

## Система ГАММА-1РС для синтеза регуляторов многомерных систем

**Аннотация.** Описывается программное обеспечение для разработки алгоритмов автоматизации.

### Введение

Современные технологии автоматизации включают, наряду с аппаратными и программными средствами, реализующими алгоритмы автоматизации, программные средства для разработки этих алгоритмов.

Простейшие из этих алгоритмов П-, ПИ- и ПИД-регуляторы во многих случаях не обеспечивают требуемую точность регулирования динамических процессов управления. Кроме того, часто динамические объекты (процессы) управления являются многомерными (имеют несколько входов/выходов), и поэтому необходимо учитывать взаимовлияние входов и выходов. В противном случае указанные простейшие алгоритмы управления не обеспечивают даже устойчивости системы управления.

Для повышения точности управления либо учета взаимовлияния каналов управляемого процесса используют сложные алгоритмы управления, которые строятся с помощью различных методов современной теории управления, например, модального,  $H_\infty$ -субоптимального, а также адаптивного (если параметры управляемого процесса неизвестны) управления. Известный коммерчески доступный пакет MATLAB [1] представляет собой ПО для реализации методов теории управления.

Инженер-разработчик систем автоматического управления, который хотел бы воспользоваться этим пакетом для построения алгоритмов управления, столкнется с целым рядом трудностей. Главная из этих трудностей состоит в следующем: результатом деятельности инженера-разработчика является обеспечение требований к показателям точности и качества: установившейся ошибки, времени регулирования, перерегулированию и т.д., а современная теория управления исходит из других показателей, например, значений корней характеристического полинома системы управления,  $H_\infty$  нормы ее передаточной матрицы и т.д. Еще одной трудностью использования пакета MATLAB, разработанного в университетах и для университетов, является необходимость фундаментальных знаний теории управления у инженера-разработчика.

Эти трудности преодолеваются системой ГАММА-1РС и пакетом программ АДАПЛАБ – ПО, предназначенным для инженеров – разработчиков систем автоматизации. Инженер (пользователь) указывает номер директивы (программы), решающей его задачу, вводит по запросу ЭВМ (типа IBM PC и совместимых с ней) исходные данные (модель управляемого процесса, возмущения, значения показателей точности и качества) и получает результат в виде алгоритма управления с характеристиками его использования, отраженными в таблицах и графиках процесса управления с этим алгоритмом.

Система ГАММА-1РС и пакет программ АДАПЛАБ используют современную теорию управления, но она скрыта от пользователя.

Системы семейства ГАММА развиваются с 60 годов. Публикации о системах ГАММА-1, ГАММА-1М, ГАММА-1РС относятся к 1975, 1987 и 1991 гг. соответственно. Эти системы использовались для синтеза алгоритмов управления: а) гироскопическими платформами, б) промышленным коллектором газодобывающего предприятия, в) системами электроприводов прокатных станков и т.д.

Работа над пакетом программ АДАПЛАБ ведется с 1991 г. Пакет является АДАПтивной ЛАБораторией, предназначенной для моделирования процессов идентификации и адаптивного управления с целью определения настраиваемых параметров алгоритмов идентификации и адаптации<sup>1</sup>.

Рассмотрим подробнее особенности системы ГАММА-1РС.

### Классы решаемых задач

Задачи, решаемые системой ГАММА-1РС можно разделить на три типа: синтез регуляторов, анализ свойств и характеристик процессов, преобразование видов и форм моделей процессов.

**Задачи синтеза** формируются в зависимости от целей управления либо моделей системы управления. Цели управления (называемые далее показателями) могут быть нескольких видов: *аксиоматические* показатели (значение квадратичного функционала, корни характеристического полинома либо  $H_\infty$ -норма передаточной функции) и *инженерные* показатели (установившиеся ошибки по каждой регулируемой переменной, время регулирования и перерегулирование по этим переменным и т.д.). Модели системы управления формируются в зависимости от вида объекта (некоторые его разновидности будут приведены ниже).

