

Маловысотный полет вертолета и проблемы его автоматизации¹

Аннотация. В работе анализируются пути автоматизации маловысотного полета (МВП) вертолета. Предлагаются методы и результаты определения основных характеристик МВП вертолета на начальной стадии проектирования, исходя из энергетических и конструктивных ограничений вертолета.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, нейронные сети, автоматизация полета вертолета.

Введение

Развитие энергетических и маневренных возможностей современных вертолетов, существенное увеличение за последние годы роли их как в гражданском применении, так и в военном привели к необходимости разрабатывать системы автоматизированного управления вертолетами. Сложность, присущая проектированию систем управления полетом вертолетов из-за необходимости учета многочисленных конструктивных параметров и сложных ограничений, требует использования методов и моделей искусственного интеллекта (ИИ) для решения поставленных задач.

Особенно важно использование современных методов ИИ там, где автоматизация полета играет определяющую роль в успешном выполнении задания, и, тем более, в беспилотных вертолетах, развитие которых в последнее время идет все ускоряющимися темпами (примеры из Shephard's Unmanned Vechicles HANDBOOK 2000, Табл. 1).

1. Методы автоматизации полета вертолета

Наибольшим препятствием для решения задач моделирования динамики современных маневренных вертолетов служит большая, по сравнению с самолетом, сложность математи-

ческой модели объекта управления. Однако, несмотря на это, с увеличением роли вертолетов как летательных аппаратов, с ростом их энергетических и маневренных возможностей, большое внимание ученых и инженеров было направлено на разработку методов автоматизации, как отдельных режимов полета вертолета, так и полета в целом.

Рассмотрим основные направления приложения искусственного интеллекта в решении задач, связанных с автоматизацией полета вертолета:

1. Работы в направлении более подробного изучения динамики полета вертолета и его системы управления [1-3];
2. Планирование маршрута полета [4, 5];
3. Формирование траектории маловысотного полета [6-8];
4. Облет препятствий [9-11];
5. Автоматизация маловысотного полета в целом [12-14].

Отдельные работы посвящены решению проблемных вопросов, связанных с ограничениями, которых намного больше, чем у самолетов. Основные ограничения при полете вертолетов, которые существенно влияют на безопасность полета:

- максимальная воздушная скорость;
- боковая скорость и скорость полета назад;
- диаграмма $H-V$ или «опасная зона»;
- угловое положение (крен, тангаж);

¹ Работа выполнена в рамках проектов РФФИ № 09-07-000043-а «Интеллектуальная система поддержки автоматизированного маловысотного полета вертолета» и № 09-07-000439-а «Исследование методов синтеза управления и обратной связи в интеллектуальных динамических системах»

Табл.1. Основные характеристики беспилотных вертолетов

Вертолет	Страна	Двигатель	Вес мин. кг	Вес макс. кг	Вес пол. кг
CL – 327	Канада	WTS-117-5	150	350	100
HELI 25	Израиль	2-х такт, бенз, 75см. ³	22	25	
HELIOT	Франция	Hirth F30A26 AK, 105 л.с.	230	450	120
RMAX	Япония	2-х такт. 246 см ³	64	94	30
VIGILANT F5000	Франция	FHI 83.5л.с. 2-х такт. 679 см ³	205	325	130
VIGILANTE	США	Hirth F-30 110 л.с.	100 фт	-	MTOW 1.1 фт
B1-1800-35	Германия	2-х такт., 6.5 л.с.	26 фт.	-	18 фт.
CYPHER	США	AR801 поршневой 50 л.с.	79.5	136	20.5
DP-4	США	QA200 2-х такт. 200см ³	-	64	29
NITRO HAWK	Великобритания	3-4 brake horsepower	4.2	10	-
RMAX II	Япония	246 см ³	69		25

- располагаемый крутящий момент;
- обороты двигателя и обороты несущего винта;
- перегрузки;
- маховое движение лопастей несущего винта;
- уровень вибраций;
- нагрузки в конструкции.

Все повышающиеся требования к летным характеристикам и к безопасности маневренных вертолетов диктуют необходимость автоматического предотвращения выхода за ограничения, т.к. выявлено, что 40% нагрузки на летчика в штатном режиме связано с ограничениями. Предотвратить выход за ограничения можно, используя нейросеть в составе вертолетной системы управления, в том числе и для предупреждения о надвигающемся превышении ограничений.

