

*На правах рукописи*



**Лызлова Мария Владимировна**

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРЕУГОЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ С  
ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

**05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(в технических системах)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург – 2015**

Работа выполнена в Санкт–Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

**Научный руководитель:** кандидат технических наук,  
**Герасимов Дмитрий Николаевич**

**Официальные оппоненты:** **Тюкин Иван Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра систем  
автоматического управления, профессор

**Сыроквашин Владислав Викторович**  
кандидат технических наук,  
Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (Технический  
университет), кафедра автоматизации процессов  
химической промышленности, доцент

**Ведущая организация:** Санкт-Петербургский государственный  
университет

Защита состоится 17 декабря 2015 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.227.03 при Санкт–Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт–Петербург, Кронверкский пр., д. 49, ауд. 285.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт–Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт–Петербург, Кронверкский пр., д. 49 и на сайте <http://ipro.ifmo.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Дударенко Наталия Александровна

## Общая характеристика работы

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Одним из важнейших направлений исследований в области адаптивного и робастного управления является упрощение структуры адаптивных регуляторов, направленное на снижение в них вычислительных затрат за счет минимизации количества арифметических операций и понижение дифференциального порядка. Необходимость в создании относительно простых алгоритмов адаптивного управления обусловлена высокими динамическими порядками и большим количеством арифметических операций в известных адаптивных регуляторах, разработанных при помощи классических подходов (см. работы А. Аннасвами, К. Нарендры, М. Морза, С. Састри, М. Кристича, П. Кокотовича, К. Тсакалиса, П. Иоанну, А.Л. Фрадкова, В.О. Никифорова и др.) и имеющих следующие особенности:

- количество настраиваемых параметров регулятора совпадает или превышает количество неизвестных параметров самого объекта;
- в случае неизмеримости переменных состояния требуется использование дополнительных динамических фильтров или алгоритмов наблюдения;
- при расширении класса объектов, в частности, на нестационарный случай, структура алгоритма управления усложняется (см. работы К. Тсакалиса, П. Иоанну, Р. Марино, П. Томея).

Ввиду сказанного, логически обоснованными выглядят попытки многих ученых модифицировать существующие законы адаптивного управления в целях снижения в них количества настраиваемых параметров и минимизации динамического порядка. В ряде работ А.Л. Фрадкова и Б.Р. Андриевского по теории пассивфикации (начиная с теоремы А.Л. Фрадкова, 1974) и работе Я. Виллемса и К. Бернса (1984) году предлагается идея простого алгоритма адаптивного управления первого (динамического) порядка с “сильной” обратной связью, разработанного для класса гипер–минимально–фазовых линейных объектов, т.е. для объектов с передаточной функцией с единичной относительной степенью и гурвицевым полиномом числителя. Несмотря на существенную ограниченность класса управляемых объектов, представленная идея легла в основу ряда подходов других исследователей. В частности, в работах А.А. Бобцова по последовательному компенсатору эта идея развита на случай произвольной относительной степени объекта и неизмеримости вектора состояния. В работах И. Барканы по простому адаптивному управлению идея А.Л. Фрадкова развита на случай произвольной относительной степени объекта и почти строго положительной вещественной передаточной функции. Альтернативные подходы по созданию относительно простых законов адаптивного управления основаны преимущественно на принципе “сильной” обратной связи (в англоязычной литературе принят термин “high-gain control”). При этом полученный регулятор имеет всего один обобщенный настраиваемый параметр, который оказывает доминирующее влияние на динамику объекта, его параметрические неопределенности, нестационарности и нелинейности, а также на внешнее ограниченное возмущение. В этой области широкое распространение получил метод А. Ильхмана (в англоязычной литературе принят тер-

мин “funnel control”) и его модификации. Оригинальная версия этого метода разработана для линейного объекта с единичной относительной степенью. При этом отличие от метода А.Л. Фрадкова заключается в обеспечении заранее известного качества регулирования выходной переменной (отсюда термин “funnel”, что с английского переводится как “тоннель”, “трубка”). Метод А. Ильхмана расширен для класса линейных и нелинейных систем с произвольной относительной степенью Ф. Алговером, Е. Буллингером, Г. Райаном и др. При этом проблема относительной степени была решена при помощи нелинейных алгоритмов формирования коэффициентов обратной связи, имеющих динамический порядок, существенно превышающий порядок объекта. Д. Миллером и Э. Дэвисоном (1991) был предложен подход с “переключающимся” коэффициентом “сильной” обратной связи с знакопеременным коэффициентом усиления. Проблема относительной степени в данной работе также решена с помощью дополнительного динамического фильтра с большим коэффициентом усиления.

Укажем те особенности приведенных в обзоре методов, в связи с которыми в диссертационной работе был разработан альтернативный подход. В рассмотренных существующих решениях (за исключением метода А. Ильхмана и его модификаций) предполагается неограниченный рост коэффициента обратной связи при наличии возмущений, что ограничивает практическое применение регулятора. Обобщение алгоритмов на случай произвольной относительной степени требует увеличение дифференциального порядка и арифметических операций. Не анализируется случай вариации неизвестных параметров объекта.

В работе предлагается альтернативное решение задачи с простой структурой адаптивного управления классом линейных нестационарных и параметрически неопределенных объектов треугольной структуры с произвольной относительной степенью. Решение основано на принципе “сильной” обратной связи и методе стандартных характеристических полиномов с изменяющимся среднегеометрическим корнем. Значение корня генерируется одним из разработанных алгоритмов адаптации и растет до тех пор, пока замкнутая система не станет устойчивой, а выходная ошибка окончательно не уйдет в окрестность нуля. При этом радиус окрестности может быть изменен произвольным образом за счет изменения коэффициентов регулятора. Несмотря на то, что объект имеет произвольную относительную степень, алгоритм не предполагает введение дополнительных фильтров. Динамический порядок алгоритмов управления не превышает единицу. Отметим, что рост среднегеометрического корня ограничивается за счет использования робастных модификаций алгоритмов адаптации.

**Цели диссертационной работы.** Разработка алгоритмов адаптивного управления с простой структурой для класса линейных параметрически неопределенных объектов с переменными параметрами, треугольной матрицей состояния и произвольной относительной степенью. Решение с помощью разработанных алгоритмов практических задач адаптивного управления крутящим моментом инжекторного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и задачи адаптивного трехканального управления температурой и влажностью воздуха, а также концентрацией  $\text{CO}_2$  в парниковой теплице.

**Научная новизна.** Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в том, что предлагаемый метод адаптивного управления базируется на методе стандартных характеристических полиномов с единственным настраиваемым параметром- среднегеометрическим корнем характеристического полинома. Показано, что синтезированные алгоритмы управления применимы для класса нестационарных параметрически неопределенных линейных объектов с треугольной матрицей состояния и произвольной относительной степенью. Алгоритмы используются в задачах адаптивного управления крутящим моментом ДВС и адаптивного трехканального управления микроклиматом парниковой теплицы.

В целях решения задачи управления двигателем была разработана и апробирована на экспериментальных данных модель ДВС. В целях решения задачи управления микроклиматом теплицы была разработана модель температуры и влажности воздуха, а также концентрации  $\text{CO}_2$  в парниковой теплице.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные алгоритмы управления могут быть применены в задачах управления по состоянию нестационарными параметрически неопределенными системами с треугольной структурой и произвольной относительной степенью.

**Методы исследований.** При получении теоретических результатов использовался метод функций Ляпунова, метод стандартных характеристических полиномов, методы теории идентификации, методы адаптивного и робастного управления.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмы адаптивного управления нестационарными параметрически неопределенными линейными объектами с произвольной относительной степенью и треугольной матрицей состояния, содержащие один настраиваемый параметр и один алгоритм адаптации.

2. Алгоритм адаптивного управления крутящим моментом ДВС, построенный на основе модели и разработанного метода;

3. Алгоритм адаптивного трехканального управления микроклиматом парниковой теплицы, построенный на основе математической модели и разработанного метода.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. XLI научная и учебно–методическая конференция НИУ ИТМО. 31.01.2012 – 03.02.2012.

2. XLII научная и учебно–методическая конференция НИУ ИТМО. 29.01.2013– 01.02.2013.

3. II Всероссийский конгресс молодых ученых. 09.04.2013 – 12.04.2013, НИУ ИТМО.

4. XLIII научная и учебно–методическая конференция. 28.01.2014 – 31.01.2014, НИУ ИТМО.

5. III Всероссийский конгресс молодых ученых. 08.04.2014 – 11.04.2014, НИУ ИТМО.

6. XLIV научная и учебно–методическая конференция. 03.02.2015 – 06.02.2015, НИУИТМО.

7. The 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON 2015), Россия, Санкт–Петербург, 24.06.2015–26.06. 2015.

**Публикации.** Автор диссертационной работы имеет 4 публикации, 3 из которых напечатаны в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 1 статья размещена в международной базе данных Scopus.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа объемом 138 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

### Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность задач, рассматриваемых в диссертационной работе. Сформированы цели и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы представлен обзор существующих методов решения задачи адаптивного управления неопределенными объектами. В результате обзора выделены особенности существующих методов и обоснованно предлагается альтернативное решение.