**Задачи анализа** определяются исследуемыми свойствами (устойчивость, управляемость, наблюдаемость, грубость) и характеристиками (точность, качество) процессов.

**Задачи преобразования** зависят от вида (алгебраические, обыкновенные дифференциальные, разностные уравнения) и описания (по переменным состояниям (форма Коши), по физическим переменным (форма Лагранжа), форма “вход-выход”) моделей объекта и регулятора.

Список директив (программ), решающих эти задачи, приведен в таблице.

Таблица

№ директивы	Название директивы (класса задачи)
-------------	------------------------------------

<sup>1</sup> Статью, посвященную пакету АДАПЛАБ, читайте в №3 2003 г. журнала “Автоматизация в промышленности”

<i>Синтез регуляторов</i>	
111	Аналитическое конструирование регуляторов (АКоР)
112	АКоР с производными по управлению в функционале качества
113	Оптимальная система с наблюдателем (минимально-фазовый объект)
131	$H_{\infty}$ -субоптимальное управление
141 (1С111)	Точное управление объектом первого вида
142 (1С018)	Точное управление объектом второго вида
142.1 (1С008)	Точное управление объектом второго вида при заданной обобщенной частоте среза
143	Точное управление объектом третьего вида
144	Точное управление объектом общего вида
146 (1С014)	Точное слежение в системе с объектом второго вида
<i>Анализ</i>	
211	Устойчивости
221	Управляемости
221.1	Наблюдаемости
231	Грубости (определение запасов устойчивости)
241	Точности и качества
242	Установившейся точности
243	Точности и качества системы с цифровым регулятором
<i>Преобразования</i>	
311	Модели, заданной в форме Лагранжа, к форме Коши
312	Модели, заданной в форме Коши, к форме "вход-выход"
313	Непрерывной модели, заданной в форме Коши, к дискретной форме Коши

### Архитектура системы

Система ГАММА-1РС состоит из среды USER-ENV, в которой работает инженер-разработчик систем автоматизации (пользователь), и средств для модернизации и расширения этой среды инженером-исследователем, глубоко знающим теорию управления.

**Среда пользователя (USER-ENV)** состоит из директив, каждая из которых является совокупностью программных средств, обеспечивающих ввод исходных данных, решение задачи и вывод результатов, в зависимости от класса решаемой задачи (синтез, анализ, преобразование модели), структуры объекта (минимально- или неминимально-фазовый и т.д.), вида возмущений и цели управления (технических и других показателей). Директива состоит из программ интерфейса и программ для вычислений.

Для работы в USER-ENV пользователь указывает номер директивы и затем по запросу системы вводит на естественном языке исходные данные: дифференциальные уравнения объекта, границы возмущений, допуска на технические показатели и т.д. После ввода исходных данных задача синтеза решается автоматически (без участия пользователя). Результатом работы ГАММА-1РС являются дифференциальные либо разностные уравнения регулятора, а также графики процессов управления. В процессе решения задачи могут быть выведены (по желанию пользователя) промежуточные результаты.

**Средства инженера-исследователя.** Расширение возможностей среды USER-ENV осуществляется посредством добавления новых директив инженером-исследователем. Создание новых директив обеспечивается:

- *средством* регистрации *типов данных*, используемых в системе, которые позволяют создавать новые типы данных, если они будут необходимы для создания новых директив;
- *языком ДИАЛОГ*, предназначенным для создания интерфейса директивы. С системой поставляется интерпретатор языка, содержащий средства: работы с БД, экранного ввода, редактирования и преобразования данных, вводимых пользователем во внутреннее представление системы;
- *языком ИНСТРУМЕНТ*, предназначенным для построения расчетных частей директив. Интерпретатор этого языка вместе со средствами отображения хода выполнения директивы включен в оболочку системы;
- *модулями и архивом описания модулей*, используемых системой. Архив позволяет добавлять новые модули, если поставляемых с системой окажется недостаточно для реализации новых директив.