Модели превышения ограничений на основе нечеткой логики были разработаны для вертолета UH-1H, и в частности, ограничений по диаграмме “H-V”, максимальной воздушной скорости, располагаемого крутящего момента, углового положения, оборотов двигателя и оборотов несущего винта, минимальной перегрузки, боковой скорости. Постоянное измерение превышения пределов обеспечивают алгоритмы нечеткой логики. Результаты испытаний на нелинейной модели динамики полета вертолета UH-1H показывают, что этот достаточно гибкий подход открывает большие возможности для его применения на борту вертолета.

Теме автоматизации полета вертолета (как беспилотного, так и пилотируемого), в том числе и с помощью современных методов посвящены многие исследования. При этом од-

ним из наиболее распространенных подходов к решению поставленной задачи является массовое внедрение нейрокомпьютерных технологий, методов и моделей [15-17].

Основная проблема заключается в том, что область полетных режимов современных вертолетов имеет комплексные ограничения. Для решения указанной проблемы в статье [16] предлагается ввод самообучающихся нейроконтроллеров в алгоритм управления автопилота. Первое преимущество такого подхода состоит в исключении предварительных вычислений, хранения и интерполяции между большим количеством коэффициентов обратной связи типичной для системы управления полетом. Другое преимущество – способность компенсировать нелинейности и неопределенности модели. Кроме того, самообучающаяся нейрo-архитектура, переменная по времени, будет избавлять от требующего времени пересчета коэффициентов, который следует после любого введения модификации летательного аппарата или его системы управления в процессе эксплуатации.

В целом можно утверждать, что одной из причин, по которой нейроуправлению уделяется так много внимания, является тот факт, что традиционные методы в основном базируются на теории линейных систем, в то время как в действительности модель объекта управления (вертолета) нелинейна и имеет такую динамику, которую практически невозможно смоделировать абсолютно точно.

Существуют и другие подходы к решению задачи автоматизации полета вертолета. Так в работе [18] для синтеза управления предлагает-

ся использовать методы теории дифференциальных игр. Движение летательного аппарата делится на две составляющие – продольное движение и боковое. Соответственно, первый игрок выбирает управление так, чтобы оптимизировать траекторию движения по «своему» направлению, интерес второго игрока совершенно противоположный.

2. Особенности МВП

Основной особенностью маловысотного полета (МВП; в англоязычной литературе – NOE, Nap Of The Earth flight) является то, что весь винтокрылый летательный аппарат, включая несущий винт, находится ниже вершук деревьев везде, где это возможно. Соответственно, от вертолета требуется выполнение максимально четких маневров. Следствием данного факта является чрезвычайно высокая нагрузка на летчика в режиме МВП. Это особенно верно для одноместного летательного аппарата, такого как, например, Ка-50. Таким образом, вопрос автоматизации режима МВП является одним из ключевых при разработке современных бортовых систем управления летательными винтокрылыми аппаратами (вертолетами).

В общем случае полет на малой высоте обычно делят на «Слалом» (основной обход препятствий осуществляется маневрированием в горизонтальной плоскости) и «Дельфин» - основной обход препятствий осуществляется маневрами в вертикальной плоскости (Рис. 1).

При осуществлении маловысотного полета большое значение имеет заданная высота полета над препятствиями. Как видно на Рис. 1, заданная высота полета может позволить не учитывать рельеф местности, т.к. вертолет летит выше всех препятствий (траектория 1), в этом случае полет ничем не отличается от обычного горизонтального полета. В случае облета отдельных объектов выбор типа маневра диктуется складками местности, однако наиболее успешным будет маневр, сочетающий оба вида маневра. Таким образом, наибольшую скрытность обеспечивает режим, сочетающий «дельфин» и «слалом», который проводится с изменением курса и скорости и выполняется настолько близко к земле, насколько позволяют растительность, препятствия и условия освещения.

Для решения задачи автоматизации МВП предлагается моделировать этот режим полета тремя уровнями точности:

- прокладка маршрута на значительном отдалении (дальние задачи);
- формирование траекторий на средней дистанции для укрытия в складках местности;
- облет препятствий.

