

ЛЮБИМОВ Евгений Валерьевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ  
ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Владивосток

2007

Работа выполнена на кафедре автоматических и информационных систем управления Института автоматики и информационных технологий Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского.

Научный руководитель: доктор технических наук  
Дыда Александр Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Девятисильный Александр Сергеевич  
кандидат технических наук  
Змеу Константин Витальевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет (ЛЭТИ)

Защита состоится 25 мая 2007 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.01 в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН.

Автореферат разослан 23 апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 005.007.01, к.т.н.



А.В. Лебедев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные управляемые объекты характеризуются высокой степенью сложности, к факторам которой относятся многомерность, нелинейность, неопределенность математической модели и др. Синтез закона управления для подобных объектов часто связан со значительными трудностями теоретического и вычислительного характера.

В настоящее время разработан ряд эффективных методов исследования сложных нелинейных динамических систем. Значительный вклад в их развитие внесли российские ученые Б.Р. Андриевский, Ю.А. Борцов, Д.П. Деревницкий, А.А. Красовский, П.Д. Крутько, В.С. Кулешев, Н.А. Лакота, А.Г. Лесков, В.С. Медведев, И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, Е.С. Пятницкий, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов, А.В. Тимофеев, Е.И. Юревич, А.С. Ющенко, В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, Я.З. Цыпкин, В.А. Якубович, а также их зарубежные коллеги Y.D. Landau, A. Isidori, M. Kristic, I. Kanellakopoulos, P.V. Kokotovic, S. Dubowsky, C.S.C. Lee, J.Y.S. Luh, J.J. Slotine, M.D. Stokic, T.J. Tarn и др.

Большинство существующих методов исследования ориентировано главным образом на решение задач анализа, методы синтеза развиты в существенно меньшей степени. В свою очередь, методы синтеза могут быть разделены на методы параметрического синтеза (когда структура регулятора задана и требуется найти только его параметры) и методы структурного синтеза, которые направлены на нахождение в аналитической форме априорно неизвестного закона управления и представляют наибольший интерес.

Необходимо заметить, что ряд подходов к синтезу, например, опирающихся на метод функций Ляпунова, в значительной мере использует интуицию и опыт исследователя. Более перспективными представляются такие методы синтеза, которые допускают практически полную формализацию процесса построения управления. Примером такого метода является метод точной линеаризации, или линеаризации обратной связью, который близок к методам структурного синтеза Л.М.Бойчука, вычисляемого момента, обратных задач динамики и др.

С появлением все более сложных управляемых динамических объектов применение даже хорошо формализованных методов сталкивается с различными

трудностями, в том числе и рутинного характера, которые в определенной мере могут быть преодолены путем использования средств автоматизации для построения систем управления. Их применение при построении систем (законов) управления предполагает алгоритмизацию конкретного метода синтеза.

Современные программные пакеты предлагают обширные инструментарии разработки и проектирования систем автоматического управления, но они ориентированны главным образом на решение задач параметрического синтеза. Одним из перспективных подходов к построению средств автоматизации для разработки систем управления представляется направление, связанное с применением символьных вычислений. Как показывает обзор литературы, систематическое применение символьных вычислений к решению задачи синтеза нелинейных систем управления фактически отсутствует. Известные примеры использования символьных вычислений при решении задач синтеза систем управления носят фрагментарный характер. Вместе с тем, возможности современных символьных пакетов совместно с хорошо формализованными (алгоритмизированными) методами синтеза систем управления позволяют реализовать принципиально новый инструмент аналитического структурного синтеза.

В связи с этим актуальным представляется создание алгоритмов автоматизированного синтеза нелинейных (в том числе адаптивных и робастных) систем управления для широкого класса сложных динамических объектов, что и определило цель настоящего исследования.

Целью диссертации является разработка и исследование алгоритмов и программных средств аналитического (символьного) синтеза и моделирования систем управления сложными динамическими объектами.

Для достижения цели исследования в работе ставятся и решаются следующие основные задачи:

1. Анализ современных методов синтеза и средств автоматизации построения систем автоматического управления.
2. Разработка алгоритмов аналитического синтеза систем управления параметрически определенными нелинейными динамическими объектами и построения подсистем нуль-динамики.

3. Разработка алгоритмов аналитического синтеза адаптивных, адаптивно-робастных, нелинейно-робастных систем управления неопределенными динамическими объектами в задаче стабилизации вектора состояния.
4. Разработка алгоритмов синтеза адаптивных, адаптивно-робастных, нелинейно-робастных систем управления в задаче слежения выхода объекта управления.
5. Программная реализация разработанных алгоритмов символьного синтеза нелинейных, адаптивных и робастных систем управления. Исследование возможности оптимизации вычислительной сложности получаемых законов управления.
6. Проведение численных экспериментов по символьному синтезу и моделированию систем управления динамическими объектами.

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы использовались методы современной нелинейной теории управления, метод линеаризации обратной связью, нелинейные геометрические методы, метод обратных задач динамики, методы скоростного градиента, алгоритмы адаптивного управления на основе функций Ляпунова, методы математического моделирования.