**Во второй главе** предложено решение задачи управления нестационарными параметрически неопределенными линейными объектами с произвольной относительной степенью и треугольной матрицей состояния.

В постановке задачи рассматривается объект вида

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B(t)u + \xi, \quad x(0), \\ y &= x_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x \in R^n$  – вектор состояния объекта;  $u$  – переменная управления;  $y$  – регулируемая переменная;  $\xi \in R^n : \|\xi\| \leq \bar{\xi}$  – возмущение (Здесь и далее используется норма  $\|\cdot\|_\infty$ ),

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_{1,1}(t) & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,\rho-1}(t) & a_{2,\rho-1}(t) & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{1,\rho}(t) & a_{2,\rho}(t) & \cdots & a_{\rho,\rho}(t) & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,n-1}(t) & a_{2,n-1}(t) & \cdots & a_{\rho,n-1}(t) & 0 & \cdots & 1 \\ a_{1,n}(t) & a_{2,n}(t) & \cdots & a_{\rho,n}(t) & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_m(t) \\ \vdots \\ b_0(t) \end{bmatrix}.$$

Функции  $a_{i,j}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}, b_k, k = \overline{0,m}$  неизвестны. Класс объектов (1) ограничивается следующими допущениями:

**Допущение 1:** Объект является полностью управляемым и наблюдаемым;

**Допущение 2:** Относительная степень  $\rho = n - m$  постоянна.

**Допущение 3:** Нуль-динамика объекта, представленная уравнением “вход-состояние-выход”

$$\dot{z}_2 = \bar{G}_2(t)z_2,$$

где  $z_2 \in R^m$  – вектор состояния модели (Индекс “1” в величинах  $\bar{G}_1(t)$ ,  $z_1$  используется в дальнейшем в уравнениях внешней динамики объекта);

$$\bar{G}_2(t) = \begin{bmatrix} -b_{m-1}(t)/b_m(t) & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -b_{m-2}(t)/b_m(t) & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -b_1(t)/b_m(t) & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -b_0(t)/b_m(t) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix},$$

экспоненциально устойчива. Из теории линейных систем известно, что из экспоненциальной устойчивости линейной системы следует существование функции Ляпунова вида

$$V_0 = z_2^T P z_2,$$

где  $P(t) = P^T(t) > c_1 I; P(t) + \bar{G}_2^T(t)P(t) + P(t)\bar{G}_2 = -J(t), J(t) = J^T(t) > c_2 I; c_1, c_2$  – некоторые положительные константы.

**Допущение 4:**  $a_{i,j}(t), b_k(t) \in L_\infty \cap C^\infty$ ;

**Допущение 5:** Известно минимальное значение  $b_m$ , обозначаемое как  $b_{m \min}$ ;

**Допущение 6:** Вектор состояния  $x$  доступен прямому измерению;

Отметим, что требование к устойчивости объекта не предъявляется.

Цель заключается в построении закона управления, который обеспечивает ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и выполнение целевого неравенства

$$\|y_M(t) - y(t)\| \leq \Delta, \quad \forall t \geq T, \quad (2)$$

где  $\Delta > 0, T > 0$  – максимальная ошибка и время настройки системы соответственно;  $y_M \in R^n$  – желаемый выход объекта, генерируемый устойчивой эталонной моделью

$$\dot{x}_M = A_M x_M + B_M g, \quad (3)$$

$$y_M = x_{M1}$$

С задающим воздействием  $g(t)$  и постоянными матрицами  $A_M \in R^{n \times n}, B_M \in R^n$ .

Для решения поставленной задачи предлагается следящий закон управления:

$$u = \frac{1}{b_{m \min}} K^T(\omega) e, \quad (4)$$

где  $e = x_M - x$ ;  $\varepsilon = y_M - y$ ;  $K$  – матрица обратных связей:

$$K^T(\omega) = \left[ \omega^\rho, C_{\rho-1}\omega^{\rho-1}, \dots, C_2\omega^2, C_1\omega, 0, \dots, 0 \right] \quad (5)$$

$\omega$  – среднегеометрический корень характеристического полинома,  $C_i, i = \overline{1, \rho-1}$  – постоянные положительные коэффициенты гурвицевого полинома

$$\lambda^\rho + C_1\lambda^{\rho-1} + C_2\lambda^{\rho-2} + \dots + C_{\rho-1}\lambda + 1. \quad (6)$$

При достаточно сильном отклонении  $y$  от нулевого положения равновесия, происходит увеличение параметра  $\omega$ , который генерируется одним из трех синтезируемых в работе алгоритмов адаптации:

а) Алгоритм адаптации с линейной обратной связью №1.

$$\dot{\omega} = (-\sigma_1 + \gamma_1 f(\varepsilon, t)) \omega, \quad \omega(0) > 0, \quad (7)$$

где  $\gamma_1, \sigma_1$  – положительные константы;  $\gamma_1 > \sigma_1$ ,  $f(\varepsilon, t)$  – функция, выбираемая исходя из следующих условий:  $f(\varepsilon, t)$  – монотонна;  $f(\varepsilon, t) \in C^1$ ;  $f(0, t) = 0$ ;  $f(\varepsilon, t) \neq 0$  при  $y \neq 0$ ;  $\lim_{|\varepsilon| \rightarrow \infty} f(\varepsilon, t) \rightarrow 1$ . В качестве функции  $f$  может быть выбрана

функция вида

$$f(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2}.$$

б) Алгоритм адаптации с линейной обратной связью №2.

$$\dot{\omega} = -\sigma_2 \omega + \gamma_2 r(\varepsilon, t), \quad \omega(0) \geq 0, \quad (8)$$

где  $\gamma_2, \sigma_2$  – положительные константы;  $r(\varepsilon, t)$  – функция, выбираемая согласно следующим условиям:  $r(\varepsilon, t)$  – монотонна;  $r(\varepsilon, t) \in C^1$ ;  $r(0, t) = 0$ ;  $r(\varepsilon, t) > 0$  при  $\varepsilon \neq 0$ . В качестве  $r(\varepsilon, t)$  может быть использована параболическая функция

$$r(\varepsilon) = \varepsilon^2.$$

в) Алгоритм адаптации со статической нелинейной обратной связью:

$$\omega = \gamma_3 r(\varepsilon, t), \quad (9)$$

где  $\gamma_3$  – положительная величина.

Важно отметить, что в алгоритмах адаптации (7) и (8) параметр  $\omega$  увеличивается при существенном отклонении ошибки  $\varepsilon$  от нулевого значения. Рост параметра происходит до тех пор, пока  $\varepsilon$  не “уйдет” в окрестность нуля с предварительно заданным радиусом. В алгоритме (9)  $\omega$  увеличивается при росте ошибки  $\varepsilon$  и уменьшается при соответствующем уменьшении  $\varepsilon$  до некоторого заданного значения. Во всех трех случаях устойчивость в замкнутой системе обеспечивается за счет доминирования коэффициента  $\omega$ , от величины которого зависит радиус окрестности  $\Delta$ , представленный в условии (2).



Структурная схема управления может быть представлена в следующем виде:

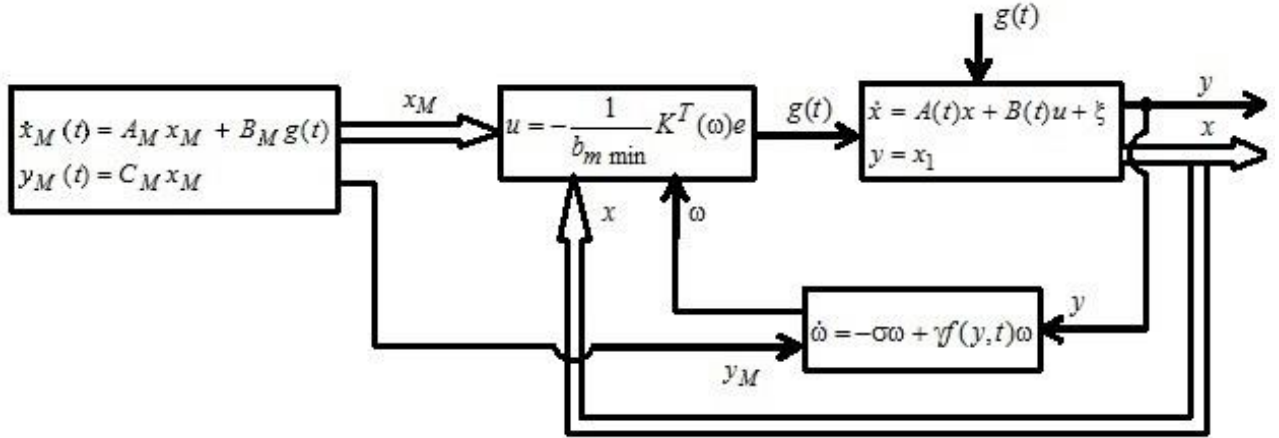


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления.

