

УДК 62-50

ПАКЕТ ПРОГРАММ АДАПЛАБ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ

А.Г. Александров

Московский Государственный Институт Стали и Сплавов (Технологический Университет)
Россия, 144000, Электросталь, Первомайская, 7
E-mail: misis@elsite.ru

Ю.Ф. Орлов

Московский Государственный Институт Стали и Сплавов (Технологический Университет)
Россия, 144000, Электросталь, Первомайская, 7
E-mail: misis@elsite.ru

Ключевые слова: Программное обеспечение, идентификация, адаптивное управление, частотный подход

Key words: Software, identification, adaptive control, frequency approach

В работе описываются новые возможности для идентификации объектов в пакете программ АДАПЛАБ. Разработан ряд новых директив, существенно расширивший класс решаемых в пакете задач. Разработка сопровождалась увеличением набора внутренних программных единиц, модификацией ряда существующих для более гибкой работы по созданию директив пакета. Усовершенствован интерфейс для работы с пакетом, расширен набор функций внешних возмущений, тестовых сигналов, нелинейностей и пр. Приведен пример работы с пакетом.

PROGRAM PACKAGE ADAPLAB: NEW OPPORTUNITIES FOR IDENTIFICATION / A.G. Alexandrov (Moscow State Institute of Steel and Alloys, 7 Pervomayskaya, Electrostal 144000, Russia, E-mail: misis@elsite.ru), Yu.F. Orlov (Moscow State Institute of Steel and Alloys, 7 Pervomayskaya, Electrostal 144000, Russia, E-mail: misis@elsite.ru). In paper the new opportunities for identification of plants in the program package ADAPLAB are described. A number of the new directives much expanded class of problems, solved in a package is developed. The development was accompanied by increase of a set of internal program units, updating of a number existing for more flexible work on creation of the directives of a package. The interface for work with a package is advanced. The set of functions external disturbances, test signals, nonlinear and so on is extended. The example of work with a package is given.

1. Введение

АДАПЛАБ - это пакет прикладных программ для персональных ЭВМ типа IBM PC (и совместимых с ней), предназначенный для моделирования процессов идентификации и адаптивного управления, а также определения настраиваемых параметров алгоритмов идентификации и адаптации по результатам моделирования.

Он предназначен для инженеров - разработчиков систем управления. Такой инженер (пользователь) указывает номер директивы (решающей его задачу), вводит по запросу ЭВМ необходимые данные и анализирует результаты.

Главное отличие АДАПЛАБ от аналогичных пакетов [1-3] состоит в учете неизвестных ограниченных внешних возмущений, действующих на объект управления.

Одним из основных подходов к идентификации и адаптивному управлению непрерывными объектами при ограниченных возмущениях является частотный подход [4]. Частотные алгоритмы доминируют в пакете.

АДАПЛАБ использует также алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов и эталонной модели [5]. Результаты моделирования с использованием различных алгоритмов идентификации и адаптации позволяют выбрать соответствующий алгоритм.

2. Структура пакета

Классы решаемых задач пакета программно реализованы в виде **директив** и включают в себя, в частности:

- Частотную идентификацию
- Идентификацию на основе метода наименьших квадратов
- Частотное адаптивное управление
- Адаптивное управление на основе метода наименьших квадратов
- Адаптивное управление с эталонной моделью

Директивы используют **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; и подпрограммы **согласования** модулей, среди которых: установка начальных условий системы, вычисление интервала дискретности.

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

Ввод и сохранение данных обеспечивают подпрограммы «**ввода-вывода**». Имеется интерфейс ввода, вывод таблиц и графиков на экран, ведение протокола и пр.

