

**Пакет программ АДАПЛАБ для идентификации и адаптивного управления**

**Аннотация.** Описывается программное обеспечение для разработки алгоритмов автоматизации объектов (процессов) с неизвестными параметрами.

**Введение**

В [1] рассмотрено ПО для построения алгоритмов управления объектами с известными коэффициентами описания. Однако, часто они неизвестны либо известны с низкой точностью из-за разброса их значений в пределах технологических допусков, старения элементов системы, многорежимного характера управляемого процесса. Одной из причин неопределенности коэффициентов является также резкое сокращение сроков проектирования и модернизации объекта управления и поэтому, из-за недостатка времени на расчет коэффициентов объекта, часто случается так, что объект управления физически реализован, а данные (необходимые для построения алгоритмов его автоматизации) отсутствуют.

В этих случаях, с помощью эксперимента и специальных методов обработки его результатов находят (идентифицируют) коэффициенты объекта, и проблема автоматизации сводится к решению, описанному в [1]. Если эти коэффициенты изменяются во времени, то однократный эксперимент не приводит к цели и тогда применяется адаптивное управление, в котором предполагают, что коэффициенты объекта постоянны, но через достаточно большой отрезок времени они изменяются.

Для идентификации и адаптивного управления такими объектами был разработан пакет программ АДАПЛАБ, главное отличие которого от аналогичных пакетов [2, 3] состоит в учете неизвестных ограниченных внешних возмущений, действующих на объект управления. Одним из основных подходов к идентификации и адаптивному управлению непрерывными объектами при таких возмущениях является частотный подход [4]. Частотные алгоритмы доминируют в пакете. АДАПЛАБ [5] использует также алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов (МНК) и эталонной модели [6]. Результаты моделирования с использованием различных алгоритмов идентификации и адаптации позволяют выбрать наилучший для данного объекта алгоритм.

**Классы решаемых задач**

В таблице приведен список директив (программ), каждая из которых предназначена для решения класса задач одноименного названия

Таблица

№ директивы	Название директивы (класса задач)
<b>Частотная идентификация</b>	
<i>Непрерывная модель</i>	
111.3	Построение непрерывной модели
112.1	Построение непрерывной модели с ее подтверждением
113.1	Директива 111.3 с частично известными коэффициентами передаточной функции
115.1	Подтверждение модели с использованием резонансных фильтров
<i>Дополнительные директивы</i>	
111.1	Директива 111.3 со стандартным приведением к форме "вход-выход"
111.2	Директива 111.1 с корректировкой вывода результатов моделирования
111.4	Директива 111.3 для использования в учебном процессе
<i>Вспомогательные директивы</i>	
116.1	Моделирование объекта
116.2	Определение частот испытательного воздействия
116.3	Определение амплитуд испытательного воздействия
117.1	Выбор интервала дискретности для частотной идентификации
<i>Дискретная модель</i>	
121.2	Построение дискретной модели
<i>Дополнительные директивы</i>	
121.1	Директива 121.2 со стандартным приведением к форме "вход-выход"
121.3	Директива 121.2 для использования в учебном процессе
<i>Модель с ШИМ</i>	
131.1	Идентификация с ШИМ с параллельной фильтрацией
131.2	Идентификация с ШИМ с последовательной фильтрацией
<i>Дополнительные директивы</i>	
131.3	Директива 131.1 (сокращенный вариант)
131.4	Директива 131.2 (сокращенный вариант)
131.5	Директива 131.1 с вычислением частотных параметров объекта
131.6	Директива 131.2 с вычислением частотных параметров объекта
<b>Идентификация на основе МНК</b>	
211.3	Построение дискретной модели
<i>Дополнительные директивы</i>	
211.1	Директива 211.3 со стандартным приведением к форме "вход-выход"

