



2. *Верхотуров А. Д., Лебухова Н. В., Карнович Н. Ф.* Исследование метода динамической термогравиметрии в исследовании гетерогенных реакций / Тез. докл. III регион. науч. конф. «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование». Благовещенск: АмГУ, 2002.
3. *Стромберг А. Г., Семченко Д. П.* Физическая химия. М.: Высш. шк., 1999.
4. *Sestak J., Satava V., Wendlandt W.W.* The studies of Heterogenionsprocesses by Thermal analisis // Thtrmochim acta. 1973. V. 7. P.333 – 501.
5. *Шестак Я.* Теория термического анализа. М.: Мир, 1987.
6. *Дьяконов В.* Mathcad 8/2000. М., 2000.

УДК 658.5.011.56

© 2002 г. **Т.А. Галаган,**
Е.Л. Еремин, д-р техн. наук,
А.Д. Плутенко, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается программный комплекс, представляющий собой автоматизированный расчетно-аналитический пакет прикладных программ имитационного моделирования робастных систем управления существенно нестационарными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности.

Введение

Для большинства автоматизированных систем характерна достаточно высокая степень сложности объекта управления, определяющаяся неполнотой априорной информации о параметрах объекта и свойствах действующих на него внешних возмущений, наличием нестационарных и нелинейных динамических характеристик объекта, а также запаздыванием различного типа [1].

Актуальна разработка робастных алгоритмов управления, не чувствительных к вариациям параметров математической модели объекта, обеспечивающих нечувствительность выходных показателей системы по отноше-

нию к неконтролируемым, но объективно имеющим место отклонениям переменных состояния от номинальных значений.

Применение критерия гиперустойчивости позволяет синтезировать робастные системы управления нестационарными объектами, функционирующие в условиях априорной неопределенности и сохраняющие свои свойства при изменении параметров объекта и воздействий внутри заданных множеств и классов [2, 3].

Проектировать высококачественные робастные системы управления динамическими объектами невозможно без использования вычислительных средств. Сложность изучаемых и проектируемых систем приводит к необходимости создания специальной, качественно новой техники исследования, использующей аппарат имитации – воспроизведение на ЭВМ специально организованными системами математических моделей функционирования проектируемого объекта.

Имитационное моделирование на ПЭВМ позволяет проводить вычислительные эксперименты с еще только проектируемыми системами и изучать системы, натурные эксперименты с которыми из соображений безопасности или дороговизны нецелесообразны. В то же время благодаря своей близости по форме к физическому моделированию этот метод исследования доступен более широкому кругу пользователей.

При имитационном моделировании математическая модель воспроизводит логику функционирования исследуемой системы во времени при различных сочетаниях значений ее параметров и внешней среды. Вследствие этого имитационное моделирование является неотъемлемым этапом, предваряющим техническую реализацию системы. Оно позволяет оценить эффективность системы управления, а также улучшить качество управляющих воздействий за счет уточнения числовых значений ряда параметров, у которых на этапе синтеза системы определены лишь диапазоны возможных значений.

Предлагаемый программный комплекс (программный продукт) разработан в рамках интерактивной системы MatLab версии 6.0.

Математическая модель

В качестве модели динамического объекта рассматривается класс объектов управления, процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A(t)x(t) + D_1(t)x(t - \tau_1) + D_2(t)\frac{dx(t - \tau_2)}{dt} + bu(t) + f(t), \\ y(t) &= L^T x(t), \quad z(t) = g^T y(t), \\ x(s_1) &= \varphi_1(s_1), \quad s_1 \in [\tau_1, 0], \quad dx(s_2)/ds_2 = d\varphi_2(s_2), \quad s_2 \in [-\tau_2, 0], \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(t) \in R^N$ – вектор состояния; $\varphi_1(s_1), \varphi_2(s_2) \in C_\tau$ – начальные вектор-функции; $y(t) \in R^M$ – вектор выхода; C_τ – пространство ограниченных непрерывных функций, τ_1, τ_2 – запаздывание; $u(t) \in R$ – управление; z – обобщенный выход; $A(t), D_1(t), D_2(t)$ – нестационарные матрицы заданного размера с неизвестными, но принадлежащими известному множеству элементами; $f(t) \in R^N$ – внешнее возмущение, удовлетворяющее условию:

$$\|f(t)\| < f_0^2 = \text{const}. \quad (2)$$

Требуемое качество управления объектом формируется на основе эталонной модели, вспомогательной динамической системы, обладающей желаемой реакцией на внешнее воздействие, причем она может быть задана как явным, так и неявным образом. Для случая ЯЭМ модель выступает как заданное динамическое звено, описываемое уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{dx_M}{dt} &= A_M x_M(t) + D_{1M} x_M(t - \tau_1) + D_M \frac{dx_M(t - \tau_2)}{dt} + b_M r(t), \\ y_M(t) &= L^T x_M(t), \\ z_M(t) &= g^T y_M(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $x(t) \in R^N$ – вектор состояния эталона; A_M, D_{1M}, D_{2M}, b_M – постоянные числовые матрицы и вектор, причем A_M – гурвицева; $r(t)$ – задающее воздействие.

На основе методики, изложенной в работах [2 – 4], можно синтезировать алгоритм робастного закона управления объектом (1), (2), (3), обеспечивающий асимптотическую устойчивость полученной системы и выполнение целевого условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_M(t) - x(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0. \quad (4)$$

В случае неявной эталонной модели, которая описывает желаемое поведение объекта в установившемся режиме, она описывается дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} \frac{dx_*}{dt} &= A x_* + D_1 x_*(t - \tau_1) + D_2 \frac{dx_*(t - \tau_2)}{dt} = 0, \\ y_* &= L^T x_*, \quad z_* = g^T y_* = \text{const}, \end{aligned} \quad (5)$$

где x_* – желаемое состояние объекта в установившемся режиме; A, D_1, D_2 – матрицы и вектор с постоянными коэффициентами; алгоритм робастного управления, наряду с асимптотической устойчивостью системы, обеспечивающий выполнение целевого условия вида:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_* - x(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0. \quad (6)$$

Структура программного комплекса

Выбор системы MatLab в качестве среды разработки обусловлен тем, что это одновременно и операционная система, и язык программирования. В ней возможно создание специализированных функций и программ для многократного применения, а по мере увеличения их количества – объединение в пакет прикладных программ, т.е. в совокупность файлов для решения определенной проблемы или задачи. Основным объектом программы является массив, не требующий указания размерности явно, что позволяет решать многие вычислительные задачи, связанные с векторно-матричными формулировками [5].

Структура пакета основана на применении стандартных функций библиотек визуального программирования Simulink при создании mdl-файлов, непосредственно моделирующих робастные системы управления, и оригинальных m-функций, создающих специальные меню, а также обеспечивающих взаимодействие компонент всего комплекса. Последние значительно упрощают работу пользователя с приложением и позволяют в интерактивном режиме выбирать путь проведения исследования.

Настоящая версия программного комплекса имитационного моделирования дает возможность выбирать необходимую систему управления; изменять параметры объекта управления; модифицировать структуру регулятора; создавать новые робастные системы управления; получать результаты моделирования в виде графиков и числовых значений на любой момент моделирования.

Одна из наиболее важных особенностей данного программного продукта – возможность автоматического сохранения модифицированных файлов с различными числовыми значениями параметров робастных систем и полученных результатов моделирования. Быстрый переход от одной модификации к другой позволяет визуально оценить полученные результаты и выбрать из них наиболее эффективный. После выбора такого варианта из модифицированных файлов происходит автоматическое уничтожение «лишних» файлов.

Пакет также предоставляет возможность увеличить масштаб выбранного пользователем графического представления результатов. При этом автоматически происходит расчет таких параметров как среднее значение, максимальное и минимальное значения, дисперсия.

В пакете реализована система подсказок и комментариев, обеспечивающая понятный пользователю интерфейс, наглядность и простоту работы с приложением.

Запуск комплекса программ осуществляется непосредственно в среде MatLab. После запуска приложения на экране появляется главное меню выбора системы управления (рис. 1).

