

А.Г.Александров, д-р физ.-мат.наук, Л.С.Михайлова
(Институт проблем управления им.Трапезникова РАН, Москва),

Р.В.Исаков

(Электростальский политехнический институт, Электросталь)

СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Формулируются требования к программному обеспечению для автоматизации разработки алгоритмов автоматического управления.

На их основе строится концепция программного обеспечения автоматизации разработки алгоритмов автоматического управления, в соответствии с которой оно должно быть двухуровневым: первый уровень - среда инженера-разработчика системы управления, второй уровень является средой (средой- исследователя) для разработки и модернизации первого уровня.

Приводится реализация концепции в форме системы ГАММА - 2РС.

1 Введение

Одним из важных этапов проектирования [1] каждой системы автоматического управления является разработка алгоритма управления. Программное обеспечение для автоматизации этого этапа разрабатывается уже более четырех десятков лет. К середине восьмидесятых годов было разработано несколько десятков пакетов прикладных программ для анализа САУ, идентификации, синтеза регуляторов и т.д. Это, в частности, отечественные пакеты: ДИСПАС [2], САПРАС [3], РАДИУС-2 [4], ГАММА [5]- [8] и зарубежные: IDPAC, CYNPAC, KEDDS, MATLAB. Описание первых имеется в справочнике [1], а зарубежных - в книге [9].

Последние десять лет система MATLAB [10], [11] стала доминирующей среди зарубежных систем для разработки алгоритмов автоматизации. Это связано с тем, что MATLAB основан на эффективном языке программирования высокого уровня, который позволяет достаточно быстро разрабатывать программное обеспечение методов теории автоматического управления. К настоящему времени программное обеспечение традиционных методов ТАУ, содержащееся в указанных выше зарубежных

пакетах воссоздано в MATLAB. Кроме того, MATLAB содержит программное обеспечение новых методов: H-бесконечного субоптимального управления, мю-анализ и синтез, грубое управление и т.д.

Однако, инженер-разработчик реальной системы автоматического управления (САУ), который хотел бы использовать MATLAB для разработки алгоритмов управления столкнется с рядом трудностей: а) он должен глубоко знать теорию управления, чтобы выбрать, исходя из его задачи, неопределенные параметры используемого метода (например, параметры квадратичного функционала LQ- и H-бесконечной оптимизации, при которых достигается необходимая точность регулирования, вид и параметры испытательных сигналов при идентификации и т.д), б) ему необходимо знать язык программирования MATLAB, чтобы объединить выбранные им программы (функции) MATLAB, в) он должен уметь создавать интерфейс пользователя и формировать протокол результатов.

Наряду с MATLAB развивается отечественная система ГАММА. Первые ее версии ГАММА-1, ГАММА-2 [5] содержали программное обеспечение для синтеза и анализа линейных многомерных систем по заданной точности и качеству и была предназначена для ЭВМ типа М-220. ГАММА-1М [6] – это модернизация этой системы для ЕС ЭВМ. В следующей версии системы – ГАММА-1РС [7], работающей на IBM PC совместимых компьютерах, было добавлено программное обеспечение новых методов синтеза (в частности, H-бесконечное субоптимальное управление) и улучшен пользовательский интерфейс.

В настоящей работе формулируется концепция структуры программного обеспечения для автоматизации разработки алгоритмов автоматического управления и приводится ее реализация в системе ГАММА-2РС, что позволяет избежать указанных выше проблем, возникающих при использовании системы MATLAB.

2 Структура программного обеспечения

Сформулируем требования к программному обеспечению для автоматизации проектирования (средствам проектирования). Они состоят в следующем.

- а) Пользователь средств проектирования не должен участвовать в их создании.
- б) Средства проектирования должны предоставлять возможность ”естественного” по форме и существу описания своей задачи.

Для средств разработки алгоритмов управления ”естественная форма” описания задачи означает наличие пользовательского интерфейса, который позволя-

ет в частности: а) ввести модель объекта управления в привычной форме - в виде дифференциальных уравнений произвольного вида, либо в форме передаточной матрицы. "Естественное описание задачи по существу" означает, что средства проектирования дают возможность решать задачи проектирования, когда цель управления описывается принятыми на практике инженерными показателями (допустимыми установившимися ошибками, временем регулирования, запасами устойчивости), а внешние возмущения и помехи мало известные функции, о которых часто известны лишь их границы.