211.2	Директива 211.1 с выводом корней $d(q)$ и $k(q)$ объекта
<b>Частотное адаптивное управление</b>	
<i>Непрерывная модель</i>	
311.2	Модальное управление
313.1	Точное адаптивное управление (с применением АКОР)
317.1	Точное адаптивное управление (с применением $H_\infty$ - оптимизации)
<i>Дополнительные директивы</i>	
311.1	Директива 311.2 со стандартным приведением к форме "вход-выход"
311.3	Директива 311.2 с фильтрацией по $y(t)$
<i>Вспомогательные директивы</i>	
312.1	Выбор интервала дискретности для директивы 311.2
<i>Дискретная модель</i>	
321.1	Дискретное модальное управление
321.2	Объединение директив 321.1 и 322.1
<i>Вспомогательные директивы</i>	
322.1	Выбор интервалов задержки и фильтрации (без внешнего возмущения)
<b>Адаптивное управление на основе МНК</b>	
411.1	Модальное управление
<b>Адаптивное управление с эталонной моделью</b>	
511.1	Адаптивное управление с эталонной моделью
<b>ПИД-регуляторы</b>	
<i>Адаптивные ПИД-регуляторы</i>	
314.2	Модальное управление (директива 311.2 с ПИД-регулятором и задающим воздействием)
<i>Дополнительные директивы</i>	
314.1	Директива 314.2 без задающего воздействия
314.3	Директива 314.2 с фильтрацией по $y(t)$
<i>Вспомогательные директивы</i>	
116.4	Моделирование объекта с дискретным ПИД-регулятором
315.1	Неадаптивное модальное управление
315.2	Неадаптивное модальное управление ПИ-, ПИД- и ПДД-регуляторами
316.1	Идентификация и модальное управление по экспериментальным данным
<i>Адаптивные ПИД-регуляторы с ШИМ</i>	
331.2	Частотное адаптивное управление с ШИМ
<i>Вспомогательные директивы</i>	
116.5	Моделирование объекта с дискретным ПДД-регулятором и ШИМ
332.1	Неадаптивное модальное управление с ШИМ
333.1	Неадаптивное модальное управление с ШИМ по экспериментальным данным

### Структура пакета

Поясним ряд терминов, используемых для описания структуры пакета. Программная единица, позволяющая решить конкретную задачу из указанной выше предметной области называется *директивой*. Формально, директива – это программная единица, снабженная *интерфейсом* ввода исходных данных, вывода результатов счета (на экран и в протокол), использующая *модули* расчетной части, связанные с интерфейсом *подпрограммами* ввода/вывода. Структура пакета приведена на рис. 1.



Рис. 1.

АДАПЛАБ реализован в виде *расчетной* программы adaplab.exe, составляющей ядро пакета, и набора *интерфейсных программ*, способствующих полноценной работе пользователя. Расчетная программа написана на языке MS Fortran PowerStation (наиболее удобным для реализации численных алгоритмов) с использованием общепринятых средств структурирования типов данных и процедур, имеющих в современных языках программирования высокого уровня. Интерфейсные программы реализованы на языке Pascal и обеспечивают выбор директивы, удобный ввод исходных данных, просмотр результатов счета в виде таблиц и графиков, а также формирование протокола результатов счета, т. е. образуют *систему*, обеспечивающую замкнутый цикл работы с пакетом.

**Расчетная часть (модули)** пакета реализована в виде процедур над наборами данных, сгруппированных (структурированных) в соответствии со спецификой предметной области. Так, среди наборов данных имеются (объединенные в структуры) параметры объекта, регулятора, функции внешнего возмущения, испытательного сигнала, фильтра Фурье, идентификации, адаптации и т.д., а также дополняющие “бедный” набор типов языка полиномы, матрицы и пр.

Процедуры сгруппированы (рис. 2) в:

- *основные модули*, среди которых: преобразование формы “вход-выход” в форму Коши, моделирование объекта, моделирование системы объект-регулятор, фильтр Фурье, решение частотных уравнений идентификации, решение тождества Безу;
- *вспомогательные*, среди которых: вычисление значений передаточной функции на наборе частот, рекуррентный алгоритм МНК;
- подпрограммы *согласования* модулей, среди которых: установка начальных условий системы, вычисление интервала дискретности.



Рис. 2.

Модули используют подпрограммы *общего математического обеспечения*, содержащие операции над наборами комплексных чисел, полиномами, матрицами, решения систем линейных алгебраических, дифференциальных и разностных уравнений.

Общее число процедур на настоящий момент составило 550 ед.

**Интерфейс** позволяет осуществить диалог между пользователем и расчетной программой пакета на всех стадиях работы с ним (выбор директивы, подготовка задания, счет и вывод промежуточных результатов, формирование протокола, возврат в исходное состояние). Работа в системе ведется посредством манипулятора мышь либо непосредственно с клавиатуры. Во время работы возможен вывод результатов счета на принтер. Опишем цикл работы с пакетом подробнее.