Первые две задачи выполняются на основе имеющейся цифровой карты местности, в то время как определение препятствий и способа уклонения от них определяются в реальном масштабе времени на основе данных бортовых датчиков. Приблизительно определенный на дальнем расстоянии маршрут уточняется в процессе движения оптимизатором траекторий на средних расстояниях, причем этот оптимизатор определяет номинальную траекторию на небольшом расстоянии впереди по полету аппарата. Ближнее наведение с целью обхода препятствий принимает информацию от подсистемы обнаружения препятствий, которая собирает в реальном масштабе времени информацию о препятствиях на пути и об их высоте над поверхностью земли в целях уточнения траектории полета вблизи номинальной траектории, определенной на средней дистанции.

Ниже, при рассмотрении вопросов автоматизации полета будут определены условия, определяющие выбор того или иного типа маневра для дальних задач МВП.



Рис.1. Основные типы маневров при осуществлении маловысотного полета

(2) – дельфин

(3) – слалом

3. Задание маршрута на большом удалении и оценка возможностей вертолета

Для выработки полетного задания на большом удалении во внимание принимаются наиболее общая информация относительно опасных зон и ресурсы летательного аппарата. Необходимо как планирование задания на случай автономного полета, так и возможность изменения задания в полете из-за изменения условий и ресурсов вертолета. Такое оперативное изменение задания должно быть выполнено в относительно короткое время, например в долю минуты, так чтобы пилот не был вынужден бесцельно кружить в ожидании нового задания. Информация о рельефе для такого высокого уровня планирования задания необходима для достаточно широкой области.

При предварительном планировании маловысотного полета большую роль играют энергетические возможности вертолета, которые необходимо оценить предварительно по приближенным формулам. Например, оценить располагаемую перегрузку при облете наклонных поверхностей рельефа можно приближенно как:

$$\Delta n_y = \frac{V^2 \Theta^2}{2g(dH - V\Theta\tau)},$$

где: Δn_y - вертикальной перегрузка;

V - скорость полета (м/с);

Θ - угол наклона рельефа;

g - ускорение свободного падения (м/с²);

dH - так называемая «просадка» вертолета, т.е. величина максимального отдаления траектории полета от идеальной, превышающей рельеф на постоянную величину (м);

τ - время запаздывания летательного аппарата (вертолета) от момента начала маневра (с).

На Рис. 2 показан пример определения dH , как отклонения вертолета от теоретической траектории, проведенной на исходной высоте полета, проведенной эквидистантно профилю местности, над которой пролетает вертолет.

На том же Рис. 2 показано изменение параметров полета при обходе препятствия с углом наклона рельефа в 30 град., посчитанное на полной модели движения вертолета со всеми его нелинейностями и запаздыванием. Отставание траектории от «идеальной» объясняется запаздыванием вертолета как исполнительного звена. Причем, как видно далее, отставание от

