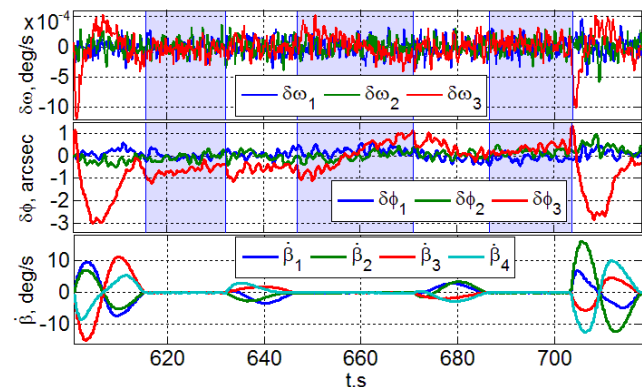


Рис. 13. Ошибки СУД и скорости гиродинов

Перспективные методы проектирования СУД с применением имитации

В последнее десятилетие бурно развиваются методы исследования нелинейных систем с помощью обучаемых нейронных сетей, появились аналитические обзоры по инструментам искусственного интеллекта для проектирования СУД КА [103-105]. На кафедре ПМИ успешно выполняются научные работы в этом направлении [106-110].

Наши многолетние исследования показывают, что *комплексное применение* методов концептуального программирования, многоагентных технологий, логических методов синтеза компьютерных программ, информационных технологий с базами знаний и других инструментов искусственного интеллекта *является определяющим фактором* при создании информационно-вычислительной среды для исследования, проектирования и полётно-сопровождения СУД различных перспективных авиационных и космических объектов с применением компьютерной имитации. В таких средах создание параллельной (распределенной) крупноблочной программы на основе библиотеки заданных модулей (микросервисов) осуществляется автоматически по запросу целевого контента. В этом аспекте уже получены первые теоретические результаты по анализу динамических процессов в логических сетях [111-114].

Заключение

В обзорной статье кратко представлены результаты, полученные на кафедрах *Кибернетики и Прикладной математики и информатики КНИТУ-КАИ* по методам и программным средствам математического и имитационного моделирования для исследования, проектирования и эксплуатационного сопровождения систем управления движением, реализованных в некоторых объектах аэрокосмической техники. Прилагаемый здесь библиографический список позволяет ознакомиться также с разработками авторов, выполненными в течение последних трёх десятилетий по развитию методов и средств проектирования систем управления аэрокосмическими объектами с применением компьютерной имитации и современных информационных технологий.

Литература

1. Казанский авиационный институт / Под ред. Ю. В. Кожевникова. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
2. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
3. **Балухто А.Н., Соколов Б.В.** IWEBSIM – Современная ВЕБ-технология в области комплексного моделирования сложных динамических систем // Труды восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017. – СПб.: НП НОИМ, 2017. – С. 8-17.
4. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Методология оценивания качества моделей и эффективности комплексного моделирования сложных объектов // Труды девятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2019. – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2019. – С. 9-19.
5. **Девятков В.В.** Эволюция имитационного моделирования – от «искусства и науки» к массовому применению // Труды восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017. – СПб.: НП НОИМ, 2017. – С. 27-36.
6. **Девятков Т.В., Минниханов Р.Р., Шестюк В.М.** Практическое применение имитационного моделирования // Труды десятой всероссийской научно-практической

- конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2021. – СПб.: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2021. – С. 11-22.
7. **Кожевников Ю.В.** Статистическая оптимизация летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 175 с.
 8. **Куршев Н.В., Кожевников Ю.В.** Оптимальные задачи динамики полета. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2010. – 326 с.
 9. **Боднер В.А., Роднищев Н.Е. Юриков Е.П.** Оптимизация терминальных стохастических систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 210 с.
 10. **Роднищев Н.Е.** Оптимизация управления нелинейных стохастических систем с ограничениями // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 2. – С. 87-101.
 11. **Роднищев Н.Е.** Приближенный метод поиска оптимального управления нелинейных стохастических систем с ограничениями // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 3. – С. 63-71.
 12. **Роднищев Н.Е.** Необходимые условия оптимальности управления разрывных нелинейных стохастических систем с ограничениями // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2001, № 6. С.38-49.
 13. **Роднищев Н.Е., Хайруллин А.Х.** Необходимые условия оптимальности стохастических систем с неуправляемым потоком отказов и ограничениями типа равенств и неравенств // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 11. – С. 119-135.
 14. **Новикова С.В.** Способ определения оценки вектора неопределенных параметров применительно к задаче адаптивной коррекции параметрических систем // Вестник КГТУ. – 1996. – № 4. – С. 67 – 70.
 15. **Кожевников Ю.В., Новикова С.В.** Алгоритм автоматизированной доводки многомерных параметрических систем регулирования ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2002. – № 2. – С. 61-65.
 16. **Новикова С.В., Роднищев Н.Е.** Основы идентификации динамических стохастических систем. – Казань: РИЦ «Школа», 2009. – 192 с.
 17. **Тутубалин П.И., Моисеев В.С.** Вероятностные модели обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем обработки информации и управления. – Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 151 с.
 18. **Зиновьев П.А., Мейко А.В., Моисеев В.С.** Инженерные методы расчета функциональной надежности и живучести корпоративных информационных систем. – Казань: Отечество, 2009. – 256 с.
 19. **Дятчин В.В., Козар А.Н., Моисеев В.С.** Информационная безопасность АСУ специального назначения. – Казань: Отечество, 2004. – 382 с.
 20. **Моисеев В.С., Гущина Д.С., Моисеев Г.В.** Основы теории создания и применения информационных беспилотных авиационных комплексов. – Казань: РИЦ «Школа», 2010. – 189 с.
 21. **Моисеев В.С., Матвеев И.В., Нестерова Л.Е.** Модели и методы создания перспективных учебно-тренировочных вертолетов. – Казань: РИЦ «Школа», 2011. – 160 с.
 22. **Галиев Ш.И., Заботин В.И.** Системы из минимального числа спутников для многократного обзора Земли // Исследование Земли из космоса. – 1990. – №5. – С. 102-108.
 23. **Галиев Ш.И.** Динамические оценки числа спутников для многократного обзора Земли // Космические исследования. – 1996. – Том 34, № 5. – С. 500-504.
 24. **Галиев Ш.И., Кузьмин А.В.** Некоторые свойства математических моделей структур спутниковых систем многократного наблюдения Земли // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1997. – № 4. – С. 25-30.

25. **Галиев Ш.И., Заботин В.И., Кузьмин А.В.** Методы решения задачи оптимального управления некоторыми параметрами спутниковых созвездий кратного покрытия Земли // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1999. – №4. – С. 24-28.
26. **Заботин В.И.** Модели спутниковых систем глобальной связи на эллиптических орбитах // Исследование Земли из космоса. – 1994. – №5. – С. 70-77.
27. **Заботин В.И., Косолапов А.В.** Анализ модели спутниковой системы глобальной связи // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1997. – №4. – С.36-41
28. **Заботин В.И.** Достаточные условия существования спутниковых систем многоканальной глобальной связи. // Космические исследования. – 2000. – Т. 38, №1. – С. 97-101.
29. **Заботин В.И., Дуллиев А.М.** Анализ баллистических структур спутниковых систем многоканальной связи на прецессирующих эллиптических орбитах // Космические исследования. – 2003. – Т. 41, №5. – С. 1-6.
30. **Дуллиев А.М., Заботин В.И.** Алгоритм выбора параметров спутниковых систем многоканальной связи на прецессирующих эллиптических орбитах // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2004. – №1. – С. 13-16.
31. **Матросов В.М.** Метод векторных функций Ляпунова: анализ динамических свойств нелинейных систем. – М.: Физматлит, 2001. – 381 с.
32. **Degtyarev G., Druzhynin E., Kozlov R., Kuzmina L., Sirazetdinov T., Somov Ye., Vassilyev S., Zemlyakov A.** Academician V.M. Matrosov: Research and teaching on stability, nonlinear dynamics and control in aerospace systems. IFAC-PapersOnLine. – 2012. – vol. 45, no. 11. – P. 7-12.
33. Проблемы устойчивости и управления / Сб. научных статей, посвящённых 80-летию академика Владимира Мефодьевича Матросова. – М.: Физматлит, 2013. – 416 с.
34. **Вахонина Г.С., Земляков А.С., Матросов В.М.** О способах построения квадратичной вектор-функции Ляпунова для нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. – 1973. – № 2. – С. 5-16.
35. **Земляков А.С., Матросов В.М.** О способах построения вектор-функции Ляпунова для нелинейных систем // Оптимальное и адаптивное управление. – Саратов: СГУ, 1977. – С.202 -213.
36. **Данилов А.М., Опарин Г.А., Стрежнев В.А.** К синтезу нелинейных слабодемпфированных колебательных управляемых систем // Вычислительные и управляющие системы летательных аппаратов. – Казань: КАИ, 1978. – С. 24-29.
37. **Земляков А.С., Сабитов Р.А., Сомов Е.И.** Автоматизированный синтез иерархических систем управления движением с применением векторных функций Ляпунова // Теория устойчивости и ее приложения. – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 264-271.
38. **Земляков А.С.** Построение ВФЛ для сложных систем с применением теории графов // Векторные функции Ляпунова и их применение. – Новосибирск: Наука, 1980. – С. 257-269.
39. **Сомов Е.И.** К синтезу систем угловой стабилизации летательных аппаратов // Вычислительные и управляющие системы летательных аппаратов. – Казань: КАИ, 1981. – С. 13-22.
40. **Сомов Е.И.** Синтез нелинейного закона управления пространственным маневром летательного аппарата // Оптимизация процессов в авиационной технике. – Казань: КАИ, 1982. – С. 66-70.
41. **Сомов Е.И.** К синтезу нелинейных управляемых систем с применением векторных функций Ляпунова // Дифференциальные уравнения и численные методы. – Новосибирск: Наука, 1986. – С.72-89.

