Оглавление

1 Введение **4**

2 Классы решаемых задач **5**

3 Требования к ЭВМ, вызов и загрузка системы **8**

4 Ввод исходных данных **8**
4.1 Общие сведения 8
4.2 Экраны интерфейса 9

5 Вывод результатов и примеры применения **12**
5.1 Вывод результатов (общие сведения) 12
5.2 Директива 111.4 12
5.3 Директива 121.3 13
5.4 Директива 211.3 14
5.5 Директива 311.1 14
5.6 Директива 411.1 16
5.7 Директива 511.1 16

6 Сведения об алгоритмах идентификации и адаптивного управления **17**
6.1 Частотная идентификация (директивы 111.3 и 121.2) 17
6.1.1 Задача идентификации 17
6.1.2 Частотные параметры 18
6.1.3 Алгоритм идентификации (директива 111.3) 19
6.1.4 Директива 113.1: Директива 111.3 с частично известными коэффициентами передаточной функции 19
6.1.5 Директива 111.1: Директивы 111.3 со стандартным приведением к форме вход-выход 20
6.1.6 Директива 111.4: Директива 111.3 для использования в учебном процессе 20
6.1.7 Директива 116.2: Определение частот испытательного воздействия 20
6.1.8 Директива 116.3: Определение амплитуд испытательного воздействия 20
6.1.9 Директива 117.1: Выбор интервала дискретности для частотной идентификации 20
6.1.10 Идентификация дискретной модели непрерывного объекта при больших интервалах дискретности h (директива 121.2) 21

6.1.11 Директива 121.1: Директива 121.2 со стандартным приведением к форме вход-выход 22
6.1.12 Директива 121.3: Директива 121.2 для использования в учебном процессе 22
6.1.13 Идентификация с ШИМ(директивы 131.1, 131.2, 131.3, 131.4, 131.5, 131.6) 22
6.2 Метод наименьших квадратов (директива 211.3) 24
6.2.1 Директива 211.1: Директива 211.3 со стандартным приведением к форме вход-выход 25
6.3 Идентификационное частотное адаптивное управление (директива 311.2) 25
6.3.1 Постановка задачи 25
6.3.2 Директива 311.1: Директива 311.2 со стандартным приведением к форме вход-выход 28
6.3.3 Директива 311.3: Директива 311.2 с фильтрацией по $y(t)$ 28
6.3.4 Директива 312.1: Выбор интервала дискретности для директивы 311.2 28
6.3.5 Идентификационное частотное адаптивное управление при больших интервалах дискретности (директива 321.1) 29
6.3.6 Директива 321.2: Объединение директив 321.1 и 322.1 29
6.3.7 Директива 322.1: Выбор интервалов задержки и фильтрации 29
6.4 Адаптивное управление на основе МНК (директива 411.1) . 29
6.5 Адаптивное управление с эталонной моделью (директива 511.1) 31
6.6 Частотное адаптивное управление с ПИД-регуляторами . . 32
6.6.1 Частотное адаптивное управление с ПИД-регуляторами (директива 314.2) 32
6.6.2 Директива 314.1: Директива 314.2 без задающего воздействия 33
6.6.3 Директива 314.3: Директива 314.2 с фильтрацией по $y(t)$ 33
6.6.4 Директива 116.4: Моделирование объекта с дискретным ПИД–регулятором 33
6.6.5 Директива 315.2: Неадаптивное модальное управление с ПИ, ПИД и ПДД регуляторами 34
6.6.6 Директива 316.1: Идентификация и модальное управление по экспериментальным данным 34

6.7 Частотное адаптивное управление с ПДД-регуляторами для объекта с ШИМ 35
6.7.1 Частотное адаптивное управление с ПДД-регуляторами (директива 331.2) 35
6.7.2 Директива 116.5: Моделирование объекта с дискретным ПДД–регулятором и ШИМ 35
6.7.3 Директива 333.1: Неадаптивное модальное управление с ШИМ по экспериментальным данным 35
6.7.4 Директива 332.1: Неадаптивное модальное управление с ШИМ 35

7 Литература **36**

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 и 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.

Настоящее руководство содержит описание классов задач (директив), правила ввода данных и структуру вывода результатов.

Время освоения АДАПЛАБ находится в пределах одного часа, если придерживаться следующей последовательности: указать класс решаемой задачи из раздела 2, решить пример приведенный в разделе 5, сравнивая полученные результаты с протоколами, приведенными в приложении, обращаясь к правилам ввода (раздел 4) и описанию вывода (раздел 5) по мере необходимости.

2 Классы решаемых задач

Главное отличие АДАПЛАБ от аналогичных пакетов [1]-[3] состоит в учёте 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],[5], развитый на случай неустойчивых объектов в работах [6]-[8]. Частотные алгоритмы доминируют в пакете.