Заставка, приглашающая пользователя к работе в системе, сменяется перечнем классов решаемых задач. Выбор класса приводит к перечню его директив. Классы, содержащие большое (для экранного перечня) число директив, для удобства разбиты на подклассы, подподклассы и т. д., имеющие вложенные экранные перечни в соответствии со списком, приведенным в таблице.

Выбор директивы позволяет перейти к подготовке (удобному вводу) исходных данных (новых или имеющихся в БД) и отправить сформированное задание на исполнение. Практически все исходные данные директивы сосредоточены на одном экране, что позволяет убедиться в правильности сформированного задания перед запуском. При корректно сформированном задании исходные данные передаются подпрограммам ввода/вывода, которые попутно преобразуют их в форму необходимую для проведения вычислений модулями пакета расчетной программы.

По ходу вычислений на экране отображаются результаты счета в виде таблиц чисел, наборов, полиномов, дробно-рациональных (передаточных) функций, записанных в доступном для специалиста виде. Формат таблиц, задержку и ряд других параметров можно изменить непосредственно во время работы директивы. В любой момент можно также завершить работу директивы (с сохранением всего рассчитанного) и вернуться к экрану исходных данных. Представление графической информации также имеет богатый набор внутренних операций отображения (задания масштабов координат, сплайновую экстраполяцию, укрупнения конкретного участка графика, и т. д.), модификацию которой можно производить на текущем графике. По завершению работы с директивой (автоматически) формируется (и отображается на экране) протокол результатов счета. Каждому протоколу присваивается уникальный номер, что позволяет хранить практически неограниченное число протоколов работы с пакетом, формировать их БД.

### Применение пакета

Освоение пакета, используя руководство [7], крайне просто. Пользователь выбирает необходимую директиву и вводит по запросам ЭВМ тестовую задачу из руководства. После ее решения сравнивает протокол результатов с

протоколом руководства. Совпадение результатов свидетельствует об освоении директивы. Затем пользователь вводит свою задачу и исследует результат ее решения.

Для иллюстрации этого процесса рассмотрим полностью управляемый асимптотически устойчивый объект, описываемый уравнением

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

с неизвестными коэффициентами  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $k_0$  и  $k_1$ , где  $y(t)$  – выход объекта,  $u(t)$  – управление и  $f(t)$  – неизвестное ограниченное возмущение, удовлетворяющее условию

$$|f(t)| \leq 5.$$

**Задача.** Найти такие коэффициенты регулятора

$$g_2\ddot{u} + g_1\dot{u} + g_0u = r_2\ddot{y} + r_1\dot{y} + r_0y, (2)$$

чтобы, начиная с некоторого момента времени  $t_N > t_0$ , характеристический полином

$$\varphi(s) = d(s)g(s) - k(s)r(s) = \varphi_5s^5 + \varphi_4s^4 + \varphi_3s^3 + \varphi_2s^2 + \varphi_1s + \varphi_0 (3)$$

системы (1), (2), где:  $d(s) = s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0$ ,  $g(s) = g_2s^2 + g_1s + g_0$ ,  $k(s) = k_1s + k_0$  и

$r(s) = r_2s^2 + r_1s + r_0$ , был близок к заданному (желаемому) полиному

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

корни которого имеют отрицательные вещественные части и определены исходя из требований ко времени и точности регулирования<sup>1</sup>. Степень близости полиномов (3) и (4) установлена неравенствами

$$|\psi_i - \varphi_i| \leq 0.2\psi_i \quad i = \overline{1,5}. (5)$$

Для решения задачи указывается директива 311.2 и вводятся показанные на рис. 3 полиномы объекта (1) (преобразованного по Лапласу), полином (4), вид функции внешнего возмущения (рис. 4) и ее параметры (рис. 5). Процесс адаптации моделируется при различных значениях параметров алгоритма:

а) амплитуд и частот испытательных сигналов:

$$u(t) = v^{[1]}(t) = \sum_{k=1}^3 \rho_k \sin \omega_k (t - t_0), \quad t_0 \leq t < t_1$$