Научная новизна результатов диссертации состоит в следующем:

1. Разработанные алгоритмы позволили предложить единую процедуру автоматизированного синтеза законов нелинейного, адаптивного и робастного управления в символьной форме по математической модели нелинейного динамического объекта.
2. Показана возможность полностью автоматического выполнения синтеза системы управления.
3. Разработаны алгоритмы получения уравнений подсистемы нуль-динамики по модели объекта.
4. Для решения задачи адаптивного управления по выходу предложено применение дополнительного динамического блока – генератора программной траектории вектора состояния.

Практическая ценность работы. Разработанные алгоритмы и программный комплекс существенно сокращают сроки построения систем управления

сложными динамическими объектами и уменьшают трудоемкость этапа синтеза регулятора. Автоматизированный синтез позволяет оценить сложность практической реализации нелинейных законов управления, получаемых на основе математических моделей различной степени детализации. Получение результатов синтеза в символьной форме делает возможным дальнейшее аналитическое исследование законов управления, их оптимизацию и практическое использование с применением современной микропроцессорной техники.

Представленный в работе цикл исследований был выполнен в соответствии с научно-исследовательскими планами отдела №60 ИАПУ ДВО РАН на 2005-2007 г. Тема исследований «Проблема анализа и синтеза сложных управляемых систем», раздел «Разработка основ теории, прикладных алгоритмических и программных средств принятия решений в условиях неопределенности».

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение использовались научно-производственной фирмой «Управляющие системы» (г. Владивосток) при разработке двух-степенной следящей системы гироскопа «Вега-М» по заказу ФГУП «Завод точной механики» (г. Екатеринбург).

Достоверность полученных результатов базируется на использовании апробированных теоретических методов исследования нелинейных систем управления, доказательствах устойчивости синтезированных систем управления, а так же на результатах численного моделирования.

#### На защиту выносятся

1. Алгоритмы синтеза нелинейных, адаптивных и робастных систем управления для параметрически определенных и неопределенных объектов управления в задачах программного управления вектором состояния и выхода.
2. Программный комплекс для автоматизированного символьного синтеза и моделирования нелинейных, адаптивных и робастных систем автоматического управления сложными динамическими объектами.

Апробация результатов диссертации. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ), научных семинарах Института

автоматики и процессов управления, Института проблем морских технологий ДВО РАН, Дальневосточной математической школе-семинаре имени акад. Е.В. Золотова (2004-2006), 52-ой региональной научно-технической конференции творческой молодёжи Дальнего Востока «Молодежь – Наука – Инновации» (МГУ 2004, 2005, 2006), международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2005» (г. Санкт-Петербург), семинарах кафедры автоматических и информационных систем управления Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, включает 50 рисунков и 2 таблицы. Список использованной литературы включает 76 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы автоматизированного аналитического синтеза систем управления. Обсуждается состояние и развитие проблемы автоматизации, намечены основные пути решения, сформулированы цели и задачи исследований, дана общая характеристика работы.

Первая глава посвящена обзору методов синтеза систем управления. В первом разделе показаны наиболее распространенные математические модели объектов управления (ОУ), используемые далее в работе. Приведена формальная математическая постановка задачи синтеза системы управления (СУ) в условиях нелинейности, неопределенности и многомерности модели.

Во втором разделе выполнен краткий обзор современных методов построения систем автоматического управления (САУ): метод скоростного градиента, адаптивный алгоритм на базе концепции расширенной ошибки, адаптивный алгоритм с применением функции Ляпунова, адаптивный алгоритм высокого порядка, метод обратных задач динамики, метод функций Ляпунова, метод линеаризации обратной связью и др. В результате анализа показана

перспективность использования в решении задачи автоматизации построения САУ методов линеаризации обратной связью (ЛОС) и адаптивного управления на основе функций Ляпунова совместно со схемой непосредственной компенсации.

Во второй главе рассматривается используемый далее метод синтеза параметрически определенного ОУ – метод линеаризации обратной связью. Математическая модель стационарного нелинейного динамического ОУ представлена следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u, \\ y &= h(x), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x = (x_1 \dots x_n)^T$ ,  $u = (u_1 \dots u_m)^T$ ,  $y = (y_1 \dots y_m)^T$  - соответственно векторы состояния, управления и выхода,  $f(x), h(x)$  - гладкие вектор – функции размерности  $n$  и  $m$  соответственно,  $g(x)$  - матрица размерности  $(n \times m)$ . В работах А. Isidori и др. показано, что закон вида

$$u = A^{-1}(x)(\tilde{u} - \Gamma(x)) \quad (2)$$

обеспечивает линеаризацию исходной системы относительно выхода  $y$  и нового управления  $\tilde{u}$ .