В целях анализа устойчивости замкнутой системы с помощью (1) и (3) формируется модель ошибки вида

$$\dot{e} = G(\omega, t)e + \chi, \quad e(0) \quad (10)$$

где  $\chi = (A_M - A)x_M + B_M g - \xi$ ;

$$G(\omega, t) = A(t) - B(t)K^T(\omega) / b_m \min =$$

$$\begin{bmatrix} a_{11}(t) & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,p-1}(t) & a_{2,p-1}(t) & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{1,p-1}(t) - \bar{b}_m(t)\omega^p & a_{2,p-1}(t) - \bar{b}_m(t)C_{p-1}\omega^{p-1} & \dots & a_{p,p}(t) - \bar{b}_m(t)C_1\omega & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,n-1}(t) - \bar{b}_1(t)\omega^p & a_{2,n-1}(t) - \bar{b}_1(t)C_{p-1}\omega^{p-1} & \dots & a_{p,n-1}(t) - \bar{b}_1(t)C_1\omega & 0 & \dots & 1 \\ a_{1,n}(t) - \bar{b}_0(t)\omega^p & a_{2,n}(t) - \bar{b}_0(t)C_{p-1}\omega^{p-1} & \dots & a_{p,n}(t) - \bar{b}_0(t)C_1\omega & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix};$$

$$\bar{b}_i(t) = b_i(t) / b_m \min.$$

Анализ замкнутой системы (10), в которой  $\omega$  генерируется (7) (либо (8) или (9)), проводится входе доказательства следующей теоремы:

**Теорема.** Система (10), в которой параметр  $\omega$  формируется одним из алгоритмов адаптации (7), (8) или (9), обладает следующими свойствами:

- Все сигналы в системе ограничены;
- Величина  $\varepsilon = e_1 = y_M - y$  экспоненциально стремится к окрестности нуля;
- Радиус окрестности может быть уменьшен произвольным образом путем увеличения коэффициента  $\gamma$  в применяемом алгоритме адаптации.

Доказательство теоремы проводится в 4-е этапа.

**Эман 1.** Исследуются предельные значения собственных чисел матрицы  $G(\omega, t)$   $\lambda_k, k = \overline{1, n}$ . Показано, что

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \{\lambda_k(\omega, t)\} = \begin{cases} -q_i(t), i = \overline{1, m}, \\ -q_j(t)\omega(t), j = \overline{1, \rho}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $q_i = q_i(t)$  – положительные непрерывные функции, зависящие от  $b_i(t), i = \overline{0, m}$  и  $\bar{b}_m(t)$ ;  $q_j = q_j(t)$  – положительные непрерывные функции, зависящие от  $C_i, i = \overline{0, \rho-1}$  и  $\bar{b}_m(t)$ .

**Эман 2.** Система (10) преобразовывается к эквивалентной форме с помощью линейного преобразования  $e = Q(\omega, t)z$  с матрицей

$$Q(\omega, t) = \begin{bmatrix} \omega^0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega^1 & \ddots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \omega^{\rho-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \bar{b}_{m-1}(t)\omega^{\rho-1} / \bar{b}_m(t) & \omega^{\rho-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \bar{b}_0(t)\omega^{\rho-1} / \bar{b}_m(t) & 0 & \dots & \omega^{\rho-1} \end{bmatrix}.$$

$\rho$ -й

После ряда алгебраических преобразований система в новом базисе представляется как

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} R_1(\omega, t) & e_\rho e_1^T \\ R_2(\omega, t) & O_{m \times m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{G}_1(t)\omega & O_{\rho \times m} \\ O_{m \times \rho} & \bar{G}_2(t) - I_{m \times m}(\rho-1)\frac{\dot{\omega}}{\omega} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + Q^{-1}(\omega, t)\chi, \quad (12)$$

где  $z_1 \in R^\rho, z_2 \in R^m$  – компоненты вектора  $z$  (т.е.  $z = \text{col}(z_1, z_2)$ );  $R_1 \in R^{\rho \times \rho}$ ,  $R_2 \in R^{m \times \rho}$  – матричные функции, зависящие от параметров  $a_{i,j}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$ ,  $b_k, k = \overline{0, m}$  и  $\omega$ ;  $e_\rho = \text{col}(0, \dots, 0, 1)$ ,  $e_1 = \text{col}(1, 0, \dots, 0)$ ;

$$\bar{G}_1(t) = \begin{bmatrix} & \rho-1 & & & m-1 & & \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & & \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & & \\ -\bar{b}_m(t) & -\bar{b}_m(t)C_1 & -\bar{b}_m(t)C_2 & \dots & -\bar{b}_m(t)C_{n-1} & & \end{bmatrix};$$

$\bar{G}_2$  гурвицева матрица, определенная в допущении 3;  $O$  и  $I$  – нулевая и единичная матрицы соответственно. В диссертационной работе показано, что  $R_1, R_2$

имеют ограниченные нормы (в качестве нормы матрицы или вектора здесь и далее принимается  $\|\cdot\|_\infty$ ).

Важно отметить, что матрица  $\bar{G}_1(t)\omega$  является гурвицевой и имеет собственные числа, совпадающие с предельными значениям собственных чисел матрицы  $G(\omega, t)$  (11). Данное свойство используется при анализе устойчивости методом функций Ляпунова.

**Эман 3.** Вводится функция Ляпунова:

$$V = z_1^T \left( W_1^T(t) \right)^{-1} W_1^{-1}(t) z_1 + V_0, \quad (13)$$

где  $W_1$  – матрица Вандермонда, состоящая из собственных чисел матрицы  $\bar{G}_1$  такая, что  $\Lambda_1 = W_1^{-1} \bar{G}_1 W_1$ ,  $\Lambda_1 = \text{diag}\{-q_i, i = \overline{1, \rho}\}$ . Функция Ляпунова  $V_0$  представлена в допущении 3.

Отметим, что в силу определения, матрица  $W_1$  не является вырожденной. Кроме того, в силу допущений 4 и 5, а также отрицательности предельных значений корней (11), матрица  $W_1$ , ее инверсия, ее производная, взятая по времени, имеют ограниченную норму.

В диссертационной работе показано, что производная функции  $V$ , взятая с учетом (12) и допущения 3, удовлетворяет следующему неравенству:

$$\dot{V} \leq \left( \frac{\|W_1^T S_2\|^2}{\min_{i=1, m} \{J\} + (\rho - 1) \frac{\dot{\omega}}{\omega}} + \|W_1^T S_1 W_1\| + \|N_1\| - \omega \min_{i=1, \rho} \{q_i\} \right) \|W_1^{-1} z_1\|^2 + \Delta^*, \quad (14)$$

где  $\Delta^* = \frac{\|\bar{\chi}_1\|^2}{\omega \min_{i=1, \rho} \{q_i\}} + \frac{\|\bar{\chi}_2\|^2}{\left( \omega \min_{i=1, m} \{J\} + (\rho - 1) \frac{\dot{\omega}}{\omega} \right)}$ ;  $\min_{i=1, m} \{J\} \geq c_{2-}$  – минимальное соб-

ственное число матрицы  $J$ ;

$$S_1(\omega, t) = R_1^T(\omega, t) \left( W_1^T(t) \right)^{-1} W_1^{-1}(t) + \left( W_1^T(t) \right)^{-1} W_1^{-1}(t) R_1(\omega, t);$$

$$S_2(\omega, t) = \left( W_1^T(t) \right)^{-1} W_1^{-1}(t) e_\rho e_1^T + R_2^T(\omega, t) P(t);$$

$$N_1(t) = - \left( W_1^{-1}(t) \dot{W}_1(t) \right)^T - W_1^{-1}(t) \dot{W}_1(t)$$

– матричные функции, имеющие ограниченные нормы для любых  $\omega \in (\omega_{\min}, \infty)$ ,  $\omega_{\min} > 0$  и  $t \in [0, \infty)$ ;  $\bar{\chi}_1, \bar{\chi}_2$  – компоненты вектора

$$\bar{\chi} = \text{col}(\bar{\chi}_1, \bar{\chi}_2) = \begin{bmatrix} W_1^{-1} & O_{\rho \times m} \\ O_{m \times \rho} & I_{m \times m} \end{bmatrix} Q^{-1} \chi.$$

В силу ограниченности сигнала  $\chi$  и нормы матриц  $W_1^{-1}$  и  $Q^{-1}$  (допущение 5) для любых  $\omega \in (\omega_{\min}, \infty)$ ,  $\omega_{\min} > 0$  и  $t \in [0, \infty)$  величины  $\|\bar{\chi}_1\|$ ,  $\|\bar{\chi}_2\|$  ограничены.