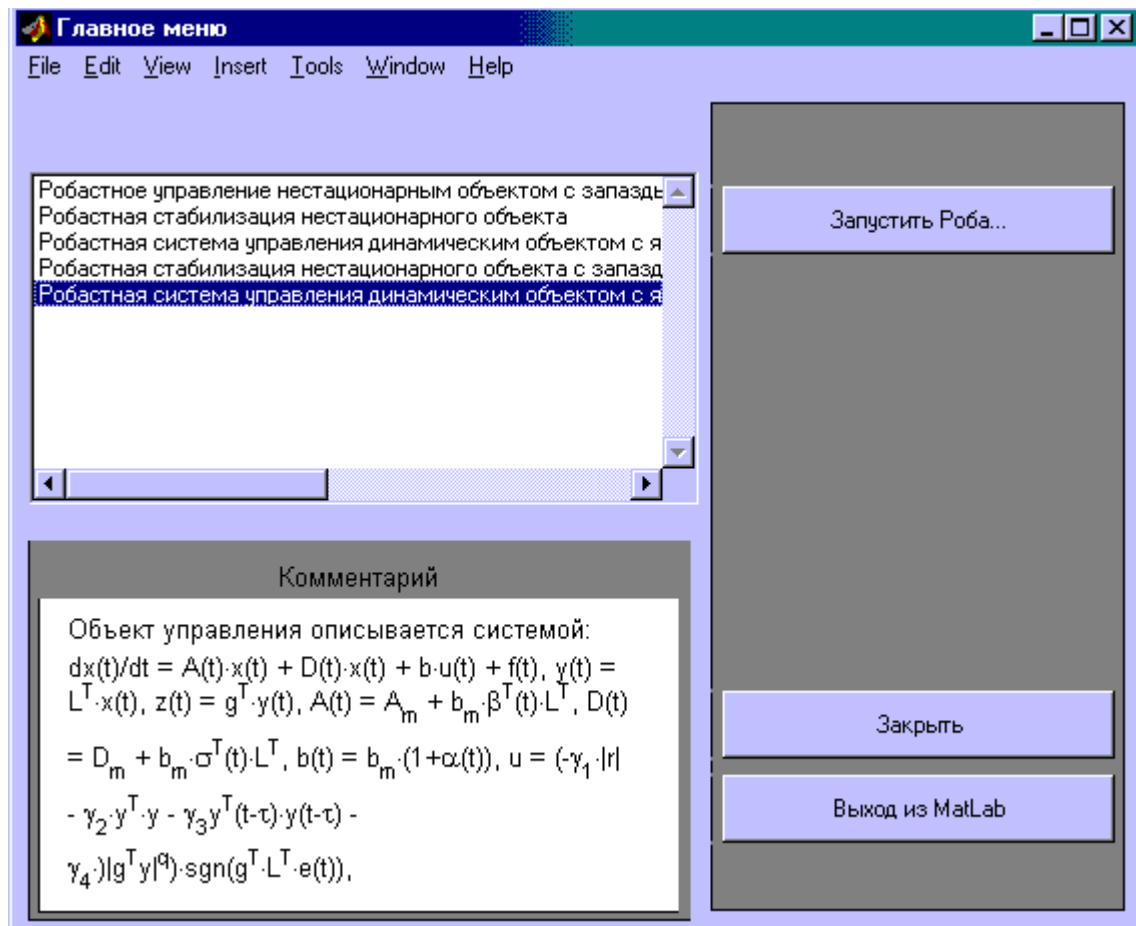


Рис. 1. Главное меню.

При выборе необходимой системы из перечисленных происходит вывод на экран соответствующей Simulink-модели и окна, содержащего области вывода графиков (результатов моделирования), комментариев, кнопок возможных действий (рис. 2).

Здесь также необходимо выбрать интересующее действие и нажать с помощью мыши соответствующую кнопку. Суть моделирования систем управления заключается в решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений, представляющей собой математическую модель динамики рабочего процесса системы управления. Решение находят путем численного интегрирования системы уравнений с использованием формул четвертого и пятого порядков (функция `ode45`). Особенность моделирования систем управления объектами с запаздыванием – постоянный шаг моделирования.