– первого, и

$$v^{[1]}(t) = \sum_{k=1}^5 \tilde{\rho}_k \sin \tilde{\omega}_k (t - t_{i-1}), \quad t_{i-1} \leq t < t_i, \quad i = \overline{2, N}$$

– остальных интервалов адаптации, а также

б) длительности

$$t_1 - t_0 = \frac{2\pi}{\omega_\delta} N_f \quad \text{и} \quad t_i - t_{i-1} = \frac{2\pi}{\tilde{\omega}_\delta} \tilde{N}_f \quad i = \overline{2, N},$$

где  $\omega_\delta = \min\{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$  и  $\tilde{\omega}_\delta = \min\{\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \tilde{\omega}_3, \tilde{\omega}_4, \tilde{\omega}_5\}$ , а  $N_f$  и  $\tilde{N}_f$  – числа периодов фильтрации, увеличивающиеся для каждого последующего эксперимента.

<sup>1</sup> Численные эксперименты осуществлялись с помощью директивы 311.2 “Модальное частотное адаптивное управление”. В этих экспериментах, соответствующие передаточной функции

$$w(s) = \frac{25(-0.4s + 1)}{(5s + 1)(s^2 + 6s + 25)}$$

коэффициенты объекта (1), имели следующие значения

$$d_2 = 6.2, \quad d_1 = 26.2, \quad d_0 = 5; \quad k_1 = -2, \quad k_0 = 5,$$

а возмущение

$$f(t) = 5 \sin 1.5t.$$

**Частотное адаптивное управление (без определения интервала дискретности)**  
 Выполнить Загрузить Сохранить Выход

Параметры объекта:  
 $d(s) = (5s+1)(s^2+6s+25)$ ;  
 $k(s) = 25(-0.4s+1)$ ;  
 $n(s) = 5$ ;

Полином при возмущении регулятора:  
 $l(s) = 0.2$ ;

Модалный полином:  
 $mod(s) = (s^5+15s^4+85s^3+226s^2+276s+120)$ ;

Предполагаемые степени полиномов  $d(s)$   и  $k(s)$  .

Внешнее возмущение:

Параметры испыт. воздействия:

	объекта	замкнутой системы
амплитуды	1.2 2.4 3.6	1 2 4 8 16
показатель экспоненты	0	0
частоты (соотв. амплитудам)	0.2 2 6	2 4 8 10 12

Параметры фильтрации:

	объекта	замкнутой системы
число периодов задержки	5	20
число периодов фильтрации	10	100
число делений минимального периода испытательных частот	480	240

Директива 311.2

Рис. 3.

**Частотное адаптивное управление (без определения интервала дискретности)**  
 Выполнить Загрузить Сохранить Выход

Выберите вид функции

Директива 311.2

Рис. 4.