АДАПЛАБ использует также алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов и эталонной модели [9],[10], которые могут быть полезны для решения задачи в условиях неопределенных возмущений. Результаты моделирования с использованием различных алгоритмов идентификации и адаптации позволяют выбрать соответствующий алгоритм.

Классы и подклассы задач, решаемых с помощью АДАПЛАБ приведены в таблице 2.1, где указаны также номера директив АДАПЛАБ, с помощью которых решаются эти задачи.

СПИСОК ДИРЕКТИВ АДАПЛАБ

Таблица 2.1

N дир.	Наименование подклассов решаемых задач
1. Частотная идентификация	
1.1 Непрерывная модель	
111.3	Построение непрерывной модели
112.1	Построение непрерывной модели с ее подтверждением
113.1	Директива 111.3 с частично известными коэффициентами передаточной функции
Дополнительные директивы	
111.1	Директива 111.3 со стандартным приведеием 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

Таблица 2.1

N дир.	Наименование подклассов решаемых задач
1.2 Дискретная модель	
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
1.3 Модель с ШИМ	
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 Метода Наименьших Квадратов	
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 объекта d(q) и k(q)
3. Частотное адаптивное управление	
3.1 Непрерывная модель	
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

N дир.	Наименование подклассов решаемых задач
	3.2 Дискретная модель
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 Метода Наименьших Квадратов
411.1	Модальное управление
	5. Адаптивное управление с эталонной моделью
511.1	Адаптивное управление с эталонной моделью
	6. ПИД регуляторы
	6.1 Адаптивные ПИД регуляторы
314.2	Модальное управление (директива 311.2 с ПИД-регуляторои 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
	6.2 ПИД регулятор с ШИМ
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

3 Требования к ЭВМ, вызов и загрузка системы

Для использования пакета АДАПЛАБ необходимы:

- Персональная ЭВМ типа IBM PC или совместимая с ней.
- MS-DOS версии 5.0 и выше.
- Процессор 80386 и выше.
- 2 MB доступной оперативной памяти.
- Свободное пространство на жёстком диске более 2.5 MB.

Вызов и загрузка системы АДАПЛАБ:

- осуществляется запуском файла `adaplab.bat`.

4 Ввод исходных данных

4.1 Общие сведения

Ввод исходных данных для запуска директивы осуществляется с помощью интерфейса (пользовательские меню (экраны интерфейса) приведены в п.4.2), который запрашивает:

1. Полиномы объекта $d(s)$, $k(s)$, $m(s)$. Они задаются в следующих формах:
   (a) по коэффициентам: $(d_0 + d_1 s + \cdots + d_n s^n)$,
   например: $d(s) = (s^3 + 2s^2 + 5s + 1)$.
   (b) разложенные на множители: $(d_{00} + \cdots + d_{0n} s^n) \cdots (d_{k0} + \cdots + + d_{kn} s^n)$,
   например: $d(s) = (s^2 + 16)(2s + 1)$;
2. Полиномы $d\%(s)$, $k\%(s)$, содержат вариации коэффициентов полиномов $d(s)$ и $k(s)$ соответственно. Полиномы $d\%(s)$, $k\%(s)$ записываются аналогично $d(s)$ и $k(s)$, где на месте коэффициентов стоят их соответствующие вариации (в процентах),
   например: Пусть в полиноме $d(s) = (2s + 1)$ коэффициент при s может изменяться в пределах 20%, а свободный член в пределах 30%. Тогда полином $d\%(s)$ задается в следующем виде:
   $d\%(s) = (20s + 30)$.

3. Номер режима работы директивы, где необходимо набрать либо «1», если выбран режим работы без учета вариаций коэффициентов объекта и параметров внешнего возмущения, либо «2», «3» и т.д. до «9», если выбран режим с учетом задаваемых вариаций.

4. Возмущение (внешнее возмущение):

   (a) ступенька [момент приложения (t_0), высота (h)],

   (b) синус [амплитуда (ro), частота ($omega$) и фаза (phi)],

   (c) внешнее возмущение отсутствует.

5. Вариации параметров внешнего возмущения – «амплитуды» и «частоты».

6. Параметры испытательного воздействия: показатель экспоненты ($lambda$), амплитуды ($ro(i)$) и частоты ($omega(i)$) испытательного воздействия. Последние должны быть кратны наименьшей частоте и задаются в соответствующих строках через «пробел»начиная с наименьшей частоты.

7. Параметры фильтрации: число периодов задержки и фильтрации (периоды наименьшей частоты), шаг дискретности, который задается числом делений минимального периода испытательных частот.

8. Предполагаемые степени полиномов $d_{ident}(s)$ и $k_{ident}(s)$ идентифицируемой модели.

В АДАПЛАБ предусмотрена возможность сохранения исходных данных под некоторым произвольным именем (с помощью раздела меню «Сохранить»). При повторной загрузке сохраненных исходных данных используется раздел меню «Загрузить», где запрашивается имя нужных данных. Для запуска директивы необходимо выбрать раздел меню «Выполнить». Раздел меню «Выход» служит для выхода из меню в DOS.