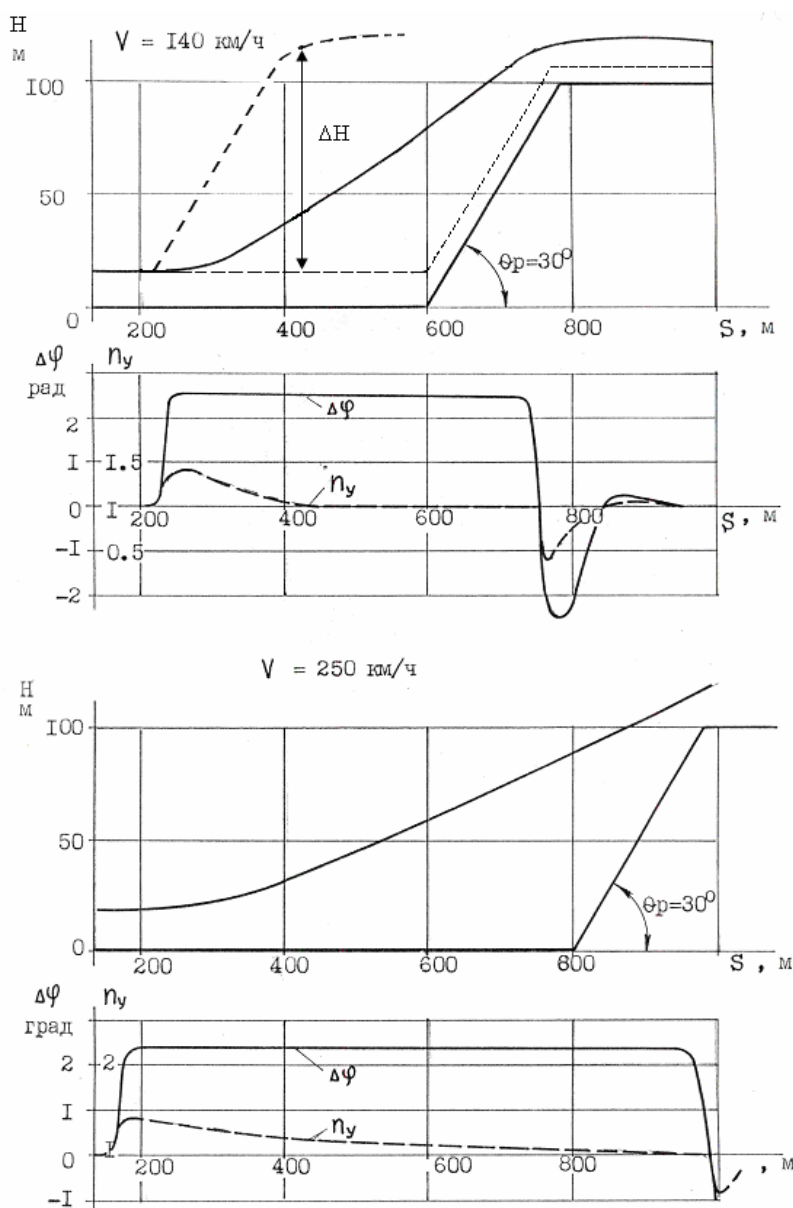


Рис.2.

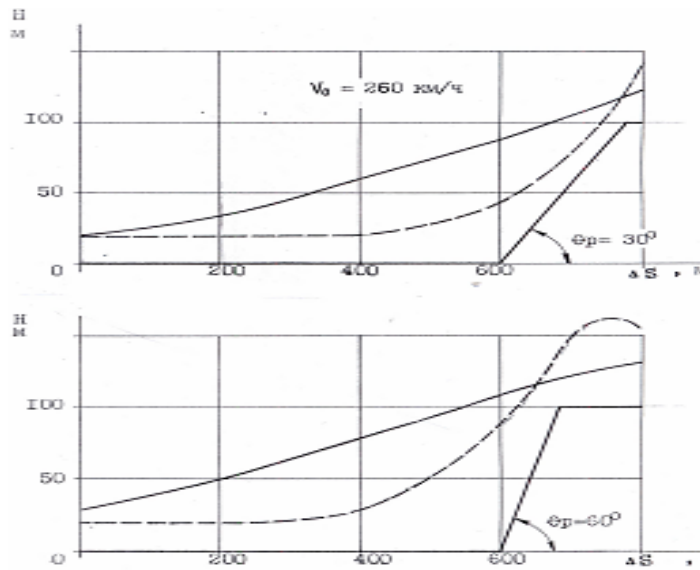


Рис. 3.

«идеальной» траектории тем более, чем круче наклон рельефа и чем больше скорость полета (Рис. 2 - скорость полета 140 км/ч и скорость полета 250 км/ч). При этом очевидно, что дальность начала подъема вертолета (начала

искривления траектории) существенно увеличивается с ростом скорости.

Как видно из Рис. 2 и Рис.3, чем начало искривления траектории позднее, тем больше потребуется запаса перегрузки на облет рельефа (круче траектория).

Ниже представлены зависимости располагаемого запаса вертикальной перегрузки Δn_y при заданной допустимой величине «просадки» dH вертолета при облете препятствия с заданным углом наклона рельефа Θ (град.) на скоростях полета V ($V=150$ км/час - Рис. 4, $V=200$ км/час - Рис. 5 и $V=250$ км/час - Рис. 6).