- с) Задача пользователя должна решаться автоматически. Участие пользователя ограничено возможностью остановить решение, если промежуточные результаты выводимые на экран и в протокол, не удовлетворительны.

Из этих требований следует, что программное обеспечение должно иметь *двухуровневую структуру*: первый уровень - средства (среда) инженера-разработчика САУ, второй уровень является инструментарием (средой) для разработки и модернизации первого уровня.

Для уточнения структуры программного обеспечения введем некоторые определения.

Многие понятия ТАУ наряду с содержательным определением имеют [12] *операционное определение (описание)* в форме некоторой последовательности вычислительных операций.

Операционное определение может быть неединственным. Например, устойчивость линейной стационарной системы может операционно определяться как решение уравнения Ляпунова так и вычислением собственных чисел матрицы, описывающей модель системы в пространстве состояний.

Элементарной проектной операцией называется операционное определение неделимого (минимального) содержательного фрагмента ТАУ. Например, устойчивость, управляемость, АКОР (LQ-оптимизация), Н-бесконечное субоптимальное управление являются элементарными проектными операциями (ЭПО).

Модулем называется программа для ЭВМ, реализующая ЭПО.

Директива - это программа, состоящая из трех частей: а) модулей; б) средств формирования интерфейса пользователя и в) средств вывода промежуточных и окончательных результатов (протокол).

Каждая директива служит для решения определенного класса задач по разработке алгоритмов управления.

Класс задач характеризуется [1] тремя видами моделей: моделью целей управления (показателей точности и качества), модель объекта управления и регулятора, модель среды (внешние возмущения и помехи измерения) .

Интерфейс пользователя служит для описания им конкретной задачи из определенного класса.

Среда инженера-разработчика САУ (среда пользователя) состоит из директив. Пользователь (инженер-разработчик САУ) выбирает директиву, вводит, используя интерфейс, описание его конкретной задачи и после решения анализирует протокол результатов. Задача решается без его участия.

Среда пользователя разрабатывается исследователем, который обладает глубокими знаниями ТАУ и владеет одним из языков программирования для того, чтобы создавать модули и директивы.

Среда исследователя - это программные средства, с помощью которых исследователь создает новые директивы и формирует среду пользователя.

3 Реализация двухуровневой структуры программного обеспечения на базе системы ГАММА - 2РС

3.1 Среда пользователя (разработчика систем управления)

В соответствии с требованиями к программному обеспечению среда пользователя представляет собой совокупность директив. Директивы, имеющиеся в системе ГАММА-2РС на данный момент, обеспечивают решение широкого круга задач теории управления.

Система содержит пять групп директив

- a) синтез регуляторов (директивы: построение управления, обеспечивающего заданные требования к точности регулирования, H -бесконечное оптимальное управление и т.д.)
- b) идентификация (директивы: конечно-частотная идентификация, метод наименьших квадратов и т.д.)
- c) адаптивное управление (директивы: частотное адаптивное управление, адаптивный ПИД-регулятор)
- d) преобразование видов и форм моделей;
- e) анализ систем.

Пользователь работает в системе следующим образом. Из списка директив (рис.1) выбирается необходимая директива. После выбора директивы появляется форма для ввода исходных данных (рис.2), в которую пользователь вводит: а) модель объекта управления (модель управляемого процесса) либо результаты его испытаний воздействиями, формируемыми системой; б) технические требования к САУ: допустимые величины ошибок управления, время регулирования и т.п. в зависимости от класса задачи.

В системе поддерживается архив моделей (хранение исходных данных между сеансами работы).

Далее система работает без участия пользователя (автоматически) и результатом работы являются алгоритмы управления для САУ. Промежуточные и окончательные результаты работы выводятся в окно протокола (рис.3) и могут быть сохранены пользователем.