42. **Сомов Е.И.** О существовании периодических движений релейной управляемой системы с гистерезисом и их устойчивости // *Функции Ляпунова и их применение.* – Новосибирск: Наука, 1987. – С.158-169.
43. **Абдуллин Р.З., Анапольский Л.Ю., Воронов А.А., Земляков А.С., Козлов Р.И., Маликов А.И., Матросов В.М.** Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости. – М.: Наука, 1987. – 312 с.
44. **Сомов Е.И., Бондаренко Е.А., Капитонова Н.Б.** Синтез гиросиловой системы пространственной стабилизации на основе векторных функций Ляпунова и параметрической оптимизации // *Проблемы аналитической механики, устойчивости и управления движением.* – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 257-264.
45. **Сомов Е.И.** Построение векторных функций Ляпунова при синтезе линейных управляемых систем с неполным измерением состояния // *Изв. РАН. Теория и системы управления.* – 1997. – № 3. – С. 73-86.
46. **Матросов В.М., Решетнев М.Ф., Раевский В.А., Сомов Е.И.** Нелинейные методы динамического синтеза отказоустойчивых систем управления ориентацией космических аппаратов // *Изв. РАН. Теория и системы управления.* – 1997. – № 6. – С. 120-130.
47. **Опарин Г.А.** Комплекс программ для параметрического синтеза прецизионных электромеханических систем // *Теория устойчивости и ее приложения.* – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 284-292.
48. **Сомов Е.И., Кузьмин Н.В.** Многоуровневое моделирование системы угловой стабилизации летательного аппарата // *Вычислительные и управляющие системы летательных аппаратов.* – Казань: КАИ, 1983. – С. 33-35.
49. **Матросов В.М., Козлов Р.И., Сомов Е.И., Бутырин С.А., Бурносов Е.А., Бондаренко Е.А., Журавлев А.Е., Опарин Г.А., Симонов С.А.** Методы и программное обеспечение для автоматизированного проектирования систем управления ориентацией космических аппаратов // *Динамика и управление космическими объектами.* – Новосибирск: Наука, 1992. – С. 163-179.
50. **Опарин Г.А.** САТУРН – метасистема для построения пакетов прикладных программ // *Пакеты прикладных программ. Методы и разработки.* – Новосибирск: Наука, 1982. – С. 130-160.
51. **Бутырин С.А., Герасин С.А., Герасин И.А., Сомов Е.И.** Технология создания моделей и задач в системе ДИНАМИКА // *Программные продукты и системы.* – 1999. – № 1. – С. 38-41.
52. **Сомов Е.И., Бутырин С.А.** и др. Программное средство ДИНАМИКА в имитации гиросиловых отказоустойчивых систем управления ориентацией космических аппаратов // *Гироскопия и навигация.* – 1999. – № 2(25) . – С. 92-107.
53. **Somov Ye.I., Butyrin S.A., Somov S.Ye., Somova T.Ye.** SIRIUS-S software environment for computer-aided designing of attitude control systems for small information satellites // *Proc. 20th Saint Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems.* – Saint Petersburg. 2013. – P. 325-328.
54. **Somov S, Butyrin S., Somova T.** Simulation technologies for long-term target planning and in-flight management of the spacecraft control systems // *IFAC-PapersOnLine.* – 2013. – vol. 46, no. 9. – P. 1250-1255.
55. **Раевский В.А., Титов Г.П., Сомов Е.И., Бутырин С.А.** Автоматизация динамических исследований и проектирования систем управления движением космических аппаратов: от СПО СИРИУС к MATLAB // *Аэрокосмическое приборостроение.* – 2003. – №4. – С. 38-43.