Кроме того, эти средства можно рассматривать как инструмент работы инженера-исследователя, в случае, если потребуются решать задачи, не обеспеченные системой. Используя эти средства, он может работать с рассматриваемой системой, подобно тому как он бы делал это в MATLAB [1].

**Типы данных. Средства создания новых типов данных.** В отличие от MATLAB система ГАММА-1РС поддерживает типы данных, подобные данным системы  $X_{\text{math}}$  [2], хотя типы данных, реализованные в MATLAB и  $X_{\text{math}}$  более мощные, чем в системе ГАММА-1РС. Интерпретатор ИНСТРУМЕНТ не позволяет выполнять вычислительные операции над данными (эти операции выполняются модулями). Характерная особенность системы ГАММА-1РС – возможность создавать новые типы данных. Главная цель создания новых типов данных – упрощение процесса ввода данных пользователем.

Типы данных, используемые в системе, подразделяются на три вида: базовые, производные и составные. К базовым типам относятся: логический, число, вектор, матрица, полиномиальная матрица, вектор функций времени. Производные и составные типы данных образуются на основе базовых типов данных.

Каждый тип данных в системе характеризуется: именем типа, форматом представления данных, расширением имени файла для сохранения данных в пользовательском формате в БД, названием и транслятором типа.

*Формат представления данных.* Для каждого базового типа определен свой формат представления данных. Передача данных между модулями системы осуществляется через файлы, их имена автоматически генерируются системой. Отдельный файл содержит данные базового или производного типов в определенном формате (формат представления данных производных типов определяется соответствующим базовым типом). Переменная составного типа данных связывается с несколькими файлами, в каждом из которых хранятся элементы его базового типа.

*Расширение файла для сохранения данных.* Данные (за исключением данных логического типа) могут быть сохранены в пользовательском формате в БД для дальнейшего использования. Для каждого типа данных можно определить расширение, которое будет добавляться к имени файла при сохранении данных. Используя эти расширения, интерпретатор языка ДИАЛОГ при чтении данных из БД выполняет выборку данных по соответствующему типу.

*Название типа* – информативное сообщение, которое выводится на экран монитора при работе пользователя с данными.

*Транслятор типа* определяет процедуру преобразования данных из пользовательского формата во внутреннее представление системы. На данный момент в системе представлены четыре транслятора:

- 1) *логических значений*;
- 2) *массивов*, используется для данных следующих типов: число, вектор, матрица и полиномиальная матрица, а также для производных типов, созданных на основе указанных;
- 3) *уравнений*, используется для составных типов данных: дифференциальные уравнения в форме Лагранжа, Коши и т. п.;
- 4) *функций*.

*Производные и составные типы данных.* Производный тип данных по формату хранения принадлежит к одному из базовых, но для него могут быть переопределены следующие свойства базового типа: название типа, транслятор или расширение файла для сохранения данных в пользовательском формате. Если какие-то из свойств для производного не определяются, то они наследуются из базового типа.

Составной тип данных представляет собой набор переменных базового типа, объединенных общим именем, доступ к элементам составного типа аналогичен доступу к элементам записи в обычных языках программирования. Для составного типа является обязательным определение всех свойств. Для составного типа данных могут быть установлены связи между размерностями, входящих в него элементов, которые будут проверяться или устанавливаться (в зависимости от вида условия) при преобразовании данных во внутренний формат системы.

Пользователь может создавать типы данных производного или составного типа, устанавливая для них свойства по своему усмотрению. Для подключения типа данных в системе имеется набор файлов для их регистрации, в который должны быть внесены соответствующие добавления.