$$A(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \dots & \dots & L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(x) & \dots & \dots & L_{g_m} L_f^{r_2-1} h_2(x) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m(x) & \dots & \dots & L_{g_m} L_f^{r_m-1} h_m(x) \end{bmatrix}, \quad \Gamma(x) = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ L_f^{r_2} h_2(x) \\ \dots \\ L_f^{r_m} h_m(x) \end{bmatrix}$$

где  $r = (r_1 \dots r_m)^T$  - вектор так называемых относительных степеней,  $\tilde{u} = (\tilde{u}_1 \dots \tilde{u}_m)^T$  - новое управление. Обозначим  $y^*$  и  $e_y = y^* - y$  соответственно желаемую траекторию движения выхода системы и ошибку слежения. Выбор дополнительного управления  $\tilde{u}$  в виде

$$\tilde{u} = (y^*)^{(r)} + k_r e_y^{(r-1)} + \dots + k_1 e_y, \quad (3)$$

и надлежащих коэффициентов  $k_r$ , очевидно, позволяет обеспечить асимптотическое стремление ошибки слежения к нулю, т.е.  $e_y \rightarrow 0$  и решение задачи слежения выхода за программной траекторией:  $y \rightarrow y^*$ . Если



выполняется условие  $r_1 + \dots + r_m = n$ , то такая система полностью линеаризуема. В противном случае, в системе имеется ненаблюдаемая часть, динамика которой теоретически не влияет на связь входа и выхода (нулевая динамика), однако на практике должна быть ограничена.

На основе (1)-(3) во втором разделе произведена алгоритмизация метода линеаризации обратной связью и программная реализация процедуры синтеза в среде символьных вычислений Maple. Показано, что для широкого класса динамических объектов все шаги символьного синтеза – приведение к виду (1) (параметризация), расчет вектора относительной степени, построение линеаризующей обратной связи и дополнительного управления, передача результатов синтеза и модели замкнутой СУ в среду моделирования – в целом могут выполняться автоматически. Для пользователя работа с программным обеспечением (ПО) сводится к вводу математической модели ОУ, программной траектории, коэффициентов эталонного уравнения динамики ошибки.

В разделе 3 для иллюстрации общности подхода и подтверждения эффективности разработанного ПО выполнен синтез СУ по параметрически определенным моделям подводного манипулятора (ПМ) и подводного аппарата (ПА). Ниже приведены фрагменты законов управления, записанных на языке Maple, которые генерирует программный комплекс по математической модели ПА.

$$u_2 = x_8 * x_7 * l_{11} - x_{11} * x_{10} * l_{33} + x_8 * x_7 * M_m - x_{11} * x_{10} * M_m - y_c * x_7^2 * M_m - y_c * x_{10}^2 * M_m - \cos(x_3) * \sin(x_2) * w_3 * l_{22} - \cos(x_3) * \sin(x_2) * w_3 * M_m + \cos(x_3) * \cos(x_2) * w_1 * l_{22} + \cos(x_3) * \cos(x_2) * w_1 * M_m + \sin(x_3) * w_2 * M_m + \sin(x_3) * w_2 * l_{22} - M_m * x_{11} * x_{12} + x_9 * x_7 * l_{22} + M_m * x_9 * x_7 - x_{11} * x_{12} * l_{22} + PL * \cos(x_3) * \cos(x_1),$$

$$\tilde{u}_2 = (R_2 * \sin(\omega_2 * t) - x(5)) * k_{i21} + (R_2 * \cos(\omega_2 * t) * \omega_2 - \sin(x(3)) * x(8) - \cos(x(3)) * \cos(x(1)) * x(9) + \cos(x(3)) * \sin(x(1)) * x(11)) * k_{i22} - R_2 * \sin(\omega_2 * t) * \omega_2^2.$$

Высокая размерность модели ПА приводит к тому, что полученные выражения закона управления составляют 45 страниц машинописного текста. Очевидно, подобный синтез возможен только с применением автоматизированных средств, полностью исключая участие исследователя в

процессах преобразования выражений. Несмотря на чрезвычайную громоздкость сгенерированных законов управления, переходные процессы в них, как демонстрирует математическое моделирование, удовлетворяют заданным эталонным уравнениям.

Исследования показали, что использование специальных оптимизационных функций, в частности, имеющихся в среде Maple, позволяет существенно уменьшить вычислительную сложность синтезируемых законов управления (длину выражений) в среднем в 20-40 раз и увеличить скорость моделирования. В работе производится детальное изучение влияния способов организации моделирования, методов расчета моделируемой системы управления и способов оптимизации на скорость моделирования синтезированной САУ.

Результаты численных экспериментов демонстрируют ограниченность всех сигналов в синтезированных СУ для ПМ и ПА. Рисунки 1 и 2 иллюстрируют сходимость фактического выхода ПА к программной траектории. На рис. 3 приведены компоненты вектора управления, наблюдаются приемлемые по величине управляющие сигналы. На рис. 4 представлены компоненты вектора дополнительного управления. Моделирование проводилось для различных программных траекторий и с учетом ограничений на управляющие воздействия.