Из полученного неравенства, ограниченности функций  $\|W_1^T S_2\|$ ,  $\|W_1^T S_1 W_1\|$ ,  $\|N_1\|$ , положительности величин  $\min_{i=1, m} \{J\}$ ,  $q_i, i = \overline{1, \rho}$  и положительности  $\dot{\omega} / \omega$  (в силу (7), (8) и (9)), а также при существенном отклонении  $\varepsilon$  от нуля следует, что существует пороговое значение  $\omega_0$ , удовлетворяющее неравенству

$$\omega_0 > \frac{\|W_1^T S_2(\omega)\|^2}{\min_{i=1, \rho} \{q_i\} \left( \min_{i=1, m} \{J\} + (\rho - 1) \frac{\dot{\omega}}{\omega} \right)} + \frac{\|W_1^T S_1(\omega) W_1\|}{\min_{i=1, \rho} \{q_i\}}, \quad (15)$$

такое, что если  $\omega \geq \omega_0$ , то гарантируется асимптотическое стремление  $\|z_1\|$  к окрестности нуля и ограниченность  $\|z_2\|$ .

Из анализа функции  $\Delta^*$ , отвечающей за радиус сходимости  $\|z_1\|$  к нулю, и структуры применяемых алгоритмов адаптации (7), (8) или (9) следует, что при увеличении амплитуды  $\omega$  величина радиуса уменьшается. Увеличение амплитуды  $\omega$  в свою очередь достигается путем увеличения коэффициента  $\gamma_i, i = \overline{1, 3}$  в алгоритмах адаптации.

При переходе в исходный базис (10), получаем, что  $e_1 = \varepsilon = z_{11}$ , где  $z_{11}$  – первая координата вектора  $z_1$ , асимптотически стремится в окрестность нуля. Следовательно, из выражений (7), (8) или (9) и функции  $\Delta^*$  следует ограниченность  $\omega$  и остальных координат вектора  $e$ .

Важно отметить, что устойчивость системы достигается только после достижения величиной  $\omega$  порогового уровня  $\omega_0$  в определенный момент времени  $t_1 \geq 0$ . Так как замкнутая система является нелинейной, то не гарантируется ограниченность ее траекторий до момента  $t_1$ . В связи с этим требуется доказательство полноты системы.

**Эман 4.** Доказывается полнота замкнутой системы на промежутке  $t \in [0, t_1]$ .

По полученным результатам было проведено моделирование системы управления неустойчивым объектом третьего порядка с относительной степенью, равной двум:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (1, 1 \sin(0,8t) + 4) x_1 + x_2 + \xi_1, \\ \dot{x}_2 &= 1,4 \cos(0,4 t) x_1 + \cos(0,5 t) x_2 + (2 + \cos(t)) u + \xi_2, \end{aligned}$$

$$\dot{x}_3 = \sin(0,1 t)x_1 + (3 + 2\cos(t))x_2 + (1 + 2\sin(0,9t))x_3 + (10 + 5\sin(0,8t))u + \xi_3$$

где  $\xi^T = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3]^T = [0 \ 0 \ 0,5\sin(t)]^T$  – возмущение. Начальные условия объекта:  $x^T(0) = [1 \ 0 \ 0]^T$ .

Закон управления (4), (5) представляется в следующем виде:

$$u = \frac{1}{b_{1\min}} (\omega^2 e_1 + 2\omega e_2),$$

где  $b_{1\min} = 0,5$ ;  $e_1 = \varepsilon = y_M - y = x_{1M} - x_1$ ;  $e_2 = x_{2M} - x_2$ .

Моделирование проводится для трех различных алгоритмов генерирования  $\omega$ :

$$\text{а) } \dot{\omega} = -0,4\omega + 110 \frac{\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2}, \quad (16)$$

$$\text{б) } \dot{\omega} = -0,4\omega + 110\varepsilon^2, \quad (17)$$

$$\text{в) } \omega = 110\varepsilon^2. \quad (18)$$

Эталонную модель зададим следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1M} &= -2x_{1M} + x_{2M}, \\ \dot{x}_{2M} &= -x_{1M} + g, \\ y_M &= x_{1M}, \end{aligned}$$

где  $g = 0,5\sin t$ .

Результаты моделирования адаптивных систем с алгоритмами адаптации (16), (17) и (18) приведены на рисунке 2. Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- все сигналы в системе ограничены;
- ошибка  $\varepsilon$  стремится к окрестности нуля;
- при увеличении амплитуды  $\omega$  уменьшается амплитуда установившейся ошибки, что видно из сравнения графиков  $\varepsilon$  и  $\omega$  на рисунках а) и б).

Таким образом, в главе проведены теоретические исследования задачи адаптивного управления по состоянию нестационарными и параметрически неопределенными линейными объектами с произвольной относительной степенью и треугольной матрицей состояния. Предлагаемый закон управления описывается уравнением (4), в котором  $\omega$  генерируется одним из алгоритмов адаптации (7), (8) или (9), и обеспечивает в замкнутой системе ограниченность всех сигналов, асимптотическое стремление ошибки  $\varepsilon$  к окрестности нулевого положения равновесия. При этом радиус окрестности может быть уменьшен произвольным образом за счет увеличения коэффициента  $\gamma$  в применяемом алгоритме адаптации.

Главная особенность предложенного алгоритма управления заключается в необходимости в настройке всего одного параметра. В этом смысле алгоритм имеет простую структуру и динамический порядок, не превышающий единицу (в

зависимости от выбранного алгоритма адаптации). Отметим, что недостатком предложенного метода является возможное усиление высокочастотных шумов в канале управления за счет введения коэффициента “сильной” обратной связи, что ограничивает его применение в практических приложениях. Решение этой проблемы выходит за рамки диссертационной работы и может стать логическим продолжением проводимых исследований.