56. **Somov Ye., Butyrin S., Oparin G., Bogdanova V.** Methods and software for computer-aided design of the spacecraft guidance, navigation and control systems // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2016. – vol. 7, no. 4. – P. 613-624.
57. **Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомова Т.Е., Сомов С.Е.** Оптимизация режимов сканирующей оптико-электронной съемки и 3D-анимация движения маневрирующего спутника землеобзора // *Техническое зрение*. – 2013. – № 1. – С. 15-22.
58. **Сомов Е.И., Гаджиев Ч.М., Суханов В.М., Сомова Т.Е.** Имитация и анимация движения мини-спутника землеобзора // *Труды седьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015*. – Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С.344-350.
59. **Сомова Т.Е.** Применение имитации и анимации для полётной поддержки систем управления информационных спутников // *Проблемы управления*. – 2014. – № 5. – С. 70-78.
60. **Somova T.** Vector spline guidance laws and in-flight support of attitude control system for a land-survey satellite // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2016. – vol. 7, no. 4. – P. 587-597.
61. **Данилов А.М., Дулькин Л.З., Земляков А.С., Матросов В.М., Стрежнев В.А.** Динамика стратосферной обсерватории // *Управление в пространстве*. – Том 1. – М.: Наука, 1975. – С. 208-227.
62. **Данилов А.М., Дулькин Л.З., Земляков А.С., Матросов В.М., Стрежнев В.А.** Динамика и управление внеатмосферными астрономическими обсерваториями // *Управление в пространстве*. – Том 1. – М.: Наука, 1976. – С. 153-171.
63. **Rodnishchev N., Somova T.** Identification and stochastic checking a control safety at a landing of aerospace vehicles // *Proc. 2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. – Turin. 2019. – P. 506-510.
64. **Somov Ye., Rodnishchev N., Somova T.** Identification and stochastic optimizing the UAV motion control in turbulent atmosphere // *International Journal of Aviation Science and Technology*. – 2021. – vol. 2, no. 2. – P. 57-63.
65. **Somov Ye.I., Polyntsev O.Ye.** Nonlinear dynamics and control of a wind-milling gyroscope rotor // *Proc. IEEE / IUTAM International Conference “Physics and Control”*. – vol. 1. – Saint-Petersburg, 2003. – P. 152-157.
66. **Сомов Е.И.** Динамика многократной цифровой системы пространственной гиросиловой стабилизации упругого космического аппарата // *Динамика и управление космическими объектами*. – Новосибирск: Наука, 1992. – С. 47-76.
67. **Somov Ye.I., Butyrin S.A. et al.** Ultra-precision attitude control of a large low-orbital space telescope // *Control Engineering Practice*. – 1999. – vol. 7, no. 7. – P. 1127-1142.
68. **Bartenev V.A., Malyshev V.A., Rayevsky V.A., Titov G.P., Somov Ye.I.** Attitude and orbit control systems of Russian communication, geodetic and navigation spacecraft // *Space Technology*. – 1999. – vol. 19, no. 3&4. – P. 135-147.
69. **Kozlov D.I., Anshakov G.P., Antonov Yu.G., Makarov V.P., Somov Ye.I.** Precise flight control systems of Russian remote sensing spacecraft // *Space Technology*. – 1999. – vol. 19, no. 3&4. – P. 149-163.
70. **Somov Ye., Rayevsky V., Titov G.** Fault-tolerant precision attitude control of communication and navigation spacecraft // *Space Technology*. – 1999. – vol. 19, no. 3&4. – P. 165-172.
71. **Сомов Е.И.** Робастная стабилизация упругих космических аппаратов при неполном дискретном измерении и запаздывании в управлении // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. – 2001. – № 2. – С. 124–143.