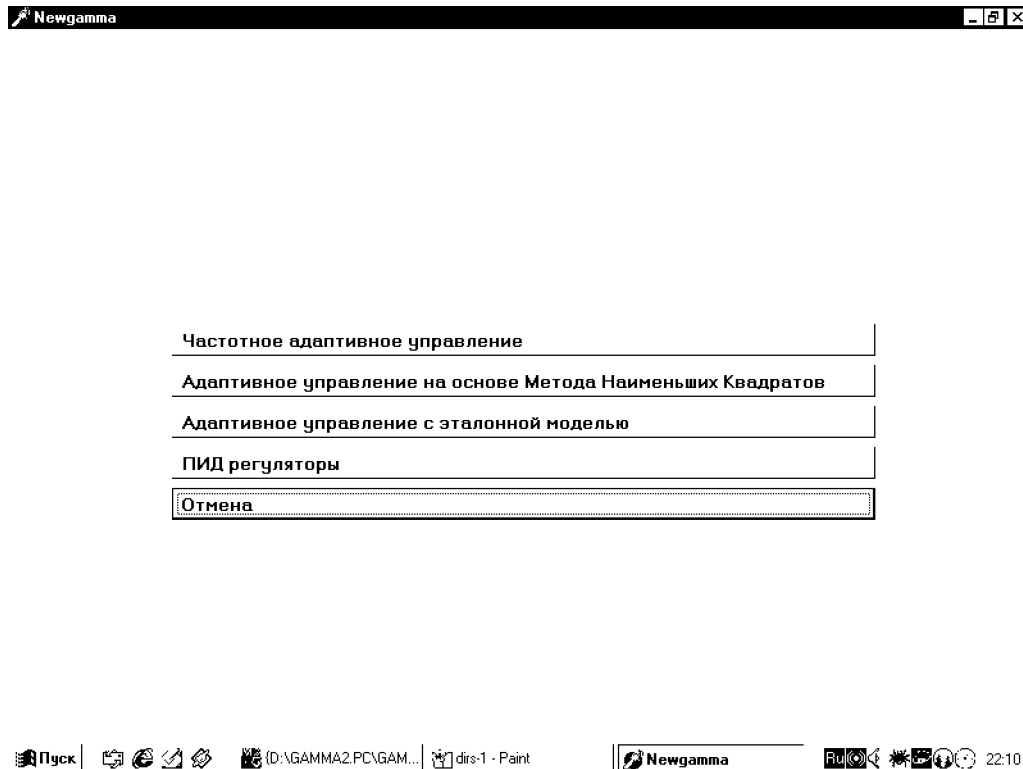


Рис.1. Список подгрупп директив системы ГАММА-2РС (группа - адаптивное управление)

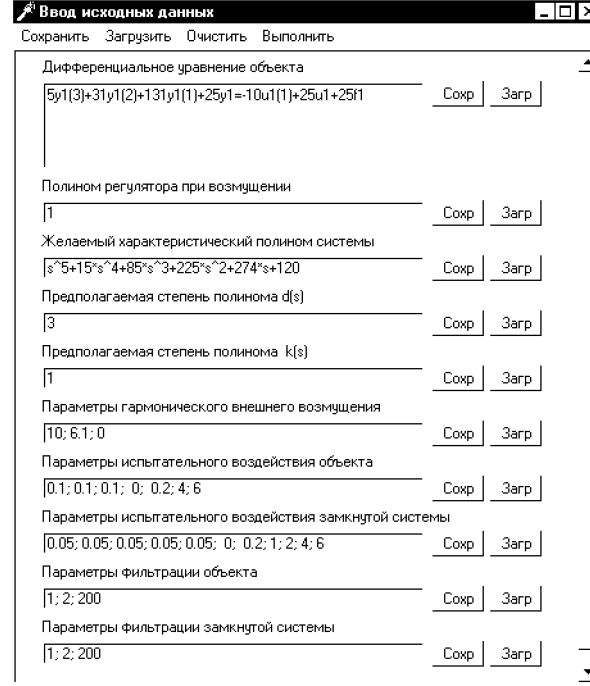


Рис.2 Форма ввода исходных данных директивы 311 "Модальное частотное адаптивное управление"