*Язык ДИАЛОГ.* Обычно интерфейс пользователя САПР создается программистами. Он должен быть достаточно мощным (и, следовательно, усложненным), чтобы обеспечить нужды пользователя. Но сложный интерфейс может вызвать проблемы у пользователя. В отличие от этих САПР директивы ГАММА-1РС имеют простой интерфейс. Используя язык ДИАЛОГ исследователь может создавать интерфейсы для новых директив в то время как в MATLAB для создания проблемно-ориентированного интерфейса необходимо использовать язык программирования, такой сложный, как C++. Интерфейс директивы позволяет ввести данные, необходимые для решения задачи, преобразовать данные из пользовательского формата во внутренний формат, используемый в системе. Каждая программа на языке ДИАЛОГ снабжается уникальным именем. Вызов программы из расчетной части директивы осуществляется посредством вызова модуля, который описан в архиве модулей как интерпретатор интерфейса директивы с указанием имени программы в качестве ключевого параметра.

При составлении плана ввода данных можно использовать следующие предложения языка: определение переменных, используемых в тексте интерфейса, и списка передаваемых программе на языке ИНСТРУМЕНТ параметров; задание размерностей переменных, связей между размерностями переменных; замена названия типа и операции для переменной; загрузка данных из БД; редактирование и сохранение данных в БД; преобразование данных из пользовательского во внутренний формат системы.

*Язык ИНСТРУМЕНТ* предназначен для составления расчетной части директив. Под расчетной частью директивы понимается упорядоченная совокупность действий, позволяющих перейти от исходных данных, определенных в интерфейсной части директивы, к требуемому результату. Каждая программа на языке ИНСТРУМЕНТ снабжается уникальным именем и может быть вызвана из оболочки системы пользователем для решения своей задачи.

Следующие предложения языка могут быть использованы при составлении расчетной части директивы: определение типов переменных, используемых в расчетной части директивы; вывод сообщения в окно директивы; выполнение проблемной операции (запуск модуля на выполнение); вывод результатов работы проблемной

операции на экран монитора; условный переход (в зависимости от значения логической переменной); безусловный переход; конец плана.

**Модули. Архив описания модулей.** Система поставляется с некоторым набором директив и модулей. Модули делятся на четыре группы: синтеза, анализа, преобразования и вспомогательные. Пользователь с помощью описания системы может создавать на языке ИНСТРУМЕНТ свои собственные директивы на базе имеющихся модулей, а также добавлять в систему новые модули (выполняемые файлы, в которых реализован интерфейс передачи данных, принятый в системе). Новые модули добавляются в систему посредством внесения их характеристик в архив описания модулей, где описывается имя модуля, используемое при составлении программы на языке ИНСТРУМЕНТ, имя файла и, если необходимо, ключевые параметры, определяющие особенности работы модуля.

### Применение системы

Систему ГАММА-1РС достаточно просто освоить, используя руководство пользователя [3]. Пользователь выбирает директиву и вводит по запросам ЭВМ исходные данные для решения задачи (с клавиатуры или из банка моделей). Система контролирует правильность введенных данных, совпадение типов и размерностей. Решение задачи происходит в автоматическом режиме. Пользователь может просмотреть результаты работы каждого модуля. Конечные результаты (матрицы регуляторов и графики переходных процессов) в системе выводятся на экран в любом случае.

Для пояснения работы системы, рассмотрим полностью управляемый и полностью наблюдаемый объект – гироскоп [4], представленный системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} A\ddot{\mathbf{b}} + AS\dot{\mathbf{a}} + HC\dot{\mathbf{a}} + N\mathbf{b} &= 0, \\ J\dot{\mathbf{a}} - C^T H S \mathbf{a} - (C^T H + S^T N)\mathbf{b} &= M(\mathbf{u} + \mathbf{w}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A = \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{pmatrix}$ ,  $M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$ ,  $N = \begin{pmatrix} n_1 & 0 \\ 0 & n_2 \end{pmatrix}$ ,  $H = \begin{pmatrix} h_1 & 0 \\ 0 & h_2 \end{pmatrix}$ ,  $J = \begin{pmatrix} j_x & 0 \\ 0 & j_y \end{pmatrix}$ ,  
 $S = \begin{pmatrix} -\sin \delta_1 & \cos \delta_1 \\ \cos \delta_2 & \sin \delta_2 \end{pmatrix}$ ,  $C = \begin{pmatrix} -\cos \delta_1 & -\sin \delta_1 \\ -\sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{a} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}$ ,  $q_1$  и  $q_2$  – проекции абсолютной

угловой скорости площадки на ее оси,  $q_3$  и  $q_4$  – углы прецессии (поворота) гироскопов,  $u_1$  и  $u_2$  – моменты двигателей стабилизации (управления).