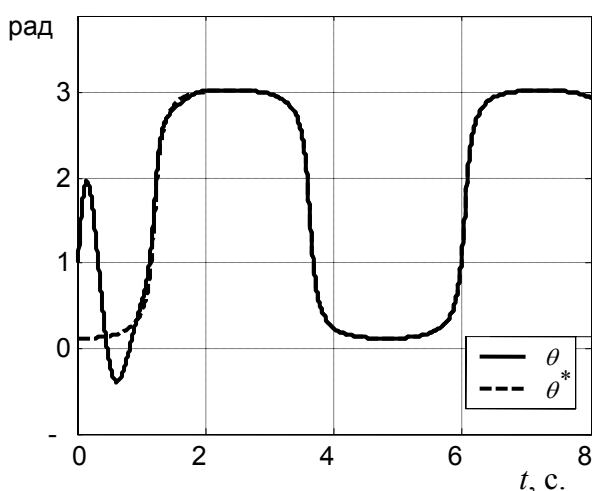


Рис. 1. Программная  $\theta_c^*$  и фактическая  $\theta_c$  координаты (курс) ПА.

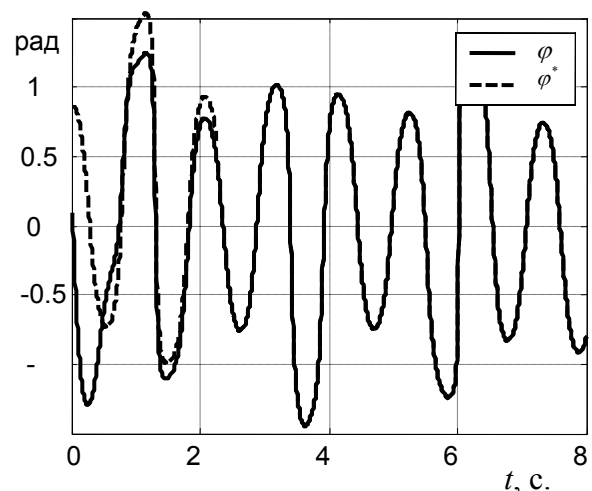


Рис. 2. Программная  $\varphi_c^*$  и фактическая  $\varphi_c$  координаты (дифферент) ПА.

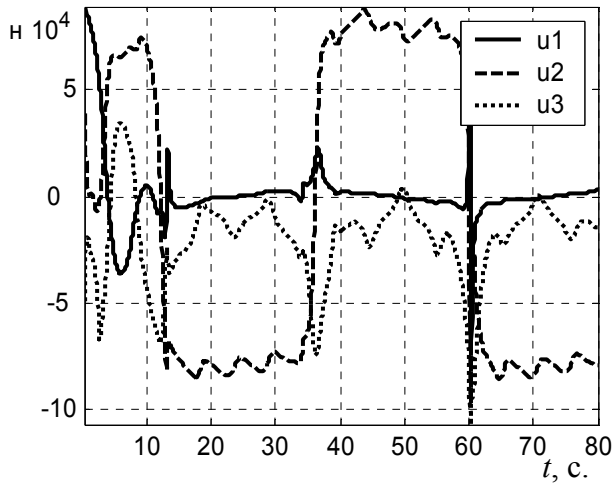


Рис. 3. Компоненты вектора управления  $u = [u_1, u_2, u_3]^T$  ПА

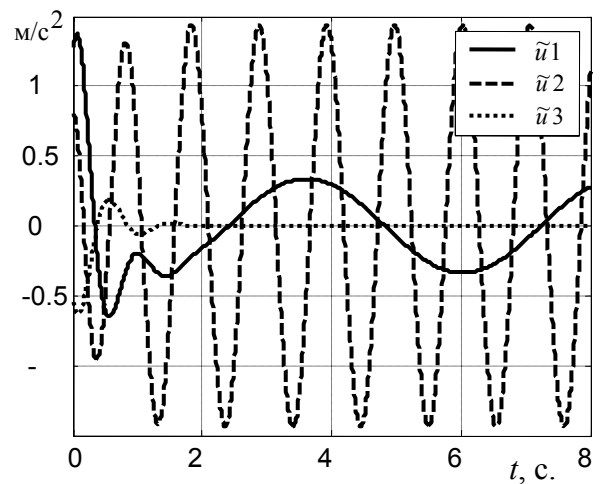


Рис. 4. Вектор дополнительного управления  $\tilde{u} = [\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3]^T$  ПА.

В случае, когда  $r_1 + \dots + r_m < n$ , метод ЛОС не обеспечивает полную линеаризацию модели (1) и полученная система управления содержит подсистему нуль-динамики. В работе рассматриваются несколько подходов к получению уравнений подсистем нуль-динамики с применением разработанного ПО, приведены примеры исследования устойчивых и неустойчивых подсистем нуль-динамики.

В третьей главе анализируются методы адаптивного управления, позволяющие синтезировать устойчивую систему управления в условиях параметрической, сигнальной или структурной неопределенности математической модели ОУ.