4.2 Экраны интерфейса

Экран интерфейса для директивы 111.3 приведён на рис. 1. Из основного экрана вызывается экран «Выберите вид возмущения». Последний позволяет вызвать экран для задания параметров возмущения. Экраны для директив 121.2 и 211.1 аналогичны описанным.

На рис. 2 приведён экран для директивы 311.1. Из основного экрана вызываются вид и параметры возмущения, а также «Допуска алгоритма адаптации».

Экраны для директив 411.1, 511.1 аналогичны экранам директивы 311.1.

5 Вывод результатов и примеры применения

5.1 Вывод результатов (общие сведения)

В процессе выполнения директивы на экран выводятся промежуточные результаты вычислений, которые после окончания вычислений сохраняются в протоколе результатов. Протокол сохраняется после «выхода» из АДАПЛАБ в файле с именем директивы. Протокол не отражает графиков, которые в процессе вычислений приводятся на экране.

Протокол каждой из директив приведен в приложении. В этих протоколах указаны номера и наименования таблиц, выводимых на экран в процессе выполнения директивы, а также результаты решения реальных задач идентификации и адаптивного управления, приводимых в последующих подразделах. В этих подразделах приводятся названия графиков, которые выводятся на экран в процессе выполнения директивы.

5.2 Директива 111.4

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый уравнением:

$$\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{u} + k_0 u + f. \tag{1}$$

Граница возмущения:

$$f^* = 1.$$

Задача 5.1 *Найти оценки коэффициентов объекта, такие, чтобы удовлетворялись следующие требования к точности идентификации*

$$|\triangle d_i| \le 3, \quad |\triangle k_i| \le 3 \quad i = \overline{0,1}. \tag{2}$$

■

Примечание 5.1 Истинные коэффициенты объекта (1)

$$d_0 = -16, \quad d_1 = 0, \quad k_0 = -30, \quad k_1 = 5, \tag{3}$$

возмущение $f(t) = \sin 2.5t; \quad y(t_0) = \dot{y}(t_0) = 0,\ t_0 = 0.$

Минимально-фазовый вариант этого объекта описан [11]. ■

Объект (1) возбуждался испытательным воздействием

$$u(t) = 0.03e^{4.2t}(\sin 9t + \sin 18t). \tag{4}$$

Время задержки – 2 периода, время фильтрации – 5 периодов, число делений – 480 (интервал дискретности $T = \frac{2\pi}{480\cdot 18}$).

В результате идентификации получены следующие коэффициенты объекта:

$$d_0 = -17.66, \quad d_1 = -0.33, \qquad k_0 = -32.19, \quad k_1 = 5.02 \tag{5}$$

Протокол результатов приведен в приложении А.1.1.

5.3 Директива 121.3

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый уравнением :

$$d_3 \dddot{y} + d_2 \ddot{y} + d_1 \dot{y} + d_0 y = k_1 \dot{u} + k_0 u + f. \tag{6}$$

Его дискретная модель имеет вид:

$$\begin{gathered} d_3^{\text{д}} y(k) + d_2^{\text{д}} y(k-1) + d_1^{\text{д}} y(k-2) + d_0^{\text{д}} y(k-3) = \\ = k_2^{\text{д}} u(k-1) + k_1^{\text{д}} u(k-2) + k_0^{\text{д}} u(k-3) + f(k). \end{gathered} \tag{7}$$

Граница возмущения:

$$f^* = 1.$$

Задача 5.2 *Найти оценки коэффициентов объекта (7), такие, чтобы удовлетворялись следующие требования к точности идентификации*

$$|\triangle d_i^{\text{д}}| \le 0.3, \quad |\triangle k_i^{\text{д}}| \le 0.3, \quad i = \overline{0,4} \tag{8}$$

■

Примечание 5.2 Объект (6) имеет вид:

$$(s^2 + 6s + 25)(5s + 1)y = 25(-0.4s + 1)u + f,$$

где возмущение $f(t) = \sin t$.

Истинные коэффициенты объекта (6)

$$d_0 = 25, \quad d_1 = 131, \quad d_2 = 31, \quad d_3 = 5; \qquad k_0 = 25, \quad k_1 = -10. \tag{9}$$

Коэффициенты его дискретной модели:

$$\begin{gathered} d_0^{\text{д}} = -2.25, \quad d_1^{\text{д}} = 4.82, \quad d_2^{\text{д}} = -3.59, \quad d_3^{\text{д}} = 1, \\ k_0^{\text{д}} = 0, \quad k_1^{\text{д}} = 0, \quad k_2^{\text{д}} = -0.02, \quad k_3^{\text{д}} = -0.02 \end{gathered} \tag{10}$$

■

Этот объект описан [12].

Объект (6) возбуждался испытательным воздействием

$$u(t) = 0.02(\sin 0.2t + \sin 4t + \sin 8t). \tag{11}$$

Время задержки – 1 период, время фильтрации – 2 периода, число делений – 12 (интервал дискретности $T = \frac{2\pi}{12 \cdot 8}$).