72. **Somov Ye.I., Butyrin S.A., Anshakov G.P. et al.** Dynamics and flight support of a vehicle IKAR control system at orbiting Globalstar satellites // *Control Engineering Practice*. – 2003. – vol. 11, no. 5. – P. 585-597.
73. **Somov Ye.I., Rayevsky V.A., Matrosov V.M., Anshakov G.P.** Nonlinear dynamics of spacecraft fault-tolerant control systems // *Нелинейная теория управления и ее приложения*. – М.: Физматлит, 2003. – С. 38-65.
74. **Сомов Е.И.** Аналитический синтез программного гиросилового управления свободнолетающим космическим роботом // *Проблемы управления*. – 2006. – № 6. – С. 72-78.
75. **Сомов Е.И.** Робастное цифровое гиросиловое управление упругим космическим аппаратом при неполном измерении // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2006. – Т. 8, № 3. – С. 123-132.
76. **Сомов Е.И., Макаров В.П.** Диагностика состояния и реконфигурация управления в механических системах с избыточными силовыми гироскопическими связями // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2006. – Т. 8, № 3. – С. 133-140.
77. **Сомов Е.И., Бутырин С.А., Бутко А.В.** Программная среда для формирования функционального облика систем гиросилового наведения космических телескопов // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 790-798.
78. **Сомов Е.И., Бутырин С.А.** Технология обработки сопровождающей измерительной информации для высокоточной координатной привязки космических снимков // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2009. – Т. 11, № 5. – С. 156-163.
79. **Аншаков Г.П., Сомов Е.И., Бутырин С.А.** Оптимизация поворотных маневров и синтез законов гиросилового наведения космических аппаратов землеобзора // *Вестник СГАУ им. С.П. Королева*. – 2010. – № 2. – С. 39-49.
80. **Сомов Е.И., Бутырин С.А.** Полетная идентификация и силовая гироскопическая стабилизация слабо демпированной конструкции крупногабаритного спутника // *Проблемы управления*. – 2013. – № 2. – С. 51-57.
81. **Сомов Е.И.** Анализ сингулярных состояний и синтез явных законов настройки гироскопических кратных схем // *Гироскопия и навигация*. – 2013. – № 1(80). – С. 134-148.
82. **Сомов Е.И.** Цифровое и широтно-импульсное управление ориентацией спутника землеобзора // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2015. – Т. 17, № 6(3). – С. 707-712.
83. **Somov Ye.** Guidance, navigation and control of information satellites: Methods for modeling, synthesis and nonlinear analysis // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2016. – vol. 7, no. 2. – P. 223-248.
84. **Сомов Е.И., Бутырин С.А.** Прецизионная стабилизация скорости движения изображения в орбитальном телескопе землеобзора // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2016. – Т. 18, № 4(6). – С. 1128-1137.
85. **Сомов Е.И., Бутырин С.А.** Наведение и гиросиловое управление ориентацией спутника землеобзора при сканирующей стереоскопической съемке // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2017. – Т. 19, № 4. – С. 70-80.
86. **Somov Ye., Starinova O., Butyrin S.** Pulse-width control of electro-reaction engines for a station-keeping of a land-survey satellite on sun-synchronous orbit // *Procedia Engineering*. – 2017. – vol. 185. – P. 267-274.
87. **Somov S., Fateev A., Vassilyev A.** Attitude guidance and control of the navigation satellites at a passage of the singular orbital sites // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2017. – vol. 8, no. 1. – P. 43-52.
88. **Somov Ye., Butyrin S., Somov S.** Digital signal processing in attitude determination system for the space robots and land-survey satellites // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2017. – vol. 8, no. 4. – P. 373-382.