В работе рассматривается стратегия прямого адаптивного управления, одним из частных случаев которой является схема непосредственной компенсации, и группа градиентных алгоритмов, получивших название адаптивных алгоритмов с применением функций Ляпунова. Модель неопределенного динамического ОУ представлена следующим уравнением:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)(u + \omega(x, t)^T \theta(x, u, t)) + \delta(t), \quad (9)$$

где  $\omega(x, t)$  - матрица (регрессор) размерности  $(n \times q)$ ,  $\theta(x, u, t) = (\theta_1, \dots, \theta_q)^T$  - вектор неопределенных параметров,  $\delta$  -  $n$ -мерный вектор (ограниченной нормы) неизмеряемых внешних возмущений. Особенностью модели (9) является то, что вся неопределенность объекта управления, включая параметрическую,

сигнальную, структурную неопределенности, сосредоточена в векторе  $\theta$ . В соответствии с принципом непосредственной компенсации сформируем закон управления в виде:

$$u = U_0 - \omega(x, t)^T \hat{\theta}, \quad (10)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \Theta(x, \hat{\theta}, t), \quad (11)$$

где  $\hat{\theta}$  - оценка вектора неопределенных параметров, а  $\Theta$  - регулятор, обеспечивающий ее настройку. Если найденная регулятором (11) оценка вектора совпадает с фактическим значением  $\theta = \hat{\theta}$ , тогда закон (10) обеспечивает полную компенсацию возмущающего влияния неопределенности  $\theta$  (без учета  $\delta$ ) и модель (9) записывается в виде:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)U_0, \quad (12)$$

что позволяет синтезировать регулятор  $U_0$  с применением метода ЛОС и разработанного выше ПО. Регулятор (10), (11) может быть построен с применением адаптивных, адаптивно-робастных и нелинейно-робастных законов управления (А.Л. Фрадков, И.В. Мирошник, В.О. Никифоров):

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\theta}_s + \hat{\theta}_I,$$

$$\hat{\theta}_s = \mu \omega(x) \frac{\partial V}{\partial x}(x) g(x), \quad (13)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_I = \gamma \omega(x) \frac{\partial V}{\partial x}(x) g(x) - \sigma \hat{\theta}_I, \quad (14)$$

где  $\mu > 0$ ,  $\gamma > 0$  и  $\sigma > 0$  - постоянные коэффициенты,  $V(x)$  - функция Ляпунова. (13) – нелинейно-робастный регулятор, (14) – адаптивно-робастный регулятор. Выбор для законов (13), (14) некоторой положительно определенной функции Ляпунова  $V(x)$ , производная которой в силу (12) отрицательна, обеспечивает ограниченность всех сигналов в СУ, сходимость вектора состояния к ограниченному множеству. При этом его радиус определяется коэффициентами  $\mu, \gamma, \sigma$ .

Задача поиска функции Ляпунова  $V(x)$ , как известно, представляет самостоятельную проблему теории управления. В работе показано, что применение простейших квадратичных функций Ляпунова вида:

$$V(x) = x^T P x, \quad (15)$$

позволяет выполнить автоматизированный (в ряде случаев, автоматический) символьный синтез адаптивных, адаптивно-робастных и нелинейно-робастных законов управления.

Рассмотренные выше законы управления (10)-(14) ориентированы на решение задачи стабилизации вектора состояния ОУ (9). Особый практический интерес представляет собой задача слежения вектора выхода, решение которой для параметрически определенных ОУ возможно с применением метода ЛОС. Однако в классе адаптивных СУ решение этой задачи связано с серьезными структурными ограничениями, преодоление которых на сегодняшний день с теоретической точки зрения для широкого класса задач пока не представляется возможным.

В работе показывается, что задача стабилизации модели (9) может быть расширена до задачи слежения вектора состояния  $x$  за некоторой программной траекторией  $x^* : x \rightarrow x^*$ . Выбор метода ЛОС для синтеза регулятора (10) позволяет записать функцию Ляпунова в законах (13) и (14) в следующем виде:

$$V(x) = e_x^T P e_x, \quad (16)$$

где  $e_x = x^* - x$  и обеспечивает асимптотическое стремление ошибки слежения векторов выхода и состояния к нулю  $e_y \rightarrow 0, e_x \rightarrow 0$ .

В работе предлагается подход, основанный на применении дополнительного динамического блока (генератора программного значения вектора состояния), который позволяет преобразовать традиционно сложную задачу слежения за выходом к задаче слежения за вектором состояния:  $x \rightarrow x^*$ .

Выполненная в разделе 4 алгоритмизация рассмотренных выше законов адаптивного, адаптивно-робастного и нелинейно-робастного управления показывает, что в задаче слежения выхода ОУ применение регуляторов (2),(3),(10),(11),(13),(14),(16) для многих практически важных ОУ позволяет

выполнить символьный синтез систем управления автоматически. При этом, однако, параметризация вида (9) не всегда возможна и в некоторых случаях исследователю необходимо самостоятельно с помощью специальных замен приводить математическую модель к указанному виду.