В результате идентификации получены следующие коэффициенты объекта:

$$\begin{gathered} d_0^{\text{д}} = -2.25, \quad d_1^{\text{д}} = 4.83, \quad d_2^{\text{д}} = -3.59, \quad d_3^{\text{д}} = 1; \\ k_0^{\text{д}} = 0, \qquad k_1^{\text{д}} = 0.03, \quad k_2^{\text{д}} = -0.02, \quad d_3^{\text{д}} = -0.02. \end{gathered} \tag{12}$$

Протокол результатов приведен в приложении А.1.2.

5.4 Директива 211.3

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый уравнением :

$$\dddot{y} + d_2\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{u} + k_0 u + f. \tag{13}$$

Граница возмущения:

$$f^* = 0.5.$$

Объект (13) в дискретной форме имеет вид:

$$\begin{array}{c} d_3^{\text{д}} y(k) + d_2^{\text{д}} y(k-1) + d_1^{\text{д}} y(k-2) + d_0^{\text{д}} y(k-3) = \\ = k_2^{\text{д}} u(k-1) + k_1^{\text{д}} u(k-2) + k_0^{\text{д}} u(k-3) + f(k). \end{array} \tag{14}$$

Задача 5.4 *Найти оценки коэффициентов объекта (14), такие, чтобы удовлетворялись следующие требования к точности идентификации*

$$|\triangle d_i^{\text{д}}| \le 1.5, \quad |\triangle k_i^{\text{д}}| \le 1.5 \quad i = \overline{0,4} \tag{15}$$

■

Примечание 5.4 Объект имеет вид (6), где возмущение $f(t) = 0.5 \sin 0.15t$.

Истинные коэффициенты его дискретной модели (14)

$$\begin{array}{llll} d_0^{\text{д}} = -3.38, & d_1^{\text{д}} = 5.89, & d_2^{\text{д}} = -3.59, & d_3^{\text{д}} = 1; \\ k_0^{\text{д}} = 0, k_1^{\text{д}} = 0.07, & k_2^{\text{д}} = -0.07, & k_3^{\text{д}} = -0.06. & \end{array} \tag{16}$$

Объект (6) возбуждался испытательным воздействием

$$u(t) = \sin 2t + \sin 4t + \sin 8t. \tag{17}$$

В результате идентификации получены следующие коэффициенты объекта:

$$\begin{array}{llll} d_0^{\text{д}} = -1.84, & d_1^{\text{д}} = 4.33, & d_2^{\text{д}} = -3.49, & d_3^{\text{д}} = 1; \\ k_0^{\text{д}} = 0, k_1^{\text{д}} = 0.02, & k_2^{\text{д}} = -0.04, & k_2^{\text{д}} = 0.01. & \end{array} \tag{18}$$

Протокол результатов приведен в приложении А.1.3.

5.5 Директива 311.1

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый уравнением :

$$\dddot{y} + d_2\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{u} + k_0 u + f, \tag{19}$$

Граница возмущения

$$f^* \le 10 \tag{20}$$

Задача 5.5 *Найти регулятор*

$$g_2\ddot{u} + g_1\dot{u} + g_0 u = r_2\ddot{y} + r_1\dot{y} + r_0 y, \tag{21}$$

такой, чтобы характеристический полином системы (19),(21) и желаемый полином

$$\psi(s) = s^5 + 15s^4 + 85s^3 + 226s^2 + 276s + 120 \tag{22}$$

удовлетворяли следующим требованиям

$$|\psi_i - \varphi_i| \le 0.2\psi_i, \quad i = \overline{1,5} \tag{23}$$

Примечание 5.4 Объект имеет вид (6), где возмущение $f(t) = 10\sin 6.1t$.

Объект (13) возбуждался испытательным воздействием

$$u(t) = \sin 2t + \sin 4t + \sin 6t. \tag{24}$$

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

В результате идентификации получены следующие коэффициенты объекта:

$$\begin{array}{lll} d_0 = 4.93, & d_1 = 25.79, & d_2 = 6.14; \\ k_0 = 4.92, & k_1 = -1.96. & \end{array} \tag{25}$$

По этим коэффициентам синтезирован регулятор:

$$\begin{array}{lll} g_0 = 5.56, & g_1 = 8.79, & g_2 = 0.99; \\ r_0 = -18.54, & r_1 = -23.73, & r_2 = -0.50. \end{array} \tag{26}$$

Система (19),(21) возбуждалась испытательным воздействием

$$u(t) = \sin 0.2t + \sin 1t + \sin 2t + \sin 4t + \sin 6t). \tag{27}$$

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:

$$\begin{array}{lll} g_0 = 5.60, & g_1 = 8.76, & g_2 = 1; \\ r_0 = -18.43, & r_1 = -24.19, & r_2 = -0.66. \end{array} \tag{28}$$