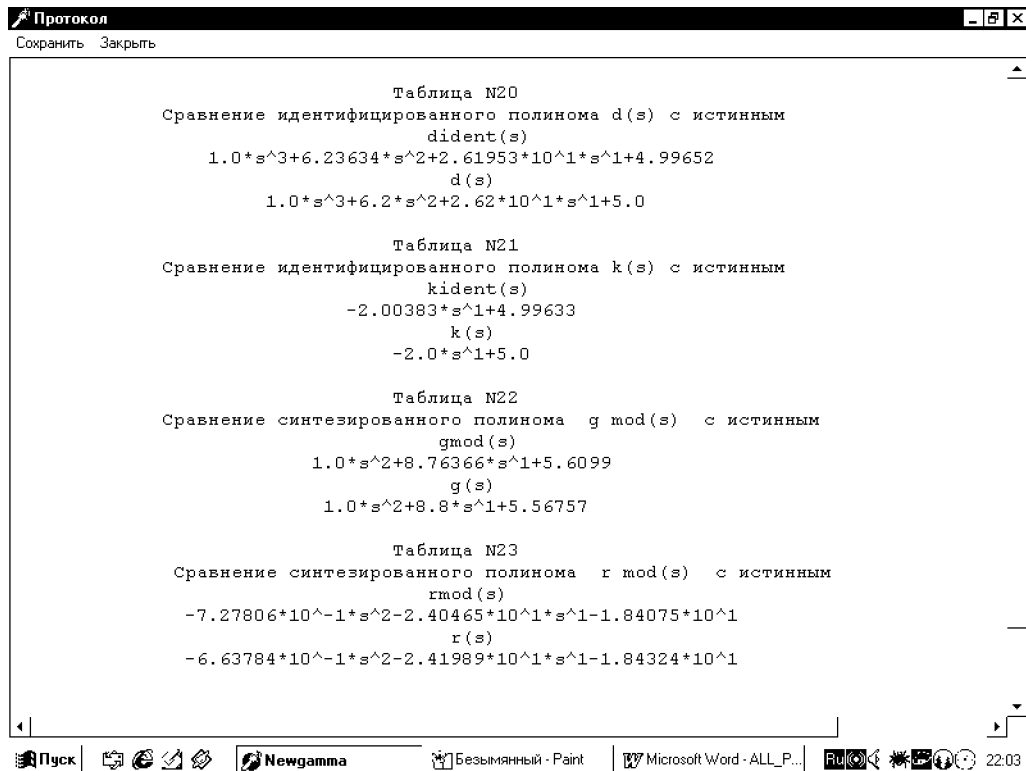


Рис.3 Фрагмент протокола директивы 311"Модальное частотное адаптивное управление" .

3.2 Среда исследователя

Среда исследователя – это инструментарий для создания исследователем новых директив. Она состоит из библиотеки модулей, текстового и графического редакторов (редактора блок-схем).

Библиотека модулей – это совокупность всех модулей системы ГАММА-2РС. Модули представляют собой исполняемые файлы, написанные на любом языке программирования. Единственным требованием к модулям является соблюдение протокола обмена данными, принятого в системе. Каждому модулю соответствует графическое представление в окне библиотеки модулей и описание, которое позволяет системе работать с этим модулем. Окно библиотеки модулей с описанием модуля ”Фильтр Фурье” представлено на рис.4.

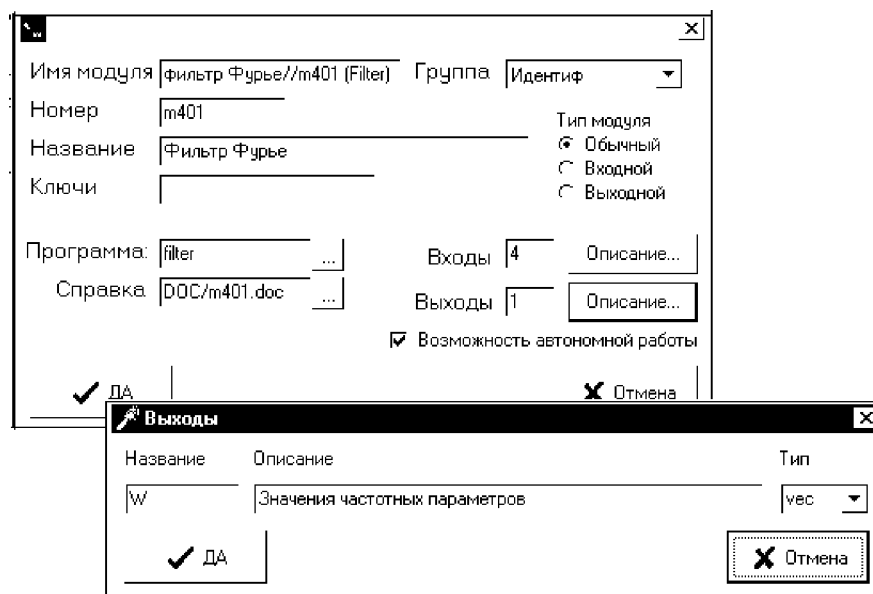


Рис.4. Окно библиотеки модулей с описанием модуля ”Фильтр Фурье ”