Результаты выполненных экспериментов показывают работоспособность рассматриваемого класса СУ, синтезированных с помощью разработанного ПО для ПМ и ПА в задаче слежения вектора выхода с применением дополнительных динамических блоков (генератора программной траектории вектора состояния). Синтез СУ ПА проводился автоматически. При этом для модели ПА, имеющий порядок 12, общий порядок полученной замкнутой динамической системы равен 37. Ниже на языке Maple приведены результаты выполненного ПО символьного синтеза регуляторов (13), (14) для ПА первых трех компонентов вектора неопределенных параметров:

$$\text{theta\_par1} := \mu_1 * (-(2*x7 - 2*x19)/yc/Mm - (2*x12 - 2*x24)*(Jx + l66)/Mm^2/yc^2) * x8 * (x8^2 + x9^2 + x11^2)^{(1/2)} + x25,$$

$$\text{theta\_par2} := \mu_2 * (2*x8 - 2*x20)/(Mm + l22) * x9 * (x8^2 + x9^2 + x11^2)^{(1/2)} + x26,$$

$$\text{theta\_par3} := \mu_3 * ((2*x9 - 2*x21)/yc/Mm - (2*x10 - 2*x22)*(Jx + l44)/Mm^2/yc^2) * x11 * (x8^2 + x9^2 + x11^2)^{(1/2)} + x27,$$

$$\text{dx25} := \text{gamma1} * (-(2*x7 - 2*x19)/yc/Mm - (2*x12 - 2*x24)*(Jx + l66)/Mm^2/yc^2) * x8 * (x8^2 + x9^2 + x11^2)^{(1/2)} - \text{thigma1} * x25,$$

$$\text{dx26} := \text{gamma2} * (2*x8 - 2*x20)/(Mm + l22) * x9 * (x8^2 + x9^2 + x11^2)^{(1/2)} - \text{thigma2} * x26,$$

$$\text{dx27} := \text{gamma3} * ((2*x9 - 2*x21)/yc/Mm - (2*x10 - 2*x22)*(Jx + l44)/Mm^2/yc^2) * x11 * (x8^2 + x9^2 + x11^2)^{(1/2)} - \text{thigma3} * x27,$$

где  $\text{theta\_par1} = \hat{\theta}_1, \dots, \text{theta\_par3} = \hat{\theta}_3, \text{dx25} = \frac{d}{dt} x25, \dots, \text{dx27} = \frac{d}{dt} x27.$

На рис. 5-8 показаны результаты моделирования адаптивной системы управления ПА ( $\mu = \sigma = 0$ ). Параметрическая неопределенность модели ПА приводит к значительной ошибке слежения (рис. 5). Включение адаптивного контура обеспечивает подавление неопределенности и уменьшение ошибки слежения (рис. 6), а адаптивный регулятор (рис. 7) демонстрирует идентификационные свойства. При этом выбранная функция Ляпунова ограничена и убывает (рис. 8).

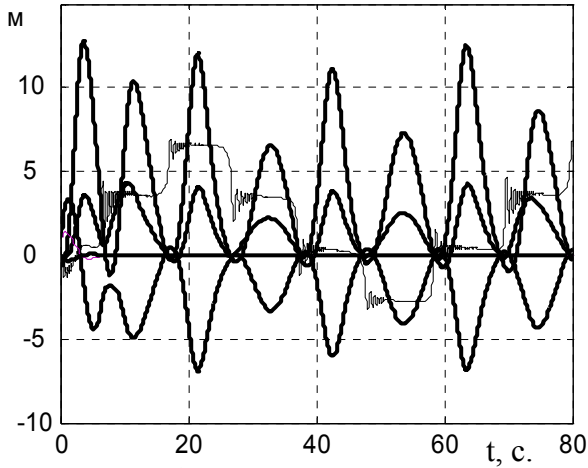


Рис. 5. Ошибка слежения вектора выхода  $e_y$  ПА, без адаптивной настройки.

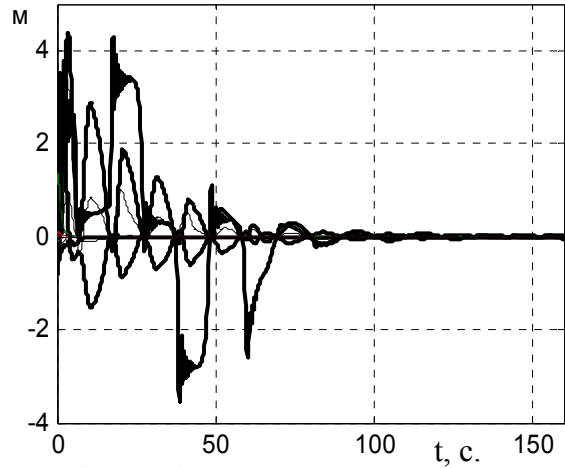


Рис. 6. Ошибка слежения вектора выхода  $e_y$  ПА, с адаптивной настройкой.