Протокол результатов приведен в приложении А.1.4

5.6 Директива 411.1

Пусть имеем объект, описываемый разностными уравнениями:

$$y(k+1) + \varphi_1 y(k) + \varphi_2 y(k-1) = r_1 u(k) + r_2 u(k-1) + f(k+1). \qquad (29)$$

Задача 5.6 *Найти регулятор*

$$u(k) + \varphi_{p1} u(k-1) + \varphi_{p2} u(k-2) = r_{p1} y(k-1) + r_{p2} y(k-2). \qquad (30)$$

такой, чтобы при достаточно больших k характеристический полином системы (29), (30) был близок к желаемому полиному

$$\psi(s) = (5s^3 + 100s^2 + 670s + 1500)(s+1).$$

Примечание 5.6 Уравнение (29), начальный регулятор и желаемый полином вводятся в непрерывной форме. Коэффициенты найденного регулятора (для объекта с коэффициентами (3), $f = 0.1(t)$ и желаемым полиномом $\psi(s) = (5s^3 + 100s^2 + 670s + 1500)(s+1)$) имеют следующие значения:

$$\varphi_{p1} = -1.79, \quad \varphi_{p2} = 0.85; \qquad r_{p1} = 0.73, \quad r_{p2} = -0.70.$$

Протокол результатов приведен в приложении А.1.5

5.7 Директива 511.1

Пусть задан полностью управляемый и полностью наблюдаемый объект, описываемый уравнением [13]:

$$\ddot{y}(t) - y(t) = \dot{u}(t) + 2u(t) + \dot{f}(t) + 2f(t). \qquad (31)$$

Эталонная модель, описывается уравнением:

$$\ddot{y}^m(t) + 5\dot{y}^m(t) + 6y^m(t) = \dot{g}^m(t) + 2g^m(t). \qquad (32)$$

Задающее воздействие g и внешнее возмущение f имеет вид:

$$\begin{array}{l} g(t) = 20\cos 2.5t + 20\cos 5.0t; \\ f(t) = 2 \cdot \mathbf{1}(t). \end{array} \qquad (33)$$

Коэффициент $\gamma = 500$.
Протокол результатов приведен в приложении А.1.6.

6 Сведения об алгоритмах идентификации и адаптивного управления

6.1 Частотная идентификация (директивы 111.3 и 121.2)

6.1.1 Задача идентификации

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый дифференциальным уравнением

$$y^{(n)} + d_{n-1}y^{(n-1)} + \cdots + d_1\dot{y} + d_0 y = k_\gamma u^{(\gamma)} + \cdots + k_0 u + f(t), \quad t \geq t_0 \quad (34)$$

в котором $y(t)$ – измеряемый выход, $u(t)$ – управляемый вход, $f(t)$ – неизвестное, но ограниченное возмущение, $y^{(i)}$, $u^{(j)}$ $\left(i = \overline{1,n},\ \ j = \overline{1,\gamma}\right)$ – производные этих функций. Коэффициенты d_i, k_j $\left(i = \overline{0,n-1},\ \ j = \overline{0,\gamma}\right)$ – неизвестные числа, n – известно, $\gamma < n$; начальные условия $y^{(i)}(t_0)$ и возмущение $f(t)$ удовлетворяют неравенствам

$$|y^{(i)}(t_0)| \leq \varepsilon_0, \quad i = \overline{0,n-1} \quad (35)$$

$$|f(t)| \leq f^*, \quad (36)$$

где ε_0 и f^* – некоторые положительные числа.

Управляемый вход

$$u(t) = e^{\lambda(t-t_0)} \sum_{k=1}^{n} \rho_k \sin \omega_k (t - t_0), \quad (37)$$

где ρ_k, λ, ω_k $\left(k = \overline{1,n}\right)$ – заданные положительные числа, $\omega_i \neq \omega_j$, $i \neq j$ $\left(i,j = \overline{1,n}\right)$, ρ_k – амплитуды испытательного сигнала, ω_k $\left(k = \overline{1,n}\right)$ – испытательные частоты.

Задача идентификации состоит в определении оценок $\hat{d}_i$, $\hat{k}_j$ $\left(i = \overline{0,n-1},\ \ j = \overline{0,\gamma}\right)$ коэффициентов объекта (34) таких, чтобы для ошибок идентификации

$$\triangle d_i = d_i - \hat{d}_i, \quad \triangle k_j = k_j - \hat{k}_j, \quad i = \overline{0,n-1} \quad j = \overline{0,\gamma} \quad (38)$$

выполнялись условия

$$|\triangle d_i| \leq \varepsilon_i^d, \quad |\triangle k_j| \leq \varepsilon_j^k, \quad i = \overline{0,n-1} \quad j = \overline{0,\gamma}, \quad (39)$$

в которых ε_i^d и ε_j^k $\left(i = \overline{0,n-1},\ \ j = \overline{0,\gamma}\right)$ – заданные числа.