3. Новые директивы

За время, прошедшее с предыдущей публикации [6], в пакете появился ряд новых директив, существенно расширивший его функциональные возможности. Так, в пакете стала возможной частотная идентификация и адаптивное управление непрерывных и дискретных объектов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), с ПИД регулятором, моделирование объекта (с ШИМ) замкнутого таким регулятором, идентификация с частично известными коэффициентами передаточной функции. Появился ряд вспомогательных директив определения амплитуд и частот испытательного воздействия, выбора интервалов дискретности задержки и фильтрации для частотной идентификации, и пр.. Всего на данный момент пакет насчитывает 42 директивы, предоставляющие пользователю широкий спектр средств для исследования процессов идентификации и адап-

тивного управления. Полный список директив пакета приведен в приложении П1.

Разработка новых директив привела к расширению набора модулей, частичной модификации существующих, а также увеличению инструментария общего математического обеспечения. Общее число (только расчетных) подпрограмм на настоящий момент составило 540.

Кроме того, существенно расширен и унифицирован набор функций внешних возмущений, среди которых появились различные меандровые воздействия с равномерно либо нормально распределенными случайными амплитудой и частотой, появились зоны насыщения и нечувствительности, увеличился набор тестовых сигналов.

Разработаны удобные средства для создания многооконного интерфейса, позволяющие быстро создавать макет будущей директивы и связывать поля ввода данных с расчетной подпрограммой.

4. Пример

4.1. Описание объекта

Рассмотрим полностью управляемый асимптотически устойчивый объект, описывающий реальную систему обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка

$$(1) \quad T_0 T_1 \ddot{y} + (T_0 + T_1) \dot{y} + y = k_p T_2 \dot{\mu} + k_p \mu + f,$$

где $y(t)$ - измеряемый выход, $f(t)$ - неизвестное ограниченное возмущение. Постоянные времени T_0, T_1, T_2 и коэффициент передачи k_p объекта - неизвестны. Перемещение $\mu(t)$ заслонки исполнительного механизма описывается уравнением привода постоянной скорости с ШИМ, вида

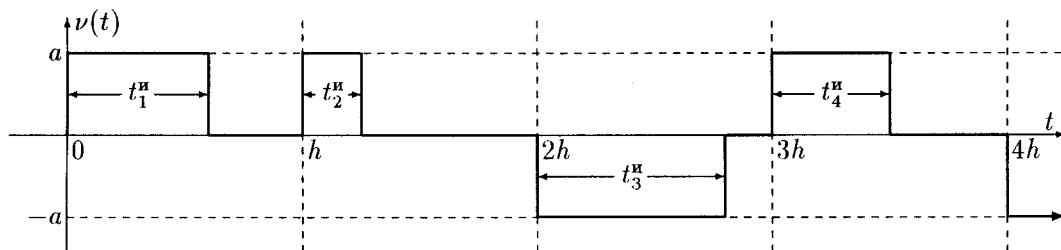
$$(2) \quad \dot{\mu} = k_d v,$$

в котором k_d - известный коэффициент передачи привода, $v(t)$ - выход ШИМ, описываемый следующей зависимостью

$$(3) \quad v(t) = \begin{cases} a \operatorname{sign} u(t) & \text{при } (i-1)h \leq t < (i-1)h + t_i^n \\ 0 & \text{при } (i-1)h + t_i^n \leq t < ih \end{cases}$$

$$t_i^n = \frac{h}{u_{\max}} |u[(i-1)h]|, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где $u(t)$ - вход ШИМ, максимальное значение $u_{\max} = \max |u(t)|$ которого известно. Амплитуда ШИМ a и его период h - заданные числа. График функции (3) приведен на нижеследующем рисунке.



Включим исполнительный механизм (2) в объект (1)

$$(4) \quad \ddot{y} + d_2 \dot{y} + d_1 y = k_1 \dot{v} + k_0 v + f,$$

где $d_2 = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_1}$, $d_1 = \frac{1}{T_0 T_1}$, $k_1 = \frac{k T_2}{T_0 T_1}$, $k_0 = \frac{k}{T_0 T_1}$ и $k = k_p k_d$.

4.2. Цель идентификации

Параметры объекта (1)

$$(5) \quad T_0 = 1000, \quad T_1 = 50, \quad T_2 = -50, \quad k = 0.005$$

и внешнее возмущение $f(t) = \sin 2.5t$ - неизвестны. $|f(t)| \leq 1$. Начальные условия: $y(t_0) = \dot{y}(t_0) = 0$, $t_0 = 0$.