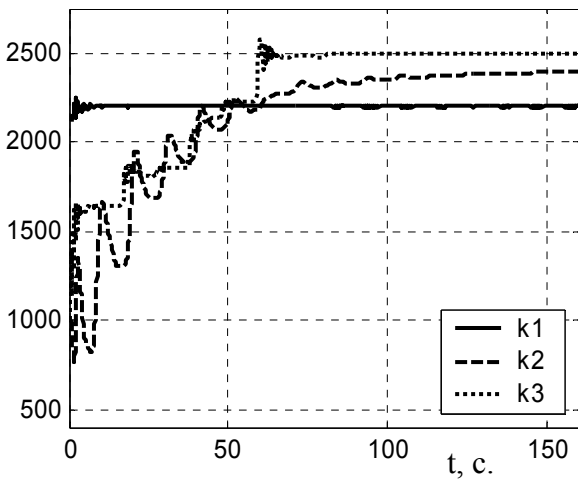


Рис. 7. Настройка неопределенных параметров ПА  $\hat{\theta} = [k_1, k_2, k_3]^T$ .

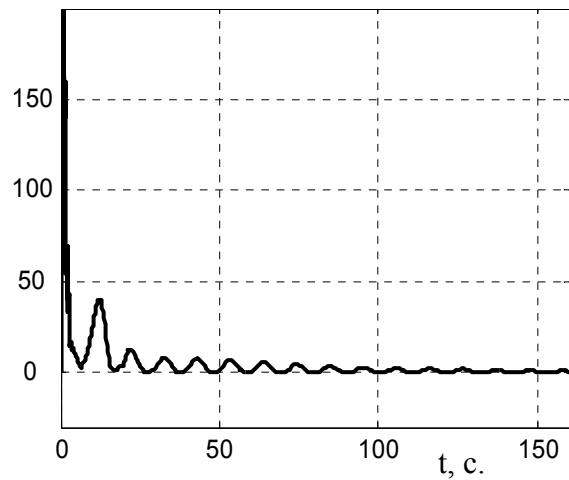


Рис. 8. Функция Ляпунова.

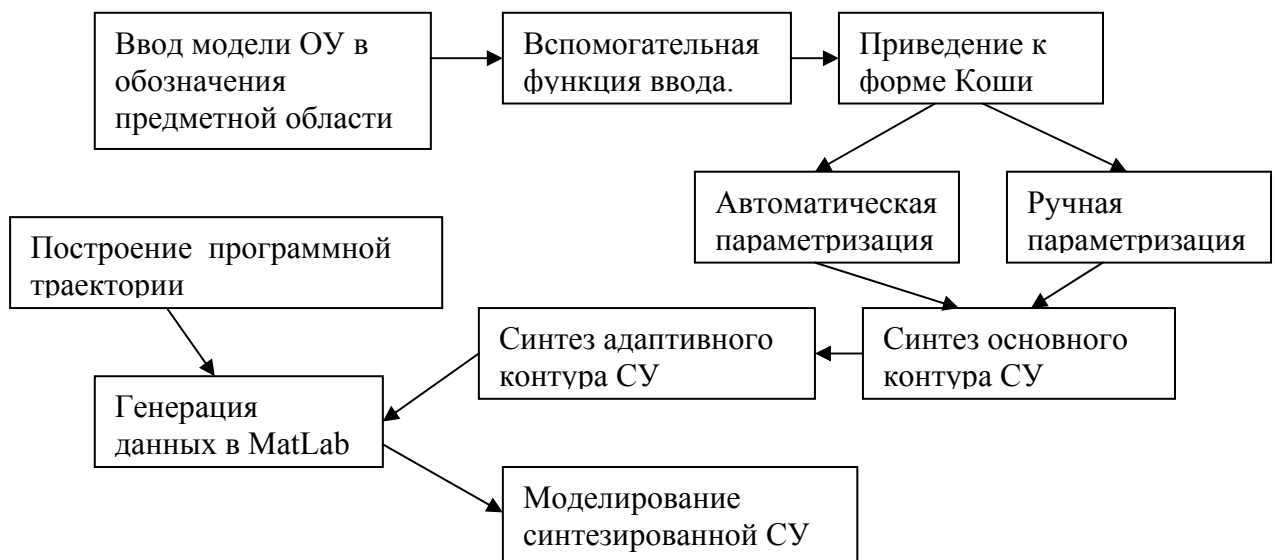


Рис. 9. Функциональная структура разработанного программного комплекса.

Результаты проведенных экспериментов по символьному синтезу и моделированию показали высокую эффективность разработанного ПО. Время синтеза работоспособной СУ не превышает нескольких минут, при этом, несмотря на сложность символьных выражений, полученные регуляторы позволяют управлять динамическим объектом в реальном масштабе времени.