6.1.2 Частотные параметры

Обозначим C_0 оценку степени неустойчивости объекта (34) s^*.

$$C_0 > s^* = \max\{\operatorname{Re} s_1, \ldots, \operatorname{Re} s_n\},$$

где s_i $\left(i = \overline{1,n}\right)$ – корни полинома $d(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \cdots + d_0$. Если объект (34) устойчив, то $C_0 = 0$. C_0 может быть получена экспериментально и поэтому эта величина далее считается известной.

Если выход объекта $y(t)$ умножить на $e^{-\lambda(t-t_0)}$ и приложить это произведение к входу фильтра Фурье, то его выходы дадут оценки частотных параметров

$$\hat{\alpha}_k(\delta) = \frac{2}{\rho_k \tau} \int\limits_{t_F}^{t_F+\tau} y(t) e^{-\lambda(t-t_0)} \sin \omega_k (t-t_0) dt = \alpha_k + e_k^{\alpha}(\delta), \quad k = \overline{1,n},$$

$$\hat{\beta}_k(\delta) = \frac{2}{\rho_k \tau} \int\limits_{t_F}^{t_F+\tau} y(t) e^{-\lambda(t-t_0)} \cos \omega_k (t-t_0) dt = \beta_k + e_k^{\beta}(\delta), \quad k = \overline{1,n}, \tag{40}$$

где t_F – момент начала фильтрации $(t_F \geq t_0)$, τ – время фильтрации $\tau_d = t_F - t_0$ – задержка начала фильтрации, $\delta = \tau_d + \tau$ – время идентификации, $\lambda > C_0$, $\varepsilon_k^{\alpha}(\delta)$ $\varepsilon_k^{\beta}(\delta)$ $\left(k = \overline{1,n}\right)$ – ошибки фильтрации, α_k и β_k $\left(k = \overline{1,n}\right)$ – *частотные параметры объекта* [6], связанные с его передаточной функцией $w(s) = k(s)/d(s)$ соотношениями

$$\alpha_k = \operatorname{Re} w(\lambda + j\omega_k), \quad \beta_k = \operatorname{Im} w(\lambda + j\omega_k), \quad k = \overline{1,n}. \tag{41}$$

При любых внешних возмущениях ошибки фильтрации являются исчезающими функциями

$$\lim_{\delta \to \infty} e_k^{\alpha}(\delta) = \lim_{\delta \to \infty} e_k^{\beta}(\delta) = 0.$$

Примечание 6.1. Числа τ и τ_d – кратны базовому периоду $T^* = \frac{2\pi}{w^*}$, где ω^* – базовая частота, такая, что $\omega_k = l_k \omega^*$, l_k $\left(k = \overline{1,n}\right)$ – положительные целые числа.

Примечание 6.2. Описанный в 6.1.2 способ определения частотных параметров называется *параллельной фильтрацией*. Наряду с испытательным воздействием (37) может использоваться *последовательная фильтрация*, когда ставится n экспериментов, в каждом из которых на объект подается только одно из слагаемых (37):

$$u_k(t) = e^{\lambda(t-t_0)} \rho_k \sin \omega_k (t-t_0) \quad k = \overline{1,n}, \tag{42}$$

где k – номер эксперимента, и определяется k-тая пара оценок частотных параметров $\hat{\alpha}_k$, $\hat{\beta}_k$ по формулам (40).

6.1.3 Алгоритм идентификации (директива 111.3)

Он основан на частотных уравнениях, которые имеют вид [8]

$$\hat{k}(\lambda + j\omega_k) - (\hat{\alpha}_k + j\hat{\beta}_k)\hat{d}(\lambda + j\omega_k) = (\hat{\alpha}_k + j\hat{\beta}_k)(\lambda + j\omega_k)^n, \quad k = \overline{1,n}. \tag{43}$$

Полиномы $\hat{k}(s) = \hat{k}_\gamma s^\gamma + \cdots + \hat{k}_0$, $\hat{d}(s) = \hat{d}_{n-1}s^{n-1} + \cdots + \hat{d}_1 s + \hat{d}_0$ (аргумент δ в обозначениях оценок частотных параметров и решениях $\hat{d}_i(\delta)$, $\hat{k}_j(\delta)$ $\left(i = \overline{0,n-1},\ \ j = \overline{0,\gamma}\right)$ опущен) называются моделью объекта.

Уравнения (43) при $\hat{\alpha}_k = \alpha_k$, $\hat{\beta}_k = \beta_k$ $\left(k = \overline{1,n}\right)$ следуют из тождества

$$d(s)\hat{k}(s) - k(s)\hat{d}(s) = k(s)s^n \tag{44}$$

если его разделить на полином $d(s)$ и положить $s = s_k = \lambda + j\omega_k$ $\left(k = \overline{1,n}\right)$. Это тождество имеет единственное решение

$$\hat{d}(s) = d(s) - s^n, \quad \hat{k}(s) = k(s). \tag{45}$$

Уравнения (43) при $\hat{\alpha}_k = \alpha_k$, $\hat{\beta}_k = \beta_k$ $\left(k = \overline{1,n}\right)$ имеют [8] при любых положительных λ и ω_i $\left(i = \overline{1,n}\right)$ единственное решение (45).