Библиотека модулей является ”открытой”. Разработчик может не только использовать имеющиеся в системе модули, но и добавлять собственные. Это означает, что в архив, где хранятся модули будет добавлен соответствующий исполняемый файл, а в библиотеку модулей – ссылка на него.

В системе имеется два альтернативных способа создания новых директив. Первый способ основан на описании методов теории управления с помощью блок-схем. Такой способ близок инженерам, так как для него естественно мыслить на языке структурных схем. Алгоритм директивы разбивается на отдельные модули и представляется в виде блок-схемы. Для создания новой директивы, разработчик выбирает необхо-

димые модули из библиотеки и формирует из них структурную схему директивы в редакторе блок-схем.

Интерфейс директивы формируется на базе интерфейсного модуля, который является простым описанием исходных данных директивы. Исследователь может выбрать, какие данные должны выводиться на экран во время работы директивы, пометив входы или выходы соответствующих модулей. Окно редактора блок-схем со структурной схемой директивы 311 представлено на рис.5.

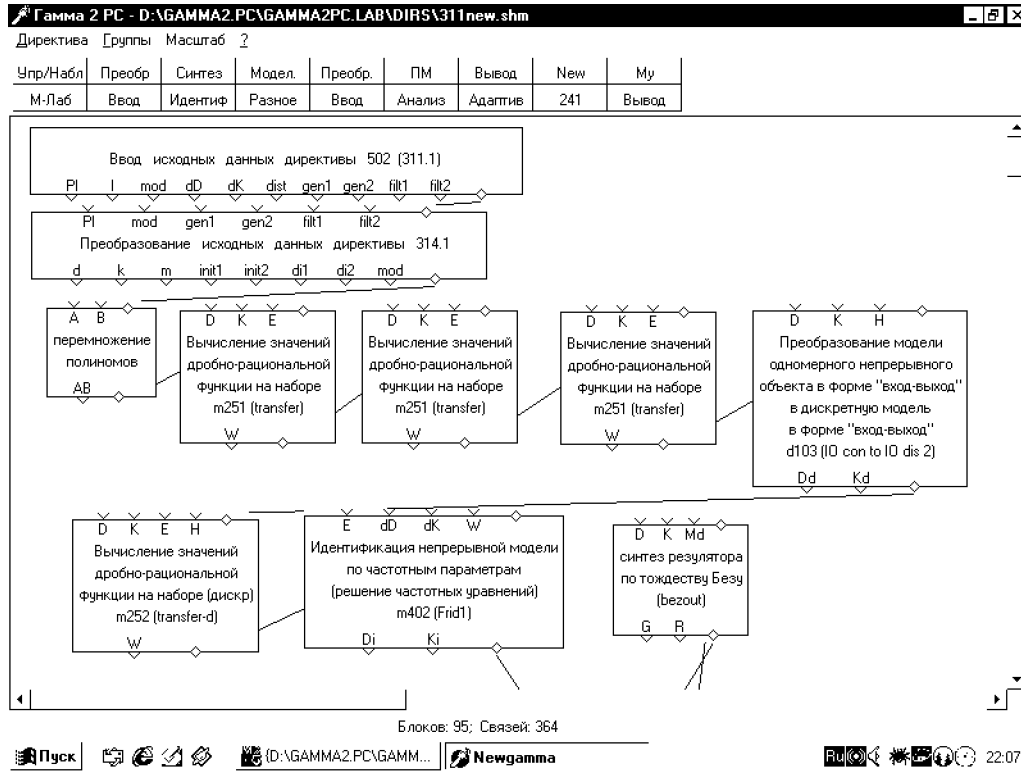


Рис.5 Блок-схема директивы 311 "Модальное частотное адаптивное управление"

Готовая блок-схема директивы сохраняется в архиве и в любой момент может быть изменена исследователем.