В приложении 1 приводится описание разработанного программного обеспечения, построенного по модульному линейному принципу (рис. 9). На этапе синтеза, после ввода в символьной форме математической модели ОУ, исследователь последовательно запускает разработанные функции, в результате выполнения которых формируется система MatLab-файлов, содержащих модель и сгенерированные программным комплексом законы управления.

Этап моделирования осуществляется с применением пакета MatLab. Предусмотрены два способа моделирования: 1) - программный режим; 2) - с применением пакета Simulink.

В приложении 2 приведены математические модели сложных динамических объектов, на примере которых в работе производится синтез и моделирование СУ. Модель подводного аппарата состоит из 12 дифференциальных уравнений, описывающих его пространственное движение. Вектор управления ПА размерности 6 включает в себя силы и моменты, создаваемые движителями. Модель трехзвенного подводного манипулятора состоит из 6 дифференциальных уравнений и 3 уравнений выхода, характеризующих пространственное положение схвата манипулятора.

В приложении 3 исследуются вопросы построения генератора программной траектории вектора состояния. В приложении 4 содержатся документы, подтверждающие практическое использование результатов диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ



1. На базе метода линеаризации обратной связью разработаны и исследованы алгоритмы синтеза нелинейных параметрически определенных систем управления и построения подсистем нуль-динамики.
2. Разработаны алгоритмы синтеза адаптивных, адаптивно-робастных, нелинейно-робастных систем управления неопределенными динамическими объектами в задаче стабилизации вектора состояния.
3. Разработаны алгоритмы синтеза адаптивных, адаптивно-робастных, нелинейно-робастных систем управления в задаче слежения выхода объекта управления.
4. Выполнена программная реализация разработанных алгоритмов автоматизированного символьного синтеза и моделирования нелинейных систем управления.
5. Работоспособность и эффективность созданного комплекса программ автоматизированного синтеза подтверждена на примерах построения систем управления конкретными нелинейными многомерными динамическими объектами.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дыда А.А., Любимов Е.В. Автоматизация аналитического синтеза и моделирования нелинейных систем управления // Дальневосточная математическая школа-семинар имени акад. Е.В. Золотова: Тез. докладов. - Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2004.- С. 119-120.
2. Дыда А.А., Любимов Е.В. Применение адаптивных алгоритмов в задаче автоматизированного аналитического синтеза систем управления сложными динамическими объектами. // Компьютерное моделирование 2005: труды VI Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2005. – С. 59-66 .

3. Дыда А.А., Любимов Е.В. Автоматизация аналитического синтеза и моделирования нелинейных систем управления // Надежность и качество 2004: труды международного симпозиума. – Пенза: ПГУ, 2004. – Ч.1. - С. 182-184.
4. Дыда А.А., Любимов Е.В. Автоматизация проектирования систем управления движения морских подвижных объектов // Транспортное дело России №11. – М: Изд-во Морские вести России, 2006. - С. 3-8.
5. Дыда А.А., Любимов Е.В. Автоматизация аналитического синтеза и моделирования нелинейных систем управления // Системный анализ, управление и навигация: Тез. докладов. 9–ой международной конференции. – М.: МАИ, 2004.- С. 127-128.
6. Любимов Е.В. Автоматизированный аналитический синтез системы управления в условиях параметрической неопределенностей с использованием наблюдателей. // Системный анализ, управление и навигация: Тез. докладов. 11–ой международной конференции. – М.: МАИ, 2006.- С. 188-189.
7. Любимов Е.В. Автоматизированный аналитический синтез адаптивных алгоритмов нелинейных систем управления.// Инновация и молодежь: Сборник докладов региональной научно-технической конференции. – Владивосток: МГУ, 2004. – С. 86-91 .
8. Любимов Е.В. Синтез системы управления манипулятора в условиях параметрической неопределенности с использованием наблюдателей. // Инновация и молодежь: Сборник докладов региональной научно-технической конференции. – Владивосток: МГУ, 2006. – С. 26-32.
9. Любимов Е.В. Организация процесса аналитического синтеза нелинейных систем управления с применением автоматизированных средств. // Знание творчество-профессионализм: Сборник докладов региональной научно-технической конференции. – Владивосток: МГУ, 2005. – С. 424-430.
10. Любимов Е.В. Построение системы управления движением подводного аппарата с применением автоматизированного аналитического синтеза // Дальневосточная математическая школа-семинар имени акад. Е.В. Золотова: Тез. докладов. - Владивосток: ДВГУ. - 2006.- С. 123-124.

Личный вклад автора. Работы [6,7,8,9,10] выполнены автором лично. В работах [1,2,3,4,5] автор разрабатывал алгоритмы решения поставленных задач и выполнил все необходимые расчеты. В работе [2] автор участвовал также в постановке задачи.

ЛЮБИМОВ Евгений Валерьевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ  
ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Автореферат

Подписано к печати 20.04.2007 г. Усл.п.л.1.0. Уч.-изд.л. 0.75.

Формат 60X84/16. Тираж 100. Заказ 8.

---

Издано ИАПУ ДВО РАН Владивосток, Радио,5.

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.

Владивосток, Радио, 5.