При значениях  $a_1 = a_2 = 10^{-5}$  кг·м<sup>2</sup>,  $m_1 = m_2 = 10^{-5}$ ,  $n_1 = n_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  Н·мс,  $h_1 = h_2 = 10^{-2}$  Н·мс,  $j_x = 10^{-3}$  кг·м/с<sup>2</sup>,  $j_y = 2 \cdot 10^{-3}$  кг·м/с<sup>2</sup>,  $\delta_1 = -20^\circ$ ,  $\delta_2 = 30^\circ$ , система (1) примет вид

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 + 400\dot{q}_1 + 0.342\dot{q}_3 + 0.94\dot{q}_4 - 940q_3 + 342q_4 &= 0 \\ \ddot{q}_2 + 400\dot{q}_2 + 0.866\dot{q}_3 + 0.50\dot{q}_4 - 500q_3 + 866q_4 &= 0 \\ 803\dot{q}_1 + 154\dot{q}_2 + 100\dot{q}_3 + 754q_3 + 1130q_4 &= u_1 + w_1 \\ -718\dot{q}_1 - 1070\dot{q}_2 + 200\dot{q}_4 - 867q_3 - 754q_4 &= u_2 + w_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Типичными внешними воздействиями, которым подвергается гироскоп, являются ступенчатые либо гармонические возмущения, вида

$$w_i(t) = \delta_{i0} + \sum_{k=1}^{\mu} (\delta_{ik}^s \sin \omega_k t + \delta_{ik}^c \cos \omega_k t), \quad i = \overline{1,2}, \quad (3)$$

где  $\delta_0$ ,  $\delta_k^s$ ,  $\delta_k^c$  – амплитуды и  $\omega_k$  ( $k = \overline{1,\mu}$ ) – частоты качки основания гироскопа – неизвестные числа, ограниченные условием

$$|w_1(t)| \leq 1000, \quad |w_2(t)| \leq 1000. \quad (4)$$

**Задача (точного управления).** Требуется найти такой регулятор

$$\dot{\mathbf{x}}_c = A_c \mathbf{x}_c + B_c \mathbf{u}, \quad \mathbf{u} = C_c \mathbf{x}_c + D_c \mathbf{y}, \quad (5)$$

чтобы при возмущениях (3), для которых выполняется условие (4), значения ошибок регулирования, начиная с некоторого момента времени  $t^*$ , удовлетворяли неравенствам

$$z_{1,\text{уст}} = \limsup_{t \rightarrow \infty} |z_1(t)| \leq 0.0005, \quad z_{2,\text{уст}} = \limsup_{t \rightarrow \infty} |z_2(t)| \leq 0.0005, \quad (6)$$

где  $z_1(t) = q_1(t)$ ,  $z_2(t) = q_2(t)$  (7)

– регулируемые переменные.

Синтез регулятора (5) осуществляется с использованием директивы 142.