Далее предполагается, что время идентификации $\delta = \bar{\delta}$ задается априори. Правильность его задания может быть проверена с помощью необходимых условий сходимости процесса идентификации:

$$\begin{array}{c} |\hat{d}_i(\delta) - \hat{d}_i(\delta - T^*)| \le \varepsilon_i^d \quad i = \overline{0,n-1}, \\ |\hat{k}_j(\delta) - \hat{k}_j(\delta - T^*)| \le \varepsilon_j^k \quad j = \overline{0,\gamma}, \end{array} \tag{46}$$

$$\max\{\bar{s}_1, \ldots, \bar{s}_n\} < C_0, \tag{47}$$

где $\bar{s}_i$ $\left(i = \overline{1,n}\right)$, корни полинома $\hat{d}(s)$.

Алгоритм конечно–частотной идентификации: измерить выходы фильтра Фурье в моменты времени δ (кратные T^*) и $\delta + T^*$, решить частотные уравнения (43) для этих моментов и проверить условия (46), (47). Если эти условия нарушаются, то увеличить δ и т. д.. ■

6.1.4 Директива 113.1: Директива 111.3 с частично известными коэффициентами передаточной функции

Передаточная функция объекта имеет вид:

$$w(s) = \frac{k^0(s)k(s)}{d^0(s)d(s)} \tag{48}$$

где $k^0(s)$, $d^0(s)$ – известные полиномы, $k(s)$, $d(s)$ определяются в процессе идентификации.

6.1.5 Директива 111.1: Директивы 111.3 со стандартным приведением к форме вход-выход

Отличается от директивы 111.3 способом построения дискретной модели объекта для определения правильности выбранного интервала дискретности.

6.1.6 Директива 111.4: Директива 111.3 для использования в учебном процессе

Аналогична директиве 111.3, но часть результатов не выводится в протокол и на экран.

6.1.7 Директива 116.2: Определение частот испытательного воздействия

Для определения частот испытательного воздействия объект возбуждается ступенчатым сигналом.

$$u(t) = \bar{u} \cdot 1(t),$$

где $\bar{u}$ амплитуда. Определяется время переходного процесса T. Используя полученное значение T определяется $\omega_1 = \dfrac{3}{T}$. Остальные испытательные частоты $\omega_i \ \ (i = \overline{2,n})$ должны быть кратны ω_1: $\quad \omega_i = l_i\omega_1, \quad i = \overline{2,n}$, где $l_i \ \ (i = \overline{2,n})$ – целые положительные числа.

6.1.8 Директива 116.3: Определение амплитуд испытательного воздействия

Объект возбуждается внешним возмущением и испытательным воздействием

$$u(t) = e^{\lambda t} \sum_{i=1}^{n} \rho_i \sin \omega_i t$$

с определенными по директиве 116.2 частотами. Необходимо подобрать амплитуды испытательного воздействия такие, чтобы выход объекта при $u(t) = 0$ отличался от выхода объекта при $u(t) \neq 0$ не более чем в 1.5 раза.

6.1.9 Директива 117.1: Выбор интервала дискретности для частотной идентификации

Проверка правильности выбора допустимого интервала дискретности путём определения частотных параметров дискретной модели истинного объекта $\breve{\alpha}_k$ и $\breve{\beta}_k \ \ (k = \overline{1,n})$ и вычисления по ним оценок непрерывной

модели $\hat{d}_i$, $\hat{k}_j, (i = \overline{1,n}, j = \overline{1,\gamma})$. Если полученные оценки близки к коэффициентам истинного непрерывного объекта d_i и k_j, то интервал дискретности выбран правильно (см. примечание 6.3).

6.1.10 Идентификация дискретной модели непрерывного объекта при больших интервалах дискретности h (директива 121.2)

Дискретная модель объекта (34) имеет вид:

$$\begin{gathered} d_0^{\text{д}} y(k) + d_1^{\text{д}} y(k-1) + \cdots + d_n^{\text{д}} y(k-n) = \\ = k_1^{\text{д}} u(k-1) + \cdots + k_n^{\text{д}} u(k-n) + c_1^{\text{д}} f(k-1) + \cdots + c_n^{\text{д}} f(k-n) \end{gathered} \tag{49}$$

Соответствующая передаточная функция

$$w^{\text{д}}(z^{-1}) = \frac{k_1^{\text{д}} z^{-1} + \cdots + k_n^{\text{д}} z^{-n}}{d_0^{\text{д}} + d_1^{\text{д}} z^{-1} + \cdots + z^{-n}} = \frac{k^{\text{д}}(z^{-1})}{d^{\text{д}}(z^{-1})} \tag{50}$$