Продолжительность симуляции в зависимости от сложности моделируемой системы и производительности ЭВМ составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Кнопки «Вперед» и «Назад» позволяют осуществлять быстрый переход от результатов моделирования одной модификации системы к результатам других модификаций. Редактирование числовых характеристик системы производится непосредственно в среде визуального

моделирования Simulink. После процесса счета модифицированная версия mdl-файла автоматически сохраняется.

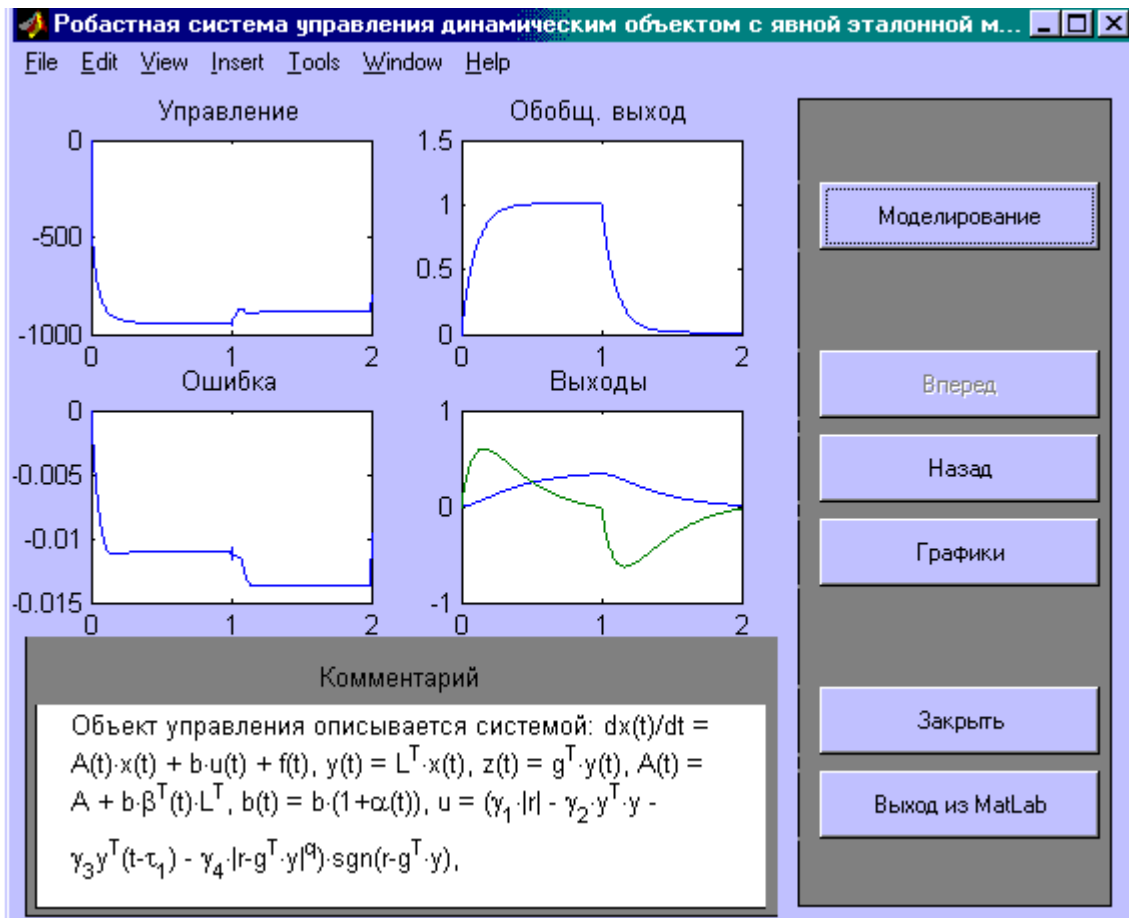


Рис. 2. Экранная форма.