Входными данными для этой директивы являются: дифференциальные уравнения объекта управления (2); уравнения регулируемых переменных (7); вектор допустимых значений установившихся ошибок по регулируемым переменным (6); вектор границ внешних возмущений (4). Ввод исходных данных показан на рис. 1. Результатами работы директивы являются:

1. Матрицы уравнения (5) регулятора в форме Коши:

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & -9.276 \cdot 10^6 & 0 & 2.993 \cdot 10^5 \\ 1 & -5.776 \cdot 10^3 & 0 & 5.201 \cdot 10^1 \\ 0 & 2.954 \cdot 10^5 & 0 & -8.599 \cdot 10^6 \\ 0 & 5.201 \cdot 10^1 & 1 & -5.657 \cdot 10^3 \end{pmatrix}, \quad B_c = \begin{pmatrix} 3.624 \cdot 10^8 & 4.966 \cdot 10^6 \\ 2.092 \cdot 10^5 & -5.894 \cdot 10^3 \\ 2.368 \cdot 10^8 & -5.606 \cdot 10^8 \\ 1.482 \cdot 10^5 & -3.385 \cdot 10^5 \end{pmatrix},$$

$$C_c = \begin{pmatrix} 0 & 7.405 \cdot 10^6 & 0 & -3.628 \cdot 10^{-10} \\ 0 & 0 & 0 & 7.405 \cdot 10^6 \end{pmatrix}, \quad D_c = \begin{pmatrix} -2.984 \cdot 10^8 & 1.124 \cdot 10^7 \\ -2.147 \cdot 10^8 & 4.855 \cdot 10^8 \end{pmatrix}.$$

2. Графики переходных процессов по регулируемым переменным и управлениям в системе в присутствии ступенчатых внешних возмущений (4) (рис. 2 а, б). Из графиков видно, что заданные требования к точности выполняются.

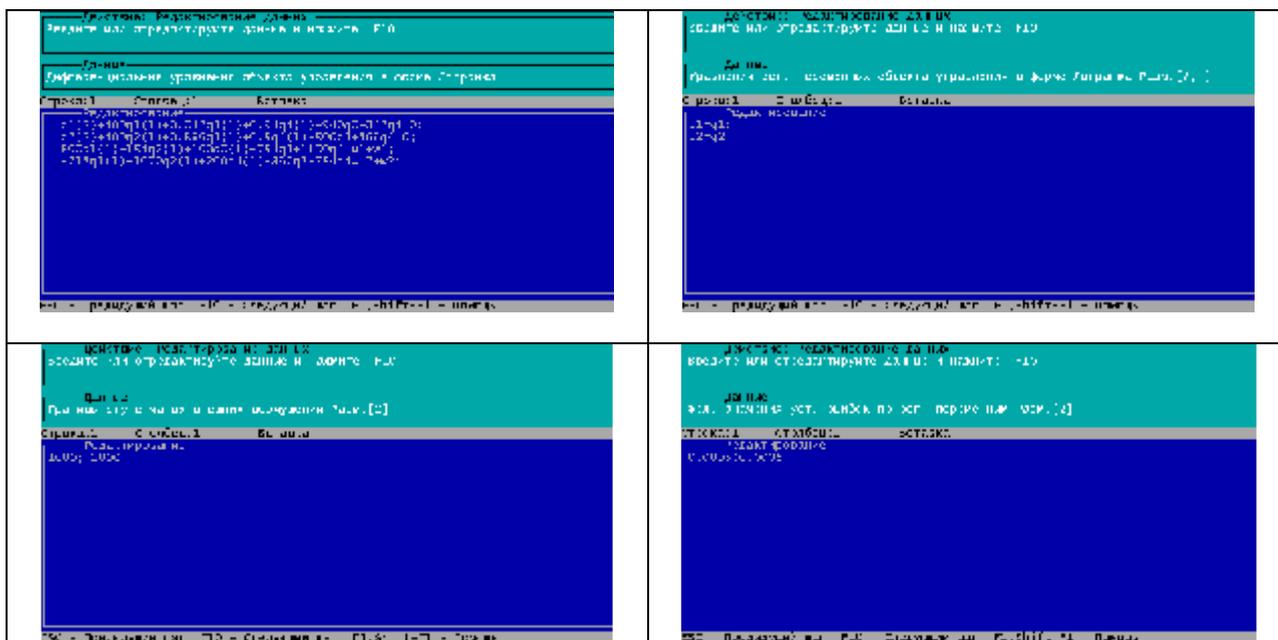


Рис. 1. Ввод исходных данных директивы 142.