При выполнении директивы система прочитывает файл с описанием блок-схемы, находит в библиотеке модулей указанные модули и исполняет соответствующие ехе-файлы.

Описанный выше способ создания директивы удобен и нагляден, если алгоритм несложен и блок-схема директивы состоит из небольшого количества модулей. Однако построение сложных директив, содержащих логические переходы и состоящих из нескольких десятков модулей, в редакторе блок-схем требует больших затрат времени. Кроме того, достаточно трудно найти в блок-схеме допущенные при построении

ошибки.

Для решения подобных задач в системе ГАММА-2РС имеется собственный проблемно-ориентированный язык ИНСТРУМЕНТ-2, предназначен для разработки директив. Он содержит средства для создания интерфейса (операторы ввода данных и вывода результатов в протокол) и расчетной части директивы (вызов расчетных модулей и управляющие структуры).

Программа на языке ИНСТРУМЕНТ-2 состоит из предложений, которые оканчиваются ";". Вначале программы находятся разделы описания переменных и меток, далее - создание диалога ввода исходных данных, вызов расчетных модулей и вывод результатов расчетов.

Ввод текста программы осуществляется в текстовом редакторе, встроенном в среду исследователя. Окно редактора с текстом директивы представлено на рис.6

```
111-4
New
% I . Объект не замкнут регулятором ;
% 1.1) Моделируем объект и анализируем выходы фильтра Фурье;

m201bc[d,m,dist,init1][ResMod,LL];
plot['ResMod', ResMod];

FilterF[ResMod, gen1, filt1, discr1, 2,1,2][VC1];
print[' ', 'Wfil', VC1][ ];

% 1.2) фильтруем выход объекта;

f3glp34[d,k,m,gen1,dist,init1][ResFil, LL];
plot['ResFil', ResFil];

FilterF[ResFil, gen1, filt1, discr1,3, 1, 3][ Wfil];
print[' ', 'Wfil', Wfil][ ];

% 1.3) Сравниваем оценки частотных параметров W fil
% с истинными значениями W(s1);

VCrelVC[Wfil, W1][ VC1];
print[' ', 'Wfil:W' , VC1][ ];
```

Рис.6 Текст директивы 311 на языке ИНСТРУМЕНТ-2

Язык ИНСТРУМЕНТ-2 является интерпретатором. При запуске директивы на исполнение каждое предложение распознается и исполняется.

Важной особенностью системы является то, что и при разработке директив в виде блок-схем, и при написании программ на языке ИНСТРУМЕНТ-2 используются одни и те же расчетные модули из библиотеки модулей.

4 Применение системы ГАММА-2РС

Применим систему ГАММА-2РС для построения адаптивного управления с помощью директивы 311 "Модальное частотное адаптивное управление" из подгруппы "Частотное адаптивное управление" (Группа "Адаптивное управление")

Рассмотрим полностью управляемый, асимптотически устойчивый объект управления, описываемый уравнением:

$$\ddot{y} + d_2\dot{y} + d_1\dot{y} + d_0y = k_1\dot{u} + k_0u + f, \quad t \geq t_0 \quad (1)$$

в котором $y(t), u(t)$ и $f(t)$ -измеряемый выход объекта, испытательный сигнал и внешнее возмущение соответственно. Коэффициенты этого уравнения- неизвестные числа, известна граница возмущения

$$f^* \leq 10 \quad (2)$$

Задача состоит в нахождении регулятора

$$g_2\ddot{u} + g_1\dot{u} + g_0u = r_2\ddot{y} + r_1\dot{y} + r_0y, \quad (3)$$

такого, чтобы, начиная с момента времени $t \geq t_N > t_0$ ($t_N - t_0$ -длительность адаптации), характеристический полином системы (1),(3) и желаемый полином

$$\psi(s) = s^5 + 15s^4 + 85s^3 + 226s^2 + 276s + 120 \quad (4)$$

были близки.

Опишем применение директивы на этапе планирования эксперимента, предназначенного для определения параметров алгоритма адаптации: амплитуд и частот испытательного сигнала, длительности фильтрации и т. д. Для этого используется технологическая модель объекта и возмущения, которая строится на основе знаний специалиста по объекту (технолога). Реальный объект может существенно отличаться от его технологической модели, однако параметры алгоритма адаптации, полученные на этом этапе будут полезны для процесса адаптации, в котором используется выход реального объекта.