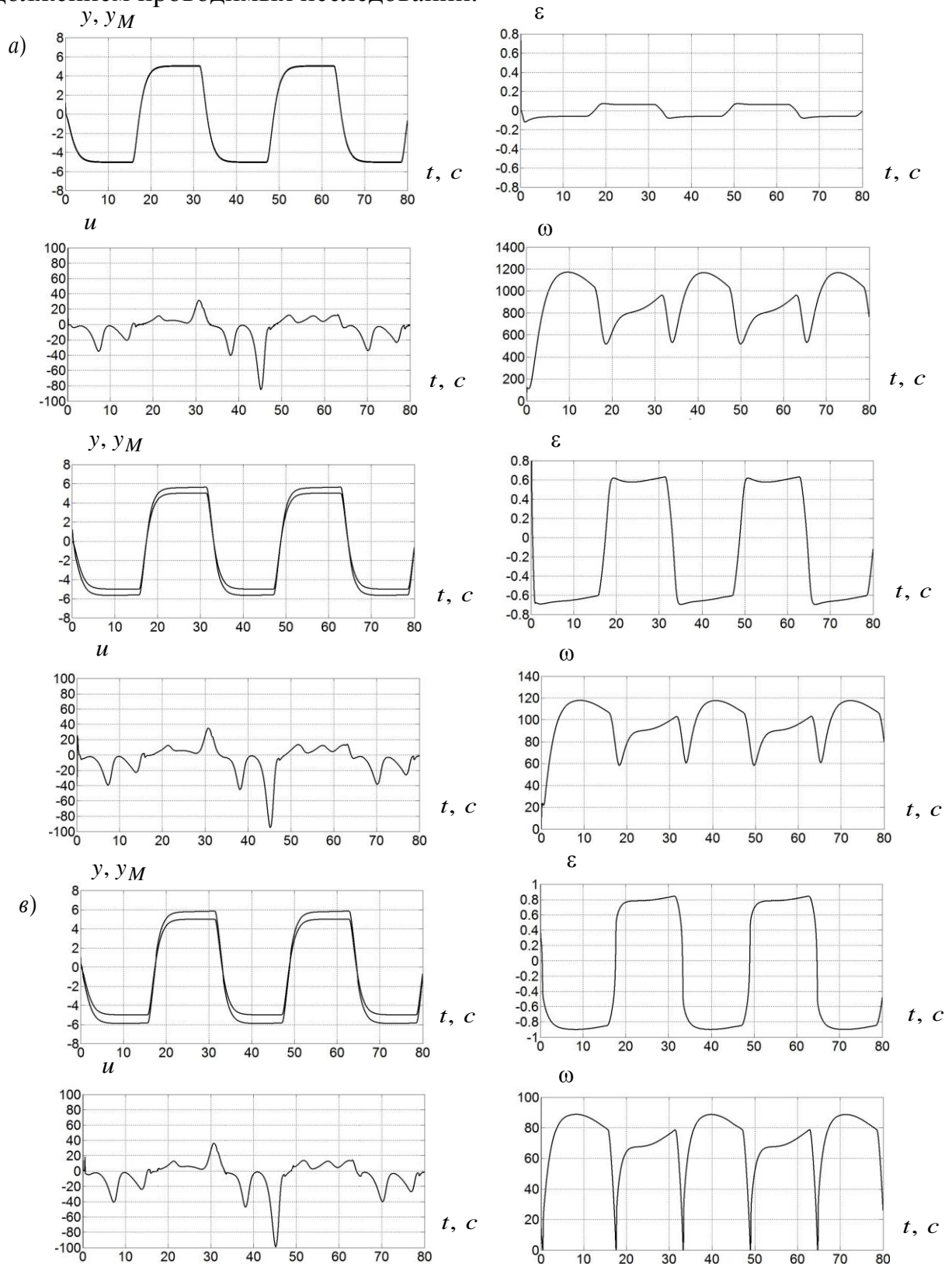


Рисунок 2 – Переходные процессы в адаптивной системе управления с: а) алгоритмом адаптации (16); б) алгоритмом адаптации (17); в) алгоритмом адаптации (18).

**В третьей главе** рассматривается и решается задача управления крутящим моментом инжекторного ДВС. При решении задачи применяется подход, разработанный в главе 2.

Цель управления заключается в обеспечении выполнения следующего целевого неравенства в условиях параметрической и функциональной неопределенности характеристик двигателя:

$$|M_{жс}(t) - M(t)| \leq \Delta, \quad \forall t \geq T, \quad (19)$$

где  $M_{жс}$  – желаемое значение крутящего момента;  $M$  – усредненное за один цикл работы ДВС значение крутящего момента;  $T$  – время настройки системы;  $\Delta$  – допустимая максимальная ошибка слежения (на практике принимается  $\Delta = 20H \cdot m$ ).

Управление крутящим моментом осуществляется с помощью дроссельной заслонки, расположенной во впускном коллекторе и регулирующей поток воздуха в цилиндры. При этом в задаче требуется учесть динамику электропривода заслонки. Таким образом, сигналом управления является желаемое значение угла поворота заслонки  $\alpha^*$ , задаваемое электроприводу. Предполагается, что другие системы управления ДВС (впрыском топлива, углом опережения зажигания и т.п.) работают в штатном режиме.

В целях синтеза управления строится математическая модель двигателя, которая связывает сигнал управления  $\alpha^*$  с регулируемой переменной  $M$  и состоит из уравнения электропривода заслонки, уравнения давления воздуха во впускном коллекторе и уравнения крутящего момента (см. ссылки в [3]).

**Уравнение электропривода дроссельной заслонки.** В первом приближении модель привода представляется в виде аperiodического звена первого порядка:

$$\dot{\alpha} = -\frac{1}{T_d} \alpha + \frac{K_d}{T_d} \alpha^*, \quad (20)$$

где  $T_d$  – постоянная времени, характеризующая доминирующую динамику привода,  $K_d$  – коэффициент передачи модели. В работе предполагается, что параметры  $T_d$ ,  $K_d$  положительны и известны.

**Уравнение давления воздуха во впускном коллекторе.** Модель базируется на уравнении Менделеева–Клапейрона:

$$\dot{P} + \eta_c(P, \omega) \frac{V_d \omega}{4\pi V_m} P = \frac{RT_m}{V_m} \frac{\pi D^2}{4} \eta_t \varphi_1(P) \varphi_2(\alpha), \quad (21)$$

где  $P$  – давление воздуха;  $\eta_c$  – эффективность наполнения цилиндра;  $V_d$  – объем двигателя;  $\omega$  – скорость вращения коленчатого вала;  $V_m$  – объем впускного коллектора;  $R$  – удельная газовая постоянная для воздуха;  $T_m$  – температура воз-

духа во впускном коллекторе;  $\eta_t$  – эффективность дроссельной заслонки;  $\varphi_1(P)$  – ограниченная функция;  $D$  – диаметр патрубка с дроссельной заслонкой;

$$\varphi_2(\alpha) \approx \left( 1 - \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\alpha_0)} \right); \quad (22)$$

$\alpha_0$  – угол дроссельной заслонки, при котором она полностью перекрывает отверстие коллектора (известная величина).

**Уравнение крутящего момента.** Крутящий момент ДВС рассчитывается из разности момента, развиваемого валом (эффективного момента) и момента сил сопротивления:

$$M = \frac{V_d Q_{HV}}{4\pi R T_m F_s} \eta_f(\omega) \varphi_3(\lambda) \varphi_4(\alpha_{ign}) P - M_F \quad (23)$$

где  $\eta_f$  – эффективность сгорания топлива;  $F_s$  – оптимальное соотношение воздух/топливо (В/Т) в цилиндрах;  $Q_{HV}$  – удельная теплота сгорания топлива;  $\lambda$  – коэффициент избытка воздуха;  $\alpha_{ign}$  – угол опережения зажигания;  $\varphi_3(\lambda)$ ,  $\varphi_4(\alpha_{ign})$  – эффективности момента по коэффициенту избытка воздуха и углу опережения зажигания соответственно;  $M_L$  – момент сил трения, определяемый эмпирической зависимостью

$$M_F = c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2, \quad (24)$$

$c_0, c_1, c_2$  – постоянные коэффициенты.

С учетом выражений (20) – (24) модель момента преобразуется к следующей компактной форме:

$$\begin{cases} \dot{x} = \bar{A}_c x + \bar{B}_c \alpha^* + \xi, \\ M = x_1, \end{cases} \quad (25)$$

где  $x = [M \ \alpha]^T$ ,

$$\bar{A}_c = \begin{bmatrix} (\dot{C}_c / C_c + A_c) & C_c B_c \varphi_2(\alpha) / \alpha \\ 0 & -1 / T_d \end{bmatrix}, \bar{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ K_d / T_d \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} (\dot{C}_c / C_c + A_c) D_c - \dot{D}_c \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_c = -\eta_c(P) \frac{V_d \omega}{4\pi V_m}, B_c = \eta_t(P) \frac{R T_m}{V_m} \frac{\pi D^2}{4} \varphi_1(P), C_c = \frac{V_d Q_{HV}}{4\pi R T_k F_s} \eta_f(\omega) \varphi_3(\lambda) \varphi_4(\alpha_{ign})$$

$$, D_c = c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2.$$

Так как функции  $A_c, B_c, C_c$  и  $D_c$  непрерывны, дифференцируемы, ограничены и имеют ограниченные производные (что справедливо для физической системы), а функция  $\varphi_2(\alpha) / \alpha$  непрерывна, дифференцируема и положительна, то



модель (25) можно отнести к классу моделей (1), что позволяет в дальнейшем задействовать алгоритмы управления, разработанные в главе 2.

В целях моделирования производится идентификация всех статических функций и параметров модели (кроме известной функции  $\Phi_2(\alpha)$  и параметров  $K_d, T_d$ ). Для этого с помощью метода Эйлера модель (25) представляется в дискретной форме с переменным интервалом дискретизации, соответствующим одной четверти оборота коленчатого вала двигателя. В ходе идентификации задействован метод наименьших квадратов и использованы данные, полученные с помощью теста автомобиля Chevrolet Tahoe с восьмицилиндровым двигателем объемом 5,7 литра.

Идентифицированные функции модели (25) сведены в таблицу 1.

Результаты проверки модели приведены на рисунке 3, где представлены экспериментальные ( $P_{\text{экс}}$  и  $M_{\text{экс}}$ ) и моделируемые ( $P_{\text{мод}}$  и  $M_{\text{мод}}$ ) процессы изменения давления во впускном коллекторе и развиваемого момента соответственно. Из результатов видно (правые рисунки), что максимальная ошибка модели по давлению не превышает 3% от амплитуды давления, максимальная ошибка по моменту не превышает 5%. Таким образом, качество модели является приемлемым, что позволяет синтезировать управление, удовлетворяющее заданной точности по моменту.

Регулятор строится на основе подхода, разработанного в главе 2, и заключается в замыкании объекта настраиваемой “сильной” обратной связью, обеспечивающей устойчивость замкнутой системы и экспоненциальное стремление ошибки управления в окрестность нуля.