Необходимо найти оценки \hat{d}_2 , \hat{d}_1 , \hat{k}_1 и \hat{k}_0 коэффициентов «объекта» (4), такие, чтобы удовлетворялись следующие требования к точности идентификации

(6)

$$100 \frac{\hat{d}_2 - d_2}{d_2} \leq 25\%, \quad 100 \frac{\hat{d}_1 - d_1}{d_1} \leq 25\%, \quad 100 \frac{\hat{k}_1 - k_1}{k_1} \leq 25\%, \quad 100 \frac{\hat{k}_0 - k_0}{k_0} \leq 25\%.$$

4.3. Результаты идентификации

Для идентификации «объекта» (4) используем директиву 131.2 пакета. Экран ввода исходных данных (с фрагментом ввода внешнего возмущения) имеет вид

Частотная идентификация с ШИМ	
Выполнить Загрузить Сохранить Выход	
Параметры объекта:	
$d(s) =$	$(1000*s+1)*(50*s+1)*s$
$k(s) =$	$0.005*(-50*s+1)$
$n(s) =$	s
Предполагаемые степени полиномов $d(s)$ <input type="text" value="3"/> и $k(s)$ <input type="text" value="1"/> .	
Внешнее возмущение: <input type="text" value="Гармоника: sin(2.5*t)"/>	
Выберите вид функции	
Гармоника	
Введите параметры функции: $\rho \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$	
$\rho =$ <input type="text" value="1"/>	$\omega =$ <input type="text" value="2.5"/>
$\phi =$ <input type="text" value="0"/>	
Ok	
шаг ШИМа	<input type="text" value="31.415"/>
высота полки	<input type="text" value="220"/>
максимальное значение входн. сигнала	<input type="text" value="220"/>
амплитуды испытательного воздействия	<input type="text" value="20 20 20"/>
показатель экспоненты	<input type="text" value="0"/>
частоты (соответственно амплитудам)	<input type="text" value="0.001 0.002 0.003"/>
число периодов задержки	<input type="text" value="5"/>
число периодов фильтрации	<input type="text" value="2"/>
число делений минимального периода испытательных частот	<input type="text" value="10000"/>
Директива 131.2	

На вход ШИМ подадим испытательное воздействие

$$(7) \quad u(t) = 20 \sin 0.001t + 20 \sin 0.002t + 20 \sin 0.003t.$$

Интервал дискретности $h = T/N$ зададим числом делений $N = 1000$ периода $T = 2\pi/\omega_3 \approx 35$ мин. максимальной испытательной частоты.

Спустя пять периодов T задержки, выход объекта $y(t)$ подадим на вход фильтра Фурье. При двух периодах T фильтрации получились следующие оценки частотных параметров

$$\begin{aligned}\hat{\alpha}_1 &= -2.8723, & \hat{\beta}_1 &= -2.3361; \\ \hat{\alpha}_2 &= -1.1299, & \hat{\beta}_2 &= -0.29937; \\ \hat{\alpha}_3 &= -0.55222, & \hat{\beta}_3 &= -0.01125.\end{aligned}$$

Идентифицированная по ним передаточная функция имеет вид

$$(8) \quad \hat{w}(s) = 0.005268 \cdot \frac{-59.04s + 1}{(1013.7s + 1)(42.316s + 1)} \cdot \frac{180740}{180740s + 1}.$$

Сравнивая ее с истинной передаточной функцией «объекта» (4)

$$(9) \quad w(s) = 0.005 \cdot \frac{-50s + 1}{(1000s + 1)(50s + 1)} \cdot \frac{1}{s}$$

видим, что они практически совпадают.

Протокол результатов счета, содержащий полученные значения и ряд промежуточных результатов приведен в приложении П2.