Коэффициенты технологической модели были: $d_2 = 6.2, d_1 = 2.62, d_0 = 5, k(1) = -2, k(0) = 5, f(t) = 10 \sin 6.1t$.

Объект (1) возбуждался испытательным воздействием

$$u(t) = 0.1(\sin 0.2t + \sin 4t + \sin 6t). \quad (5)$$

Время задержки начала фильтрации – 1 период наименьшей частоты, время фильтрации – 2 периода, число делений периода максимальной частоты – 200 (интервал дискретности $T = \frac{2\pi}{200 \cdot 6}$).

$$u(t) = 0.05(\sin 0.2t + \sin 1t + \sin 2t + \sin 4t + \sin 6t). \quad (6)$$

Время задержки – 1 период, время фильтрации – 2 периода, число делений – 200 (интервал дискретности $T = \frac{2\pi}{200 \cdot 6}$).

В результате был получен регулятор:

$$\begin{aligned} g_0 &= 5.60, & g_1 &= 8.76, & g_2 &= 1; \\ r_0 &= -18.43, & r_1 &= -24.19, & r_2 &= -0.66. \end{aligned} \quad (7)$$

Исходные данные, введенными пользователем, приведены на рис.2. Окно с фрагментом протокола работы директивы показано на рис.3

Литература

- [1] Справочник по теории автоматического управления /Под ред. *А.А.Красовского*. М.,Наука, 1987. 712 с.
- [2] Диалоговая система проектирования систем автоматического управления ДИСПАС, версия 2. М. МАИ, 1981
- [3] *Андреевский Б.Р., Дерезицкий Д.Р., Спиридонов А.А., Уткин В.И., Фрадков А.Л.* "Принципы построения и входной язык САПР адаптивных систем управления" // Вопросы кибернетики. Актуальные задачи адаптивного управления, М. Научный совет АН СССР по комплексной проблематике "Кибернетика", 1982, с. 31-49
- [4] *Дорри М.Х., Климачев С.Н.* "Некоторые проблемы автоматизации проектирования структур систем управления непрерывными объектами" //АиТ N3, 1982, с. 10-18
- [5] *Александров А.Г., Небалуев Н.А., Асмолова Л.Я., Крупенина Л.Я.* Математическое обеспечение синтеза и анализа передаточных матриц регуляторов многомерных линейных систем автоматического регулирования. (Комплексы программ ГАММА-1, ГАММА-2 для ЭВМ типа М-220). Учебное пособие.// Саратов. политех. институт, 1975
- [6] *Александров А.А., Марков А.А., Степанов М.Ф.* Диалоговый пакет прикладных программ "ГАММА-1М" для синтеза и анализа линейных многомерных систем управления по заданной точности и качеству. //Межвузовский научный сб. "Аналитические методы синтеза регуляторов", Саратов, СПИ, 1982

- [7] *A. G. Alexandrov, Panin S.Yu.* GAMMA-1PC as CACSD tools for Practicing Engineers. Symposium on Computer Aided Control System Desig (CAC'S97), Belgium.1997.
- [8] *Александров А.Г., Панин С.Ю.* Система ГАММА-1РС для синтеза регуляторов многомерных систем. //ж.Автоматизация в промышленности,3, 2003,стр.18-22.
- [9] Автоматизированное проектирование систем управления (под. Ред. М. Джамшиди и Ч.Дж. Хергета), М. Машиностроение, 1989
- [10] *Moler, C.* MATLAB - user's Guide', Department of Computer Science, University of New Mexico, Alberquerque, USA, 1980
- [11] MATLAB User's Guide,MathWorks, 2001.
- [12] *Александров А.Г.* О принципах построения систем анализа динамики и синтеза устройств управления (САПР САУ).// Межвузовский научный сборник "Аналитические методы синтеза регуляторов", СПИ, Саратов, 1982, стр. 123 - 136.
- [13] *Михайлова Л.С.*Разработка интерпретатора языка системы ГАММА-2РС //Труды ЭПИ МИСиС "Робастное управление и частотная идентификация".- Электросталь:ЭПИ МИСиС.С. 2003.