Можно также рассчитать приближенно величину дальности, с которой необходимо начинать искривление траектории при заданных запасах перегрузки Δn_y , наклоне рельефа Θ и скорости полета V .

$$D = \frac{V^2 \Theta}{2g \Delta n_y};$$

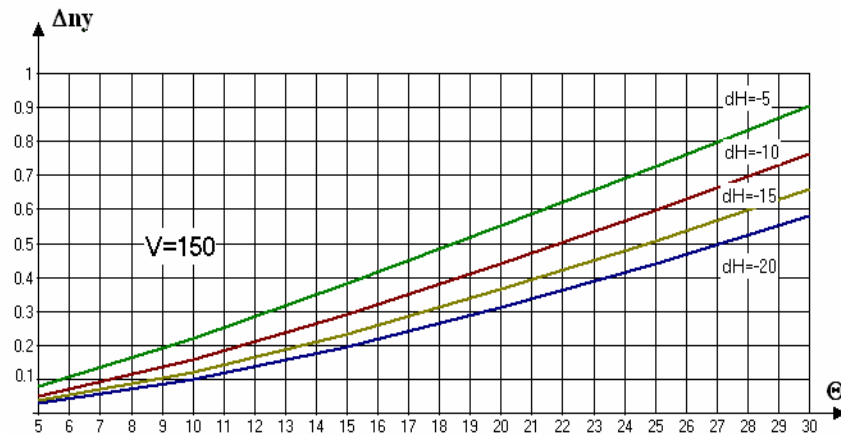


Рис.4

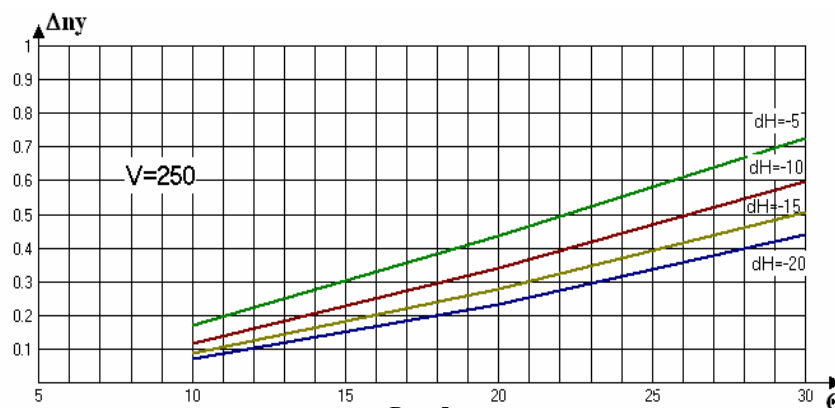


Рис.5.

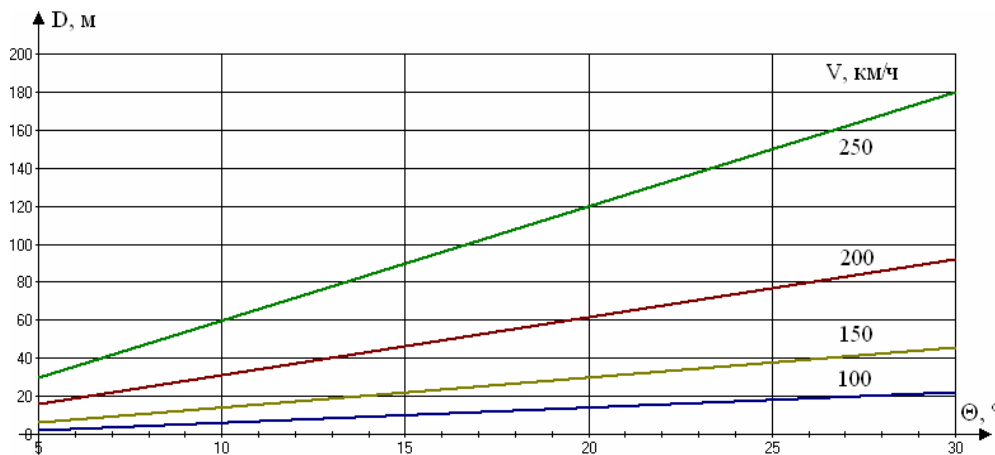


Рис.6.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены проблемы и особенности МВП на дальних дистанциях. Показано, что для автоматизации управления МВП оказывается целесообразным привлечение нейрокомпьютеров, способных в опережающем масштабе времени определять возможный выход за установленные ограничения. Получены оценки перегрузки при облете наклонных поверхностей рельефа и требуемая дальность полета. Полученные решения снимают лишь часть общей проблемы МВП, требующей дополнительного рассмотрения вопросов облета препятствий на малых расстояниях и торможения при облете крутых препятствий, а также оптимизации траектории МВП с использованием данных цифровой карты местности на средней дистанции.