Приложение 1. Список директив пакета АДАПЛАБ

Сгруппируем директивы пакета АДАПЛАБ в таблицу по следующей их принадлежности:

№ дир	Название директивы
1. Частотная идентификация	
<i>1.1. 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
Дополнительные директивы	
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
Вспомогательные директивы	
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>1.2. Дискретная модель</i>	
121.2	Построение дискретной модели
Дополнительные директивы	
121.1	Директива 121.1 со стандартным приведением к форме «вход–выход»

121.3	Директива 121.2 для использования в учебном процессе
<i>1.3. Модель с ШИМ</i>	
131.1	Идентификация с ШИМ с параллельной фильтрацией
131.2	Идентификация с ШИМ с последовательной фильтрацией
Дополнительные директивы	
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
2. Идентификация на основе МНК	
211.3	Построение дискретной модели
Дополнительные директивы	
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
3. Частотное адаптивное управление	
<i>3.1. Непрерывная модель</i>	
311.2	Модальное управление
Дополнительные директивы	
311.1	Директива 311.2 со стандартным приведением к форме «вход-выход»
311.3	Директива 311.2 с фильтрацией по $y(t)$
Вспомогательные директивы	
312.1	Выбор интервала дискретности для директивы 311.2
313.1	Управление по критерию точности (модальное управление с АКОР)
<i>3.2. Дискретная модель</i>	
321.1	Дискретное модальное управление
321.2	Объединение директив 321.1 и 322.1
Вспомогательные директивы	
322.1	Выбор интервалов задержки и фильтрации (без внешнего возмущения)
4. Адаптивное управление на основе МНК	
411.1	Модальное управление
5. Адаптивное управление с эталонной моделью	
511.1	Адаптивное управление с эталонной моделью
6. ПИД регуляторы	
<i>6.1. Адаптивные ПИД регуляторы</i>	
314.2	Модальное управление (директива 311.2 с ПИД-регулятором и задающим воздействием)
Дополнительные директивы	
314.1	Директива 314.2 без задающего воздействия
314.3	Директива 314.2 с фильтрацией по $y(t)$
Вспомогательные директивы	
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>6.2. ПИД регуляторы с ШИМ</i>	
331.2	Частотное адаптивное управление с ШИМ
Вспомогательные директивы	

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

Приложение 2. Протокол результатов счета

По окончании работы любой директивы формируется протокол результатов счета. Для примера 4 он имеет вид

ПРОТОКОЛ РЕЗУЛЬТАТОВ СЧЕТА
Дата: 26 апреля 2000 г. Время: 10 ч. 38 м. 37 с.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Протокол - #dir_131.2 (001).

Объект задан обыкновенным дифференциальным уравнением

$$d(s)*y=k(s)*u+m(s)*f,$$

где $d(s)=(1000*s+1)*(50*s+1)*s;$

$$k(s)=0.005*(-50*s+1);$$

$$m(s)=s.$$

Предполагаемые степени полиномов передаточной функции объекта:

$$\deg(d)=3; \deg(k)=1.$$

Внешнее возмущение - гармоника с параметрами: $\sin(2.5*t)$.

Параметры ШИМа:

- 1) Шаг ШИМа: 31.415;
- 2) Высота полки: 220;
- 3) Максимальное значение входного сигнала: 220.

Параметры генератора испытательного воздействия:

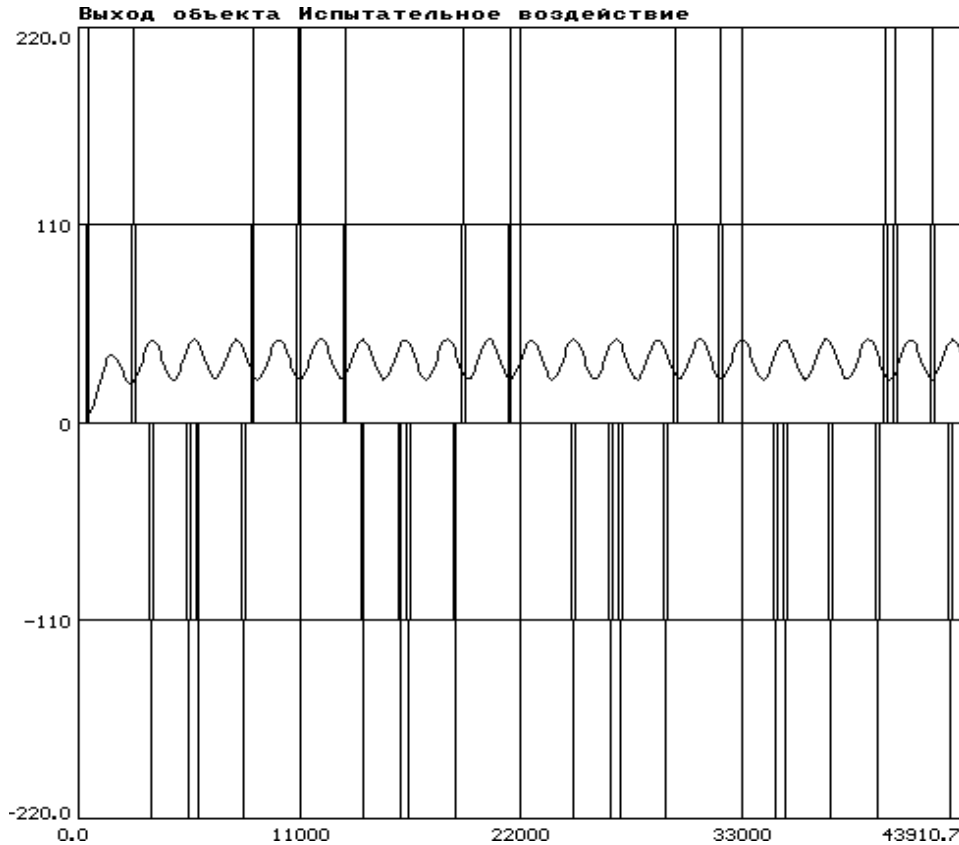
$$\exp(0.0*t)*[20*\sin(0.001*t)+20*\sin(0.002*t)+20*\sin(0.003*t)].$$

Параметры фильтрации:

- 1) Время задержки: 5 периодов минимальной частоты
- 2) Время фильтрации: 2 периода минимальной частоты
- 3) Число делений периода максимальной частоты: 10000.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЧЕТА

Результаты моделирования объекта



Оценки частотных параметров объекта

$$\begin{aligned} \alpha(1) &= -2.8723, & \beta(1) &= -2.3361; \\ \alpha(2) &= -1.1299, & \beta(2) &= -0.29937; \\ \alpha(3) &= -0.55222, & \beta(3) &= -0.01125. \end{aligned}$$

Сравнение идентифицированного полинома $d_{\text{ident}}(s)$ с истинным

$$\begin{aligned} d_{\text{ident}}(s) &= s^3 + 0.024623 \cdot s^2 + 2.3446 \cdot 10^{-5} \cdot s + 1.2896 \cdot 10^{-10} \\ d(s) &= s^3 + 0.021 \cdot s^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot s \end{aligned}$$