Иллюстративный пример

Рассматривается задача робастной стабилизации нестационарного объекта с запаздыванием нейтрального типа. Объект управления описывается уравнением (1), в котором все матрицы ненулевые. Для случая неявной эталонной модели (5) выполнены условия структурного согласования модели и эталона:

$$\begin{aligned}
 A(t) &= A + b\beta^T(t)L^T, \quad D_1(t) = D_1 + b\sigma_1^T(t)L^T, \\
 D_2(t) &= D_1 + b\sigma_2^T(t)L^T, \quad b(t) = b(1 + \alpha(t)),
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где $\beta(t)$, $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ и $\alpha(t) > 0$ – векторные и скалярная функции, элементы которых произвольно изменяются в известных пределах, причем собственные числа матрицы D_2 лежат в круге единичного радиуса.

На основе критерия гиперустойчивости можно показать, что если выбрать элементы вектора g таким образом, что квазиполином

$$g^T L^T [pE - A - D_1 \exp(-p\tau_1) - D_2 p \exp(-p\tau_2)]^+ b$$

будет гурвицевым степени $n-1$ с положительными коэффициентами, то робастный алгоритм управления

$$u = \left\{ -\gamma_1 - \gamma_2 y^T y - \gamma_3 y^T (t - \tau_1) y (t - \tau_1) - \gamma_4 |g^T L^T e|^q \right\} \operatorname{sgn}(g^T L^T e), (8)$$

$$\gamma_1 > 0, \gamma_2 = \gamma_1 \sup_t \|\beta(t)\|^2, \gamma_3 = \gamma_1 \sup_t \|\sigma_1^T(t)\|^2, \gamma_4 \geq 0, 0 < q < 1 - \text{const}$$

обеспечивает выполнение целевого условия (6) и асимптотическую устойчивость системы (1), (5), (7), (8).

Simulink-модель системы (1), (5), (7), (8) представлена на рис. 3.



Рис. 3. Simulink-диаграмма робастной системы управления.

Блок-диаграмма робастного регулятора представлена на рис. 4. Заметим, что данная реализация позволяет за счет использования переключателя получать численные и графические результаты моделирования для различных структур робастного регулятора.

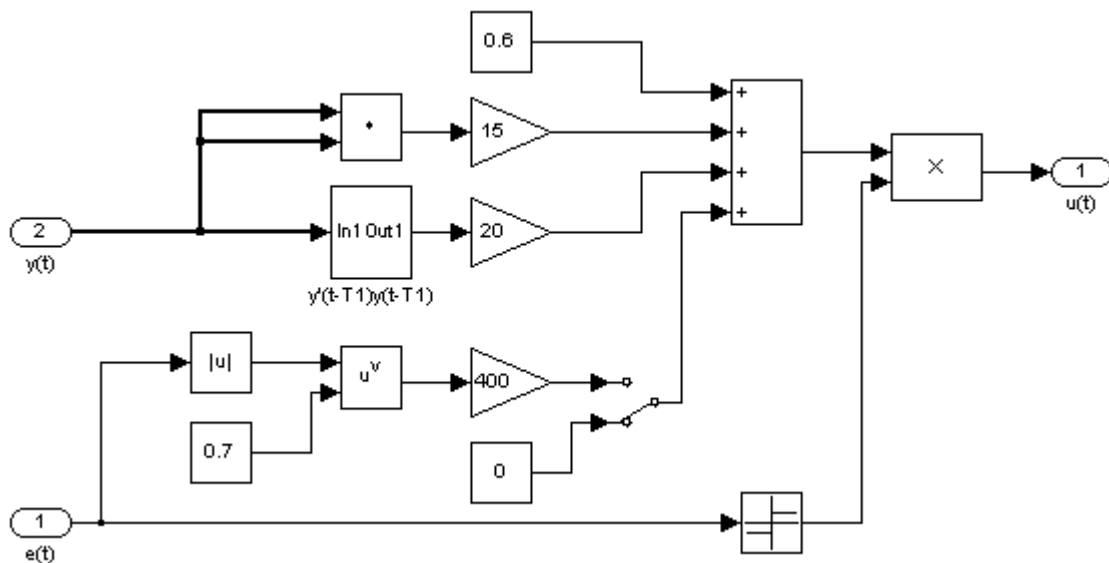


Рис. 4. Simulink-диаграмма робастного регулятора.