89. **Somov Ye., Butyrin S., Somova T.** Verification of attitude control system for a land-survey satellite by analysis of an image motion in onboard telescope // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2017. – vol. 8, no. 4. – P. 511-520.
90. **Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Somova T.** Control of robot-manipulator during its preparation and capture of a passive satellite // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2019. – vol. 10, no. 3. – P. 421-432.
91. **Rodnishchev N., Somov S., Somova T.** Stochastic optimizing a fault tolerant control of aerospace vehicles // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2019. – vol. 10, no. 3. – P. 501-511.
92. **Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Somova T.** Autonomous attitude control of the information satellites and space robots in initial orientation modes // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2020. – vol. 11, no. 4. – P. 981-992.
93. **Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Somova T.** Nonlinear digital and pulse-width control at approaching a space robot with a geostationary satellite // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2020. – vol. 11, no. 4. – P. 993-1001.
94. **Somov Ye., Butyrin S., Somova T., Somov S.** Health checking autonomous attitude control system of Earth-observing miniature satellite in initial orientation modes // *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. – 2021. – vol. 2, no.2. – P. 51-58.
95. **Somov Ye., Butyrin S., Somov S.** Dynamics of an autonomous spacecraft control system at initial transition to a tracking mode // *Cybern. Phys.* – 2021. – vol. 10, no. 3. – P. 185-190.
96. **Бутырин С.А., Сомов Е.И., Сомов С.Е., Сомова Т.Е.** Управление роботом-манипулятором при смене топливных баков двигательной установки геостационарного спутника // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 96-104.
97. **Somov Ye., Butyrin S., Somova T.** A space robot control at approaching and inspecting a geostationary satellite state // *Cybernetics and Physics*. – 2022. – vol. 11, no. 1. – P. 30-36.
98. **Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Somova T.** Attitude and orbit control of a space robot at launching, rendezvous and checking the geostationary satellite state // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*. – 2022. – vol. 13, no. 1. – P. 11-24.
99. **Somov Ye., Butyrin S., Somov S.** Attitude and orbit control of a space robot at additional launching and approaching a geostationary satellite // *Current Chinese Science*. – 2022. – vol. 2, no. 3. – P. 173-182.
100. **Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е.** Динамика причаливания и стыковки космического робота-манипулятора с геостационарным спутником // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 155-160.
101. **Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е.** Робастное управление космическим роботом-манипулятором при обслуживании геостационарного спутника связи // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 161-167.
102. **Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е.** Согласованное наведение и управление мини-спутниками в низкоорбитальных группировках космического землеобзора // *Изв. Самар. научн. центра РАН*. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 88-96.
103. **Izzo D., Martens M., Pan B.** A survey on artificial intelligence trends in spacecraft guidance dynamics and control // *Astrodynamics*. – 2019. – vol 3, no. 4. – P. 287-299.
104. **Gaudet B., Linares R., Furfaro R.** Adaptive guidance and integrated navigation with reinforcement meta-learning // *Acta Astronautica*. – 2020. – vol. 169. – P. 180-190.
105. **T. Habib.** Artificial intelligence for spacecraft guidance, navigation, and control: a state-of-the-art / *Aerospace Systems*. – 2022. – vol. 5. – P. 503-521.

106. **Емалетдинова Л.Ю., Матвеев И.В., Кабирова А.Н.** Метод построения нейрорегулятора для системы автоматического одномерного управления техническим объектом // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2015. – №2. – С.87-92.
107. **Емалетдинова Л.Ю., Матвеев И.В., Кабирова А.Н.** Метод построения нейрорегулятора для системы автоматического управления боковым движением беспилотного летательного аппарата // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2017. – №3. – С.44-51.
108. **Емалетдинова Л.Ю., Матвеев И.В., Кабирова, А.Н.** Методы построения нейросетевых моделей регуляторов для управления динамическим объектом с гладким монотонным поведением // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2019. – №2. – С.40-48.
109. **Новикова С.В.** Структурная оптимизация нейросетевой модели мониторинга ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2016. – № 2. – С. 101-107.
110. **Novikova S.V., Tunakova Y.A., Shagidullin A.R., Kremleva E.S.** Multi-level hybrid recommender decision support system with verbal output // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – vol. 1703, no. 012012. – P. 1-8.
111. **Oparin G., Bogdanova V., Pashinin A.** Qualitative analysis of autonomous synchronous binary dynamic systems // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2019. – vol. 10, no. 3. – P. 407-419.
112. **Oparin G., Bogdanova V., Gorsky S., Pashinin A.** The synthesis of stabilizing feedback for binary dynamic systems: A logical approach // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2019. – vol. 10, no. 3. – P. 479-486.
113. **Oparin G., Bogdanova V., Pashinin A.** A logical approach to qualitative analysis of controlled nonlinear binary dynamic systems // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2022. – vol. 13, no. 1. – P. 1-9.
114. **Oparin G., Bogdanova V., Pashinin A.** Implicit Boolean networks and their application to combinatorial problems // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2022. – vol. 13, no. 1. – P. 25-35.