обладает при $z = e^{sh}$ хорошо известным свойством

$$\lim_{h \to 0} w^{\text{д}}(e^{-s_k h}) = w^{\text{д}}(s_k), \quad k = \overline{1,n}, \tag{51}$$

Если этот интервал не достаточно мал, то оценки частотных параметров дискретной модели (49)

$$\alpha_i^{\text{д}} = \operatorname{Re} w^{\text{д}}(q_i), \quad \beta_i^{\text{д}} = \operatorname{Im} w^{\text{д}}(q_i), \quad q_i = e^{-(\lambda + j\omega_i)h} \quad i = \overline{1,n} \tag{52}$$

определяются как выходы дискретного фильтра Фурье

$$\begin{aligned} \hat{\alpha_i^{\text{д}}}(\delta) &= \frac{2}{\rho_i N h} \sum_{k=\rho}^{N} y(kh) e^{-\lambda kh} \sin \omega_i(kh) = \alpha_i^{\text{д}} + e_i^{\alpha}(N), \quad i = \overline{1,n}, \\ \hat{\beta_i^{\text{д}}}(\delta) &= \frac{2}{\rho_i N h} \sum_{k=\rho}^{N} y(kh) e^{-\lambda kh} \cos \omega_i(kh) = \beta_i^{\text{д}} + e_i^{\alpha}(N), \quad i = \overline{1,n}, \end{aligned} \tag{53}$$

где N–число точек выходного сигнала, используемых для идентификации, ρ–время задержки, $\delta = \rho + h * N$–время идентификации , $\lambda > C_0$, $\varepsilon_i^{\alpha}(N)$ $\varepsilon_i^{\beta}(N)$ $\left(i = \overline{1,n}\right)$ – ошибки фильтрации объекта.

Теперь вместо частотных уравнений (43) решаются частотные уравнения

$$\hat{k}^{\text{д}}(q_k) - (\hat{\alpha}_k^{\text{д}} + j\hat{\beta}_k^{\text{д}}) \hat{d}^{\text{д}}(q_k) = (\hat{\alpha}_k^{\text{д}} + j\hat{\beta}_k^{\text{д}}) q_k^n, \quad k = \overline{1,n}, \tag{54}$$

где

$$\hat{k}^{\text{д}}(q) = \hat{k}_1^{\text{д}} q + \cdots + \hat{k}_n^{\text{д}} q^n, \quad i = \overline{1,n} \tag{55}$$

$$\hat{d}(q)^{\text{д}} = q^n + \hat{d}^{\text{д}}_{n-1}q^{n-1} + \cdots + \hat{d}^{\text{д}}_1 q \tag{56}$$

Примечание 6.3. Для определения, является ли для заданной модели (34) интервал h малым, используется следующая процедура (таблицы 1-3 директивы 111.3): а) уравнение (34) приводится к дискретной форме (49); б) вычисляются частотные параметры (52); в) решаются частотные уравнения (43), в которых частотные параметры (52) являются оценками частотных параметров объекта (34); г)полученные оценки коэффициентов объекта (34) сравниваются с истинными. Если требования к точности (39) выполняются (с некоторым запасом), то h мало, в противном случае h – велико.

6.1.11 Директива 121.1: Директива 121.2 со стандартным приведением к форме вход-выход

Отличается от директивы 121.2 способом построения дискретной модели объекта для определения правильности выбранного интервала дискретности.

6.1.12 Директива 121.3: Директива 121.2 для использования в учебном процессе

Аналогична директиве 121.2, но часть результатов не выводится в протокол и на экран.

6.1.13 Идентификация с ШИМ(директивы 131.1, 131.2, 131.3, 131.4, 131.5, 131.6)

Задача идентификации

Рассмотрим объект с исполнительным устройством, содержащим блок широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Пусть линейная часть исполнительного устройства имеет передаточную функцию:

$$w_{\text{исп}}(s) = \frac{k}{s} \tag{57}$$

Включим линейную часть исполнительного устройства в модель объекта. Такой "объект" описывается уравнением (при порядке истинного объекта управления $n = 2$):

$$(Ts + 1)(T_1 s + 1)sy = k(T_2 s + 1)E_1, \tag{58}$$

где E_1 – выход блока ШИМ:

$$E_1(t) = \begin{cases} asign E(t) & \text{, если} \quad (i-1)H \le t < (i-1)H + t_{ui} \\ 0 & \text{, если} \quad (i-1)H + t_{ui} \le t < iH. \end{cases} \tag{59}$$

где

$$t_{ui} = \frac{H}{E_{max}} \qquad , \qquad (i = 1, 2, ...) \tag{60}$$

$E_{max} = max|E(t)|$, $E[(i-1)H]$–значение входного сигнала в момент времени $t = (i-1)H$, H–заданный период ШИМ, a–заданная амплитуда импульсов.

График функции (59) приведён на рис. 1.