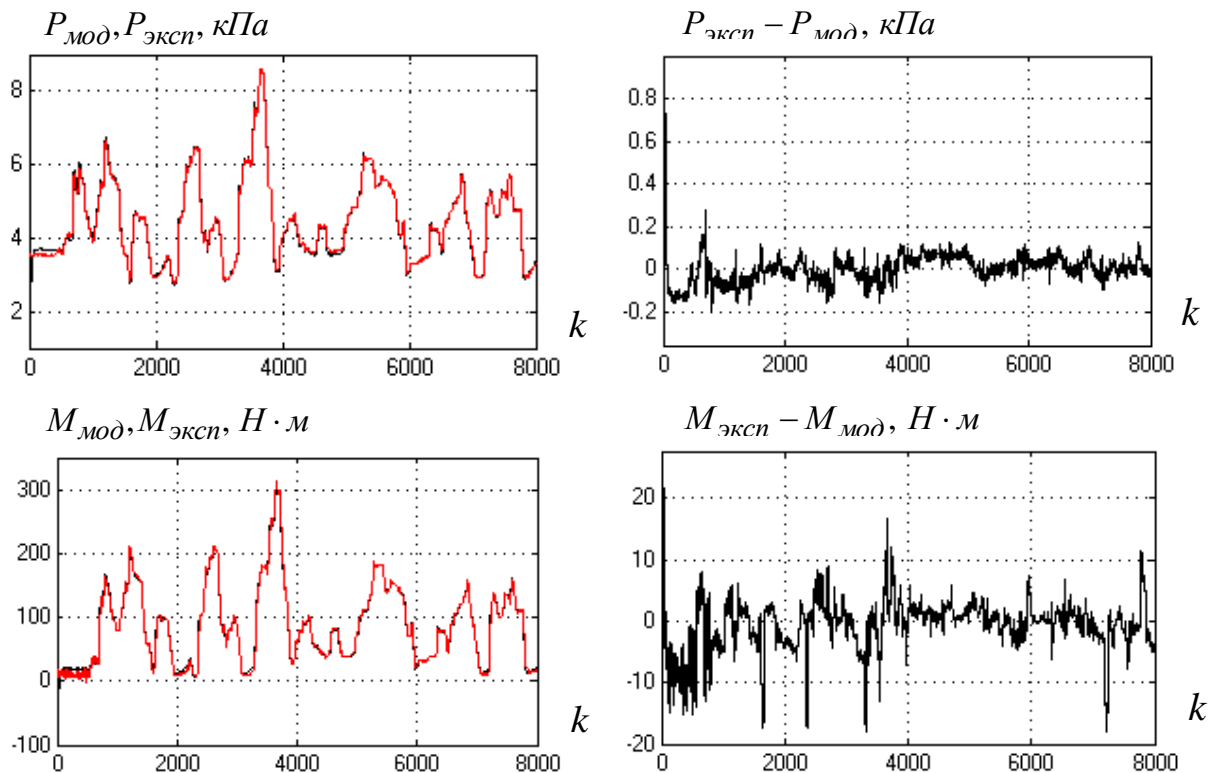


Рисунок 3 – Результаты проверки модели момента.

В целях задания показателей качества замкнутой системы в установившемся режиме формируется эталонная модель вида

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ж1} \\ \dot{x}_{ж2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho_1 & 1 \\ -\rho_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ж1} \\ x_{ж2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_0 \end{bmatrix} M^*, \\ M_{жс} = x_{ж1} \end{cases} \quad (26)$$

где  $M^*$  – сигнал задания;  $x_{ж1}$ ,  $x_{ж2}$  – переменные вектора состояния эталонной модели;  $\rho_0 > 0, \rho_1 > 0$  – параметры эталонной модели, определяющие динамику замкнутой системы после настройки параметра регулятора.

Далее вводится ошибка управления  $e = x_{жс} - x$ , после дифференцирования которой с учетом (25) и (26) строится модель ошибки:

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} (\dot{C}_c / C_c + A_c) & C_c B_c \varphi_2(\alpha) / \alpha \\ 0 & -1 / T_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ K_d / T_d \end{bmatrix} \alpha^* + \delta \quad (27)$$

где

$$\delta = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_0 \end{bmatrix} M^* - \begin{bmatrix} \rho_1 + (\dot{C}_c / C_c + A_c) & -1 + C_c B_c \varphi_2(\alpha) / \alpha \\ \rho_0 & -1 / T_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ж1} \\ x_{ж2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (\dot{C}_c / C_c + A_c) D_c - \dot{D}_c \\ 0 \end{bmatrix}$$

– ограниченный сигнал.

Выражение (27) представляет собой частный случай модели (10). В рамках этого выражения закон управления формируется как

$$\alpha^* = r^2 e_1 + C_1 r e_2, \quad (28)$$

где  $r$  формируется алгоритмом адаптации вида

$$\dot{r} = -\sigma r + \gamma e_1^2, \quad (29)$$

в котором  $\gamma > 0, \sigma > 0$  – постоянные параметры.

Для проверки работы системы управления в работе проведено моделирование. Параметры и функции модели (24), полученные входе идентификации, а также параметры регулятора приведены в таблице 1.

Входные сигналы модели принимают следующие значения:  $\alpha_{ign} = 30^\circ, \lambda = 1$ .

Параметры регулятора (28), (29) и эталонной модели (26) имеют следующие значения:  $\gamma = 0,02, \sigma = 0,01, r(0) = 0, \rho_0 = 6, \rho_1 = 5$ .

Параметры электропривода дроссельной заслонки имеют следующие значения:  $T_d = 0,3, K_d = 1$ .

В канале измерения момента добавлен аддитивный шум мощностью 0,00000001 с интервалом дискретизации 0,001 с.

Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

Таблица 1 – Параметры модели.

Параметр	Значение параметра / вид функции
Модель (24)	
$\alpha_0$	$3,5 \times 10^{-2}$
$A_c$	$(1,02 \times 10^{-1} - (1,9 \times 10^{-3})P + (2,9 \times 10^{-6})P^2 + (3,68 \times 10^{-8})P^3 - (1,18 \times 10^{-4})\omega + (4,66 \times 10^{-8})\omega^2 - (1,01 \times 10^{-11})\omega^3 + (5,21 \times 10^{-7})P\omega - (6,89 \times 10^{-9})P^2\omega + (2,2 \times 10^{-9})P\omega^2) / \tau$
$B_c$	$4,745 + (7,66 \times 10^{-3})P - (2,89 \times 10^{-3})P^2 + (8,09 \times 10^{-5})P^3 - (5,37 \times 10^{-7})P^4$
$C_c$	$162,93 - (5,61 \times 10^{-1})\alpha_{ign} + (9,24 \times 10^{-5})\alpha_{ign}\omega + (6,13 \times 10^{-1})\alpha_{ign}\lambda - (1,21 \times 10^{-3})\alpha_{ign}^2 - (1,75 \times 10^{-2})\omega + (3,77 \times 10^{-2})\omega\lambda - (7 \times 10^{-6})\omega^2 - 189,82\lambda + 57,98\lambda^2$
$D_c$	$106,72 + (2,36 \times 10^{-2})\omega - (8,32 \times 10^{-6})\omega^2$
$\tau$	$15 / \omega$