Литература

1. Колоколов С.Н., Коновалов А.П., Куратов В.А. Динамика управляемого движения вертолета. М.: Машиностроение 1987 г.
2. Никифорова Л.Н., Петросян Э.А., Галушкин А.И. Проблемы создания системы управления беспилотного вертолета. Труды VII научных чтений по проблемам вертолетостроения и аэродинамике, посвященных памяти академика Б.Н. Юрьева Москва, 1999 г.
3. Томас П. Интеграция систем бортового электронного оборудования на военных вертолетах будущего. Пер. с англ. Труды 11 Европейского вертолетного форума, 1985 г.
4. Ильиченкова З.В., Истратов А.Ю. Решение задачи прокладки маршрута автономного транспортного робота на нейронных структурах // Нейрокомпьютер № 3, 4 1996 г.
5. Никифорова Л.Н., Гурман В.И. Автоматизация формирования траектории полета на борту вертолета Труды X юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Россия, Переславль-Залесский, 1999 г.
6. Никифорова Л.Н., Петросян Э.А., Феофилов Е.Б. Определение траекторий маловысотного полета методами теории оптимального управления. Труды 5-го международного симпозиума по проблемам авиации. Россия, 1999 г.
7. Ping L., Pierson B.L. Optimal Aircraft Terrain-Following Analysis and Trajectory Generation // Journal of Guidance, Control and Dynamics. Vol.18, May-June 1995.
8. Menon P.K.A., Kim E., Cheng V.H.L. Optimal Trajectory Synthesis for Terrain Following Flight // Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol.14, Jul-Aug 1991.
9. Никифорова Л.Н. Автоматизация облета рельефа с использованием лазерного дальномера. Труды НТК ЦАГИ 1984 г.
10. Baratoff G, Toepfel C, Wende M, Neumann H. Real-Time Navigation and Obstacle Avoidance from Optical Flow on a Space-Variant Map. Proceeding of the 1998 IEEEISIC/CIRA/ISAS Joint Conference, 1998.
11. Cheng Victor H.L., Lam T. Automatic Guidance and Control for Helicopter Obstacle Avoidance // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol 17, 1994.
12. Nikiforova L.N. Low Altitude Flight Optimization. Proceedings of the Third International Workshop Differential Inclusions and Control. Russia, 1998.
13. Бегичев Ю.И. Алгоритмическое обеспечение многоуровневой прогнозирующей системы управления автоматическим маловысотным полетом боевого вертолета. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ВВИА им. Жуковского, 1995 г.
14. Cheng V.H.L. and Sridhar B. Technologies for Automating Rotorcraft Nap-of-the-Earth // Journal of American Helicopter Society. Vol. 38 Apr 1993.
15. Галушкин А.И., Логовский А.С. Нейрокомпьютеры и их применение, тезисы доклада на Второй Всероссийской

- ской конференции «Нейрокомпьютеры и их применение», 1996 г.
16. Khalid M., Rubiyah Yusof R. Neuro-Control and its Application. Springer-Verlag, New York, 1996.
17. Napolitano M.R. Kincheloe M. On-Line Learning Neural-Network Controller for Autopilot System // Journal of Guidance, Control and Dynamics. Vol. 17, N 5, Nov-Dec 1995.
18. Patsko S, Botkin N.D., Turova V.I., Zarku M.A. Control of Aircraft Landing in Windshear // Journal of Optimization Theory and Applications. Vol. 83, Nov 1994.

Никифорова Лидия Николаевна. Главный научный сотрудник Института программных систем РАН. Окончила Московский авиационный институт в 1962 году. Там же защитила кандидатскую (1988) и докторскую (1997г) диссертации по динамике, управляемости и автоматизации полета. Профессор информатики. Автор более 50 печатных работ.

Яковлев Константин Сергеевич. Инженер-исследователь Института системного анализа РАН. Автор 10 печатных работ. Область научных интересов: интеллектуальные системы управления, автоматическое планирование.