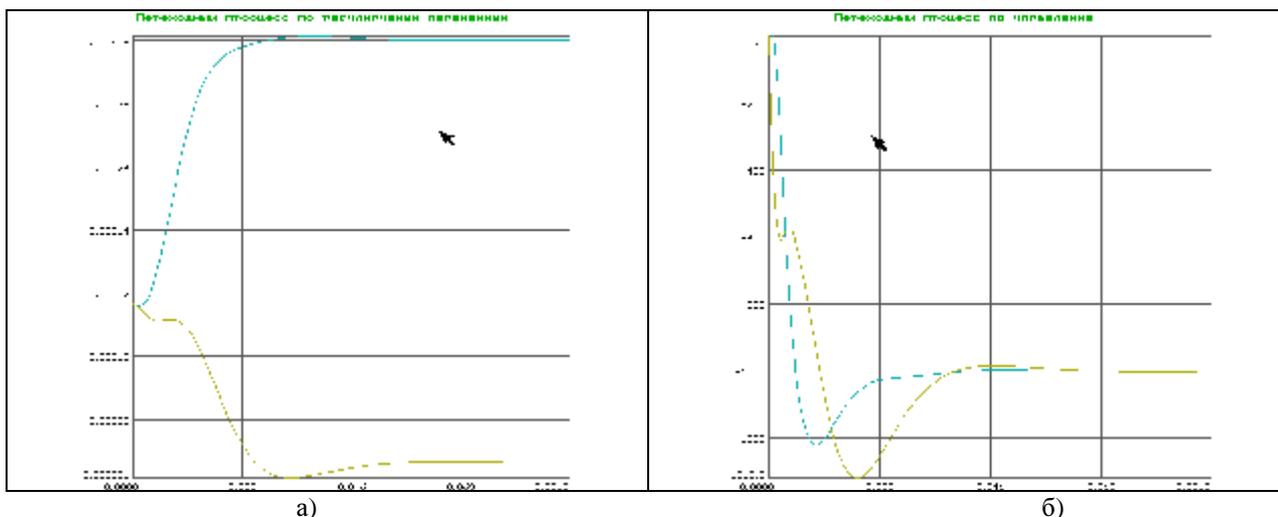


Рис. 2. Графики переходных процессов: а) по регулируемым переменным; б) по управлению.

### Дальнейшее развитие

В настоящее время в среде Delphi разрабатывается система ГАММА-2РС, которая является развитием системы ГАММА-1РС в следующих направлениях:

- ГАММА-2РС содержит директивы систем ГАММА-1РС и АДАПЛАБ;
- ГАММА-2РС имеет более компактные и удобные, по сравнению с ГАММА-1РС, интерфейсы директив при сохранении запросов существующих директив ГАММА-1РС;
- ГАММА-2РС имеет принципиально новую среду для разработки новых директив инженером-исследователем. В этой среде не используется язык ИНСТРУМЕНТ. Она построена на принципах визуального программирования: инженер составляет блок-схему директивы из готовых модулей, соединяя их желаемым образом.

*Александров Альберт Георгиевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИПУ РАН.  
Панин Сергей Юрьевич – инженер Электростальского филиала Московского государственного института  
стали и сплавов.*

*Контактный телефон (095) 334-76-41.*

*E-mail: alex7@ipu.rssi.ru*

#### **Список литературы**

1. *Медведев В.С., Потемкин В.Г.* Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов // М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999.
2. *Floyd M.A., Dawes P.J., Milletti U.* X<sub>math</sub>: a new generation of object-oriented CACSD tools // In Proc. European Control Conference, 1991.
3. *Александров А.Г., Панин С.Ю.* Система ГАММА-1РС. Руководство пользователя // М.: МИСиС. 1997.
4. *Александров А.Г.* Синтез регуляторов многомерных систем // М.: Машиностроение. 1986.