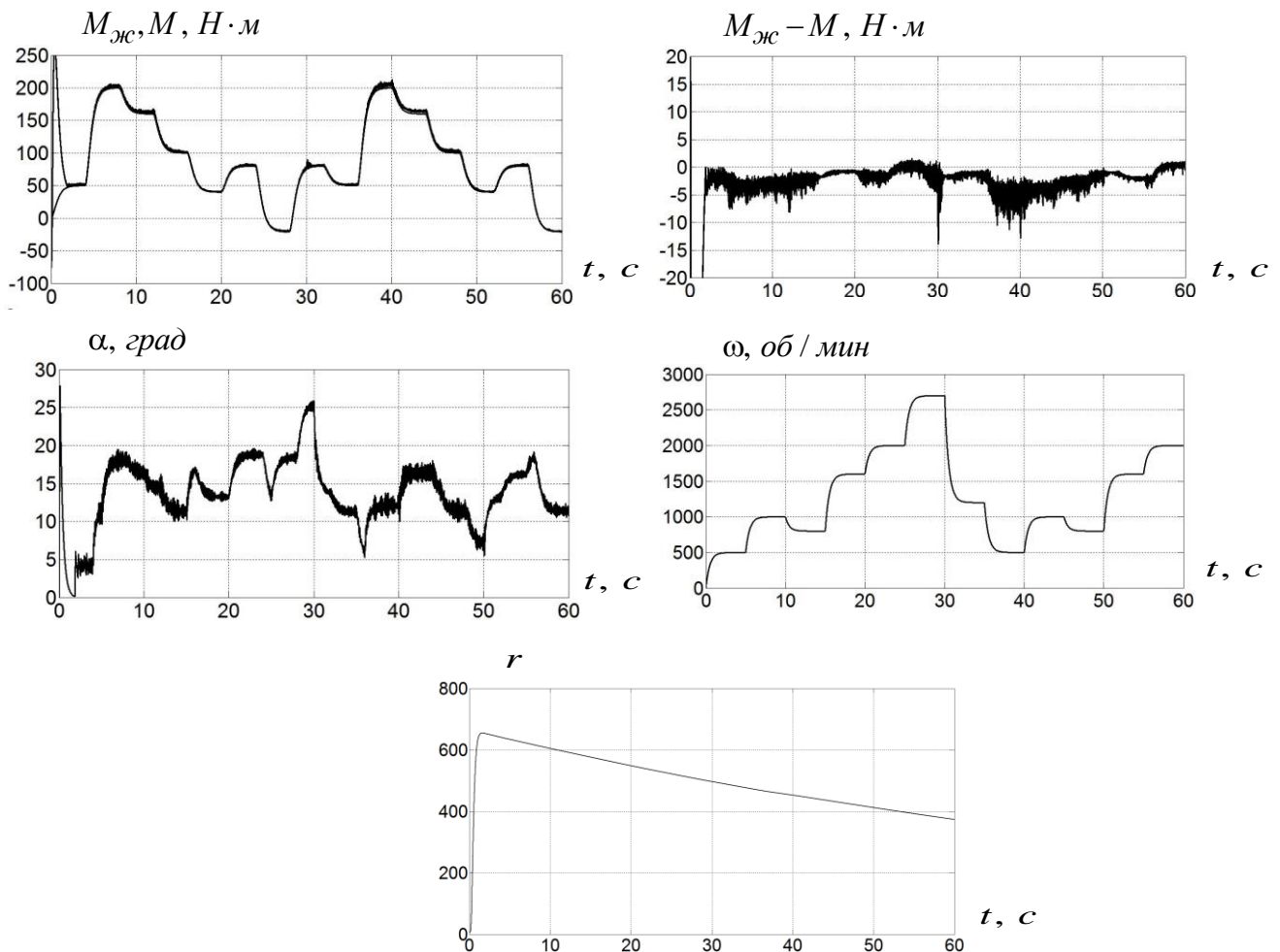


Рисунок 4 – Результаты моделирования системы управления крутящим моментом, замкнутой адаптивным регулятором.

Из результатов моделирования видно, что при существенном изменении скорости вращения двигателя регулятор обеспечивает ограниченность всех сигналов и стремление ошибки к ограниченной окрестности нуля.

Радиус окрестности существенно ниже ошибки управления  $20 \text{ Н·м}$ , что дает основания для дальнейшей практической реализации полученного алгоритма.

Отметим также, что значения положения дроссельной заслонки  $\alpha$  соответствуют физическим значениям, получаемым на практике.

**В четвертой главе** предлагается решение задачи адаптивного трехканального управления температурой и влажностью воздуха и концентрацией углекислого газа в теплице. В основе синтеза регулятора лежит параметрически неопределенная нелинейная модель микроклимата теплицы, приведенная в [1], и теоретические исследования, результаты которых изложены во второй главе.

Задача управления заключается в достижении следующих целевых неравенств в условиях нелинейности и неопределенности динамики объекта, а также возмущений, действующих на объект:

$$\left| T_{in\_des}(t) - T_{in}(t) \right| \leq \Delta_1, \quad \forall t \geq T_1, \quad (30)$$

$$\left| w_{in\_des}(t) - w_{in}(t) \right| \leq \Delta_2, \quad \forall t \geq T_2, \quad (31)$$

$$\left| X_{in\_des}(t) - X_{in}(t) \right| \leq \Delta_3, \quad \forall t \geq T_3, \quad (32)$$

где  $T_{in}$ ,  $w_{in}$ ,  $X_{in}$  – текущие значения температуры, влажности и концентрации  $\text{CO}_2$  соответственно;  $T_{in\_des}$ ,  $w_{in\_des}$ ,  $X_{in\_des}$  – желаемые значения соответствующих регулируемых переменных;  $\Delta_1, \dots, \Delta_3$  – максимальные ошибки системы управления по соответствующим каналам;  $T_1, \dots, T_3$  – время настройки системы по соответствующим каналам.

Сигналы управления для каждого канала зависят от соотношения текущего и желаемого значений регулируемых переменных и сведены в таблицу 2.

Особенностью синтезируемой многоканальной системы является вероятность конфликтов в каналах управления при одновременной активизации в них сигналов управления форточкой. Для разрешения этих конфликтов формируется обобщенный сигнал управления форточкой с приоритетами открытия ее по каждому каналу:

$$u_v^* = \alpha_1 u_{v\_t}^* + \alpha_2 u_{v\_w}^* + \alpha_3 u_{v\_CO2}^*, \quad (33)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – положительные весовые коэффициенты приоритетов управления форточкой, задаваемые пользователем и удовлетворяющие условию  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ .

В целях синтеза управления строится модель микроклимата теплицы, связывающая регулируемые переменные с сигналами управления и сигналами возмущений. Модель строится с учетом следующих допущений:

**Допущение 1:** для каждого момента времени переменные состояния модели равны во всех точках пространства теплицы;

**Допущение 2:** теплообмен с окружающей средой осуществляется равномерно по всей поверхности стен, трубопроводов системы отопления и потолка теплицы;

**Допущение 3:** в системе отсутствует дренаж (рассматривается закрытая система);

**Допущение 4:** количество теплоты, выделяемое светильниками и проводниками с током, пренебрежимо мало.

Таблица 2 – Режимы работы каналов и сигналы управления.

Режим	Сигнал управления	Наименование сигнала управления	Единицы измерения
$T_{in} \leq T_{in\_des}$	$T_h^*$	Температура нагревательных элементов (труб) или воды в системе отопления теплицы	$K$
$T_{in} > T_{in\_des}$	$u_{v\_t}^*$	Уставка электропривода форточки (по каналу температуры)	$рад$
$w_{in} \leq w_{in\_des}$	$Q_f^*$	Желаемая производительность системы туманообразования	$кг/с$
$w_{in} > w_{in\_des}$	$u_{v\_w}^*$	Уставка электропривода форточки (по каналу влажности)	$рад$
$X_{in} \leq X_{in\_des}$	$U_c^*$	Производительность системы подкормки $CO_2$	$кг/с$
$X_{in} > X_{in\_des}$	$u_{v\_x}^*$	Уставка электропривода форточки (по каналу концентрации $CO_2$ )	$рад$

В соответствии с каналами управления объект разбивается на три подсистемы, для каждой из которых строится модель. В диссертации показано, что для каждого канала управления и режима работы системы управления модель может быть представлена в следующей форме:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a(t)x_1 + b(x_1, t)x_2 + \xi(t), \\ \dot{x}_2 = -cx_2 + du, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (34)$$

где  $a(t), b(x_1, t)$  – ограниченные положительные величины, зависящие от физических констант, геометрических параметров теплицы и возмущений;  $c, d$  – положительные постоянные параметры, зависящие от физических констант и геометрических параметров теплицы;  $x_1$  – переменная состояния, соответствующая переменным  $T_{in}, w_{in}$  или  $X_{in}$ ;  $x_2$  – переменная состояния, соответствующая  $T_h$  (температура почвы),  $Q_f$  (температура нагревательных элементов (труб)),  $U_c$  (

обогреваемый объем теплицы) или  $u_v$ ;  $u$  – переменная управления;  $y$  – регулируемая переменная;  $\xi(t)$  – переменная, зависящая от возмущений.

В ходе детального анализа модели каждого канала выявлены следующие свойства обобщенной формы (34):

1. Параметры  $a(t), b(x_1, t), c, d$  и возмущение  $\xi(t)$  неизвестны, что мотивирует необходимость применения методов адаптивного управления;
2. Переменные состояния модели доступны прямому измерению;
3. Все переменные параметры модели представлены непрерывными и дифференцируемыми функциями.

Таким образом, перечисленные свойства модели (34) позволяют отнести ее к классу моделей (1) и применить разработанный во второй главе метод управления.

В целях синтеза управления формируется эталонная модель, характеризующая динамику переменной  $x_1$  в установившемся режиме:

$$\dot{x}_{M1} = -\lambda_1 x_{M1} + \lambda_1 g, \quad (35)$$

где  $g$  – задающее воздействие;  $\lambda_1$  – положительная константа, определяющая быстродействие системы после настройки адаптивной системы.