Результаты моделирования системы (1), (5), (7), (8) для исходных данных

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -5 & -1 & -4 \end{pmatrix}, D_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, D_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, f = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_n \end{pmatrix},$$

$$f_n = 0.5 \cos(0.2t), \quad L^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0.5 \\ 0.25 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \alpha(t) = 0.5 - 0.1 \sin(t),$$

$$g^T = (2 \quad 3), \quad \beta^T(t) = (4 \sin(6t) \quad 2 \cos(4t)),$$

$$\sigma_1^T(t) = (1.5 - 0.1 \sin(t), 0.1 \sin(t)), \quad \sigma_2^T(t) = (1 \quad 0.5 - 0.1 \sin(t)), \quad r = 0.5,$$

и значения констант в алгоритме управления $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 15, \gamma_3 = 20, \gamma_4 = 400, q = 0.7$ приведены на рис. 5.

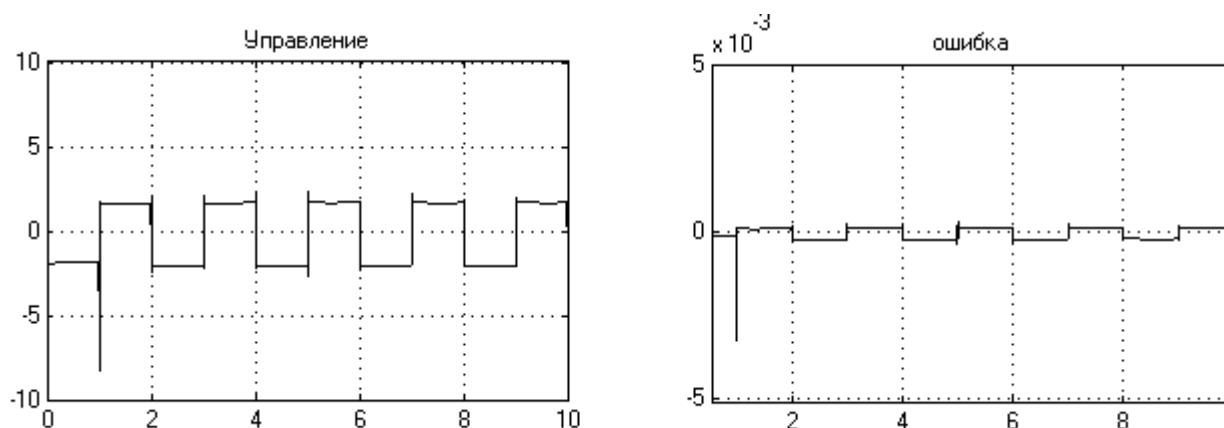


Рис. 5. Результаты моделирования системы (1), (5), (7), (9).

Заключение

Рассмотренный в статье программный продукт используется для теоретических исследований с целью создания высокоэффективных робастных систем управления. Программный комплекс – наглядное, удобное и достаточно универсальное средство имитационного моделирования робастных систем управления нестационарными объектами. Как и любое приложение среды MatLab, он обладает достаточной гибкостью и открытостью, что делает возможным его дальнейшую модификацию с целью расширения класса решаемых задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990.
2. Галаган Т.А., Еремин Е.Л., Плутенко А.Д. Робастный алгоритм управления нестационарным нелинейным объектом для систем с явной эталонной моделью // Информатика и системы управления. Благовещенск. 2001. №2. С.100-105.
3. Галаган Т.А., Еремин Е.Л., Плутенко А.Д. Алгоритмы систем робастной стабилизации нестационарного объекта с неявной эталонной моделью // Вестник АмГУ. Благовещенск. 2001. Вып. 15. С.18-20.
4. Галаган Т.А., Еремин Е.Л., Плутенко А.Д. Алгоритм и имитационное моделирование робастной системы управления с запаздыванием нейтрального типа // Вестник АмГУ. Благовещенск. 2002. Вып. 17. С.19-22.
5. Гультаев А.К. MATLAB-5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие. М.: Наука, 2000.