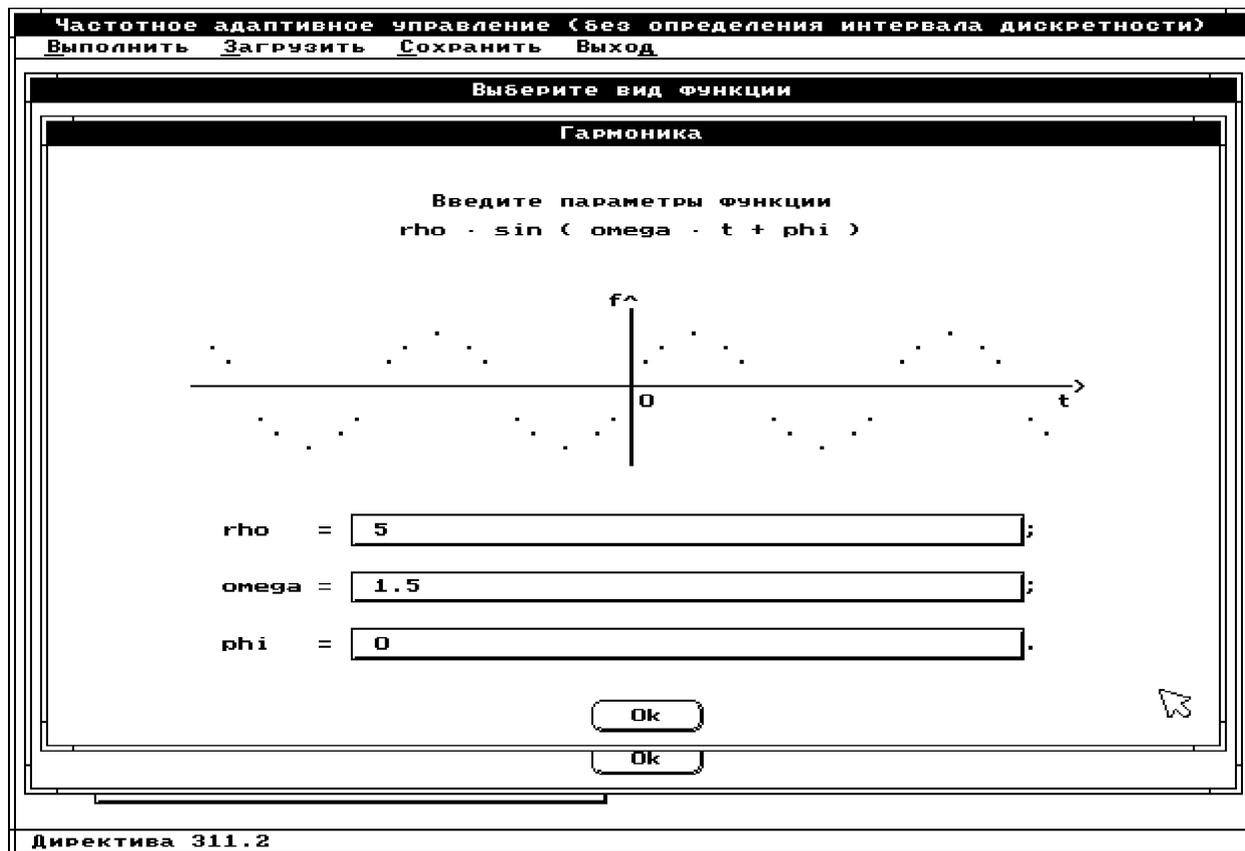


Рис. 5.

Эти эксперименты повторяются для различных частот и амплитуд испытательных воздействий до тех пор, пока не выполняются целевые условия (5). Амплитуды испытательных сигналов находятся так, чтобы испытательный сигнал не существенно изменял выход объекта.

На рис. 3 приведены найденные значения *параметров алгоритма адаптации*. Коэффициенты регулятора (2), полученные при таких параметрах:

$$g_2 = 0.99, \quad g_1 = 8.8, \quad g_0 = 5.78; \quad r_2 = 0.61, \quad r_1 = 23.69, \quad r_0 = 18.47.$$

При работе директивы, на экран (а затем и в протокол) выводится большой объем промежуточных результатов. При неудовлетворительных их значениях работа директивы прекращается пользователем, после чего он вводит новые значения параметров алгоритма.

*Александров Альберт Георгиевич – д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник ИПУ РАН.*

*Орлов Юрий Феликсович – канд. физ.-мат. наук, докторант Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.*

*Контактные телефоны: (095) 334-76-41, 939-56-67.*

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

#### Список литературы

1. Александров А.Г., Панин С.Ю. Система ГАММА-1РС для синтеза регуляторов многомерных систем // *Автоматизация в промышленности*. № 2, 2003.
2. Overschee P.Van, Moor B.De, Aling H., Kosut R., Boyd. S. A Fully Interactive Identification Module for  $X_{\text{math}}$  // *Preprints of 10-th IFAC Symposium on System Identification*. Copenhagen, Vol. 4, p. 1, 1994.
3. Kollar I., Pintelon R., Schoukens J. Frequency domain system identification toolbox for MATLAB: a complex application example // *Там же*. Copenhagen, Vol. 4, pp. 23-28, 1994.
4. Alexandrov A.G. Finite-Frequency Method of Identification // *Там же*. Copenhagen, Vol. 2, pp. 523-527, 1994.
5. Alexandrov A.G. Orlov Yu.F. Training in the identification and adaptive control processes using the package ADAPLAB // *Workshop on control education and technology transfer issues*, Preprints, Curitiba, Parana, Brazil, pp. 117-120, 1995.
6. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы // М.: Высшая школа. 1989.
7. Александров А.Г. Пакет АДАПЛАБ. Руководство пользователя // М.: МИСиС. 1998.