Далее формируется ошибка управления  $e_1 = x_{M1} - x_1$  и с учетом (34), (35) строится модель ошибки:

$$\dot{e}_1 = a(t)e_1 - b(x_1, t)U + \zeta_1 \quad (36)$$

где  $\zeta_1 = -\xi + (-\lambda_1 + a(t))x_{M1} + \lambda_1 g$  – ограниченный сигнал.

Так как величина  $b(x_1, t)$  положительна и ограничена, то выражение (36) относится к классу моделей ошибки (10), в рамках которой синтезирован регулятор вида

$$U = \omega_1 e_1, \quad (37)$$

$$\dot{\omega}_1 = -\sigma_1 \omega_1 + \gamma_1 e_1^2, \quad (38)$$

где  $\gamma_1, \sigma_1$  – положительные константы.

Далее, принимаем (38) в качестве задающего воздействия, которое необходимо обеспечить искомым законом управления. С этой целью и с учетом (38) вводится эталонная модель, характеризующая динамику переменной  $x_2$  в установившемся режиме

$$\dot{x}_{M2} = -\lambda_2 x_{M2} + \lambda_2 U, \quad (39)$$

где  $\lambda_2$  – положительный параметр эталонной модели. Далее формируется ошибка управления  $e_2 = x_{M2} - x_2$  и с учетом второго уравнения (34) и соотношения (38) строится модель ошибки:

$$\dot{e}_2 = -c e_2 - d u + \zeta_2$$

где  $\zeta_2 = (-\lambda_2 + c)x_{M2} + \lambda_2 \omega_1 e_1$ . Поскольку доказанные во второй главе свойства замкнутой системы, предполагают ограниченность сигналов  $e_1$  и  $\omega_1$ , то величи-

на  $\zeta_2$  ограничена. Следовательно, принимая во внимание положительность  $d$ , искомый закон управления, созданный на основе последнего соотношения, представляется как

$$u = \omega_2 e_2, \quad (40)$$

$$\dot{\omega}_2 = -\sigma_2 \omega_2 + \gamma_2 e_2^2, \quad (41)$$

где  $\gamma_2, \sigma_2$  – положительные константы.

Окончательно, синтезированный регулятор (35), (37)-(39), (40), (41) применяется для каждого канала в рамках соответствующей модели микроклимата.

В целях проверки работоспособности системы управления микроклиматом проведено моделирование. Параметры теплицы как объекта управления приведены в главе 4 диссертации. Результаты моделирования системы управления представлены на рисунке 5.

Результаты моделирования показывают, что цель управления микроклиматом достигается с приемлемой точностью, несмотря на возмущения и взаимное влияние друг на друга каналов управления.

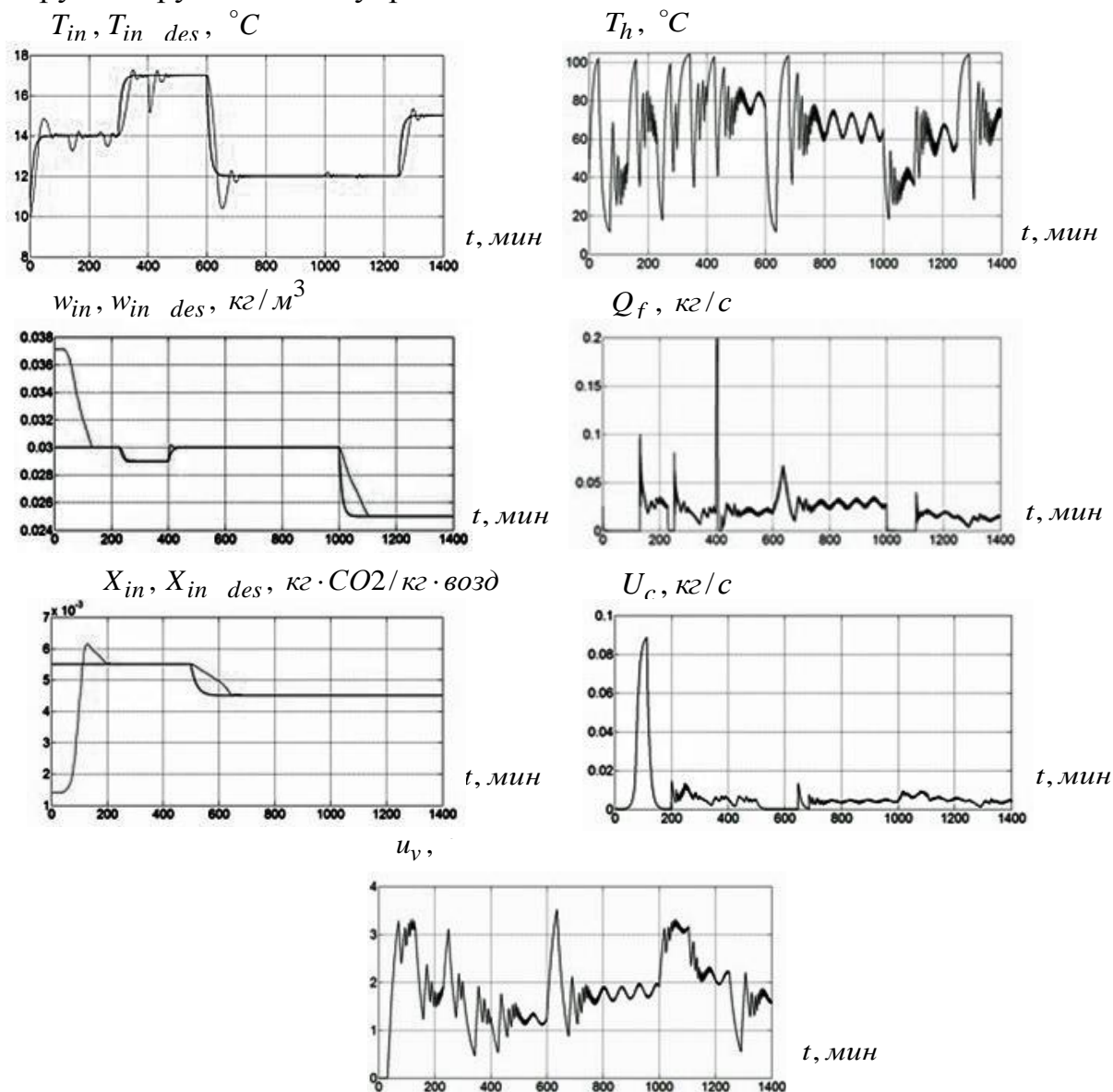


Рисунок 5 – Переходные процессы в адаптивной системе управления микроклиматом парниковой теплицы.

### **Заключение**

В диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработан метод адаптивного управления нестационарными параметрически неопределенными линейными объектами с треугольной матрицей состояния и произвольной относительной степенью.
2. Построена математическая модель крутящего момента инжекторного ДВС, неизвестные параметры и статические функции которой идентифицируются на основе алгоритма наименьших квадратов и данных, полученных в ходе тестирования автомобиля Chevrolet Tahoe с 8–и цилиндровым V–образным двигателем;
3. На основе разработанного метода синтезирован алгоритм адаптивного управления крутящим моментом ДВС;
4. Построена математическая модель микроклимата парниковой теплицы, ориентированная на синтез трехканального управления температурой, влажностью воздуха, а также концентрацией CO<sub>2</sub> в парниковой теплице;
5. На основе разработанного метода получен алгоритм адаптивного трехканального управления температурой и влажностью воздуха и концентрацией CO<sub>2</sub> в парниковой теплице.

### **Публикации по теме диссертации**

Публикации в журналах из перечня ВАК:

1. Лызлова, М. В. Адаптивное управление микроклиматом в теплицах [Текст] / Д.Н. Герасимов, М.В. Лызлова // Известия РАН. Теория и системы управления . - 2014. - № 6. - С. 124–135. - 0,75/0,35 п.л.
2. Лызлова, М. В. Простые алгоритмы адаптивного и робастного управления классом линейных объектов с переменными параметрами [Текст] / Д. Н. Герасимов, В. О. Никифоров, М. В. Лызлова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2015. - Т. 58, № 5. - С. 351 – 361. - 0,69/0,35 п.л.
3. Лызлова, М. В. Алгоритм адаптивного управления крутящим моментом инжекторного двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Д.Н. Герасимов, М.В. Лызлова, Ф.Л. Могилевцев, В.О. Никифоров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2015. - Том15. №4. - С. 623–631. - 0,56/0,28 п.л.

Прочие публикации:

4. Lyzlova, M.V. Simple Adaptive and Robust Control for a Class of Time Varying Systems [Text] / D. N. Gerasimov, M.V. Lyzlova, V.O. Nikiforov // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems, IET. – 2015. -P. 521-526. - 0,38/0,19 п.л.