Сравнение идентифицированного полинома $k_{\text{ident}}(s)$ с истинным

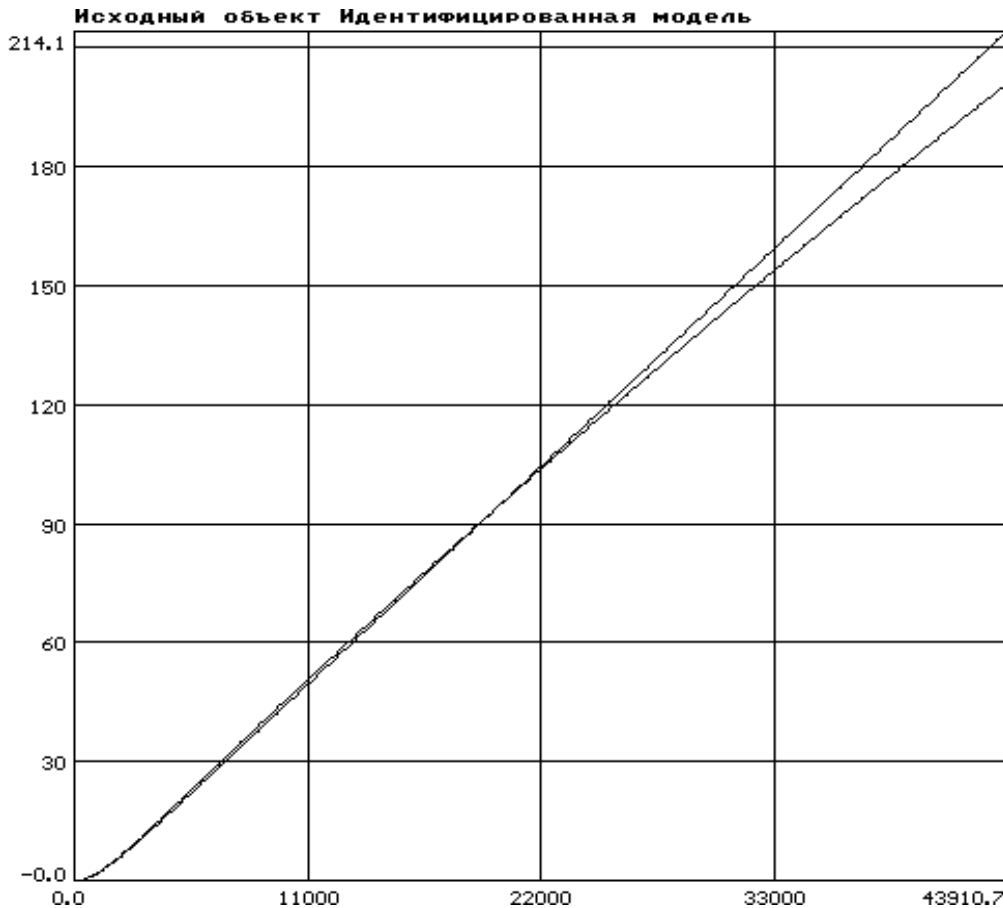
$$\begin{aligned} k_{\text{ident}}(s) &= -7.2498 \cdot 10^{-6} \cdot s + 1.2279 \cdot 10^{-7} \\ k(s) &= -5 \cdot 10^{-6} \cdot s + 10^{-7} \end{aligned}$$

Сравнение идентифицированной и истинной передаточных функций объекта

$$\frac{k_{\text{ident}}(s)}{d_{\text{ident}}(s)} = 0.005268 \cdot \frac{-59.04 \cdot s + 1}{(1013.7 \cdot s + 1) \cdot (42.316 \cdot s + 1)} \cdot \frac{180740}{180740 \cdot s + 1},$$

$$\frac{k(s)}{d(s)} = 0.005 \cdot \frac{-50 \cdot s + 1}{(1000 \cdot s + 1) \cdot (50 \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{s}.$$

Подтверждение модели



Список литературы

1. Overschee P.Van, Moor B.De, Aling H., Kosut R., Boyd S. A Fully Interactive Identification Module for Xmath // Preprints of the 10th IFAC Symposium on System Identification. Copenhagen. 1994. Vol. 4. P. 1.
2. Kollar I., Pintelon R., Schoukens J. Frequency domain system identification toolbox for MATLAB: a complex application example // Preprints of the 10th IFAC Symposium on System Identification. Copenhagen. 1994. Vol. 4. P. 23-28.
3. Szafnicki K., Gentil S. Toward a Knowledge-Based Training Tool for Identification with Benchmark // Preprints of the 10th IFAC Symposium on System Identification. Copenhagen. 1994. Vol. 2. P. 447-452.
4. Alexandrov A.G. Finite-Frequency Method of Identification // Preprints of the 10th IFAC Symposium on System Identification. Copenhagen. 1994. Vol. 2. P. 523-527.
5. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа, 1989. 264 с.
6. 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. 1995. Curitiba, Parana, Brazil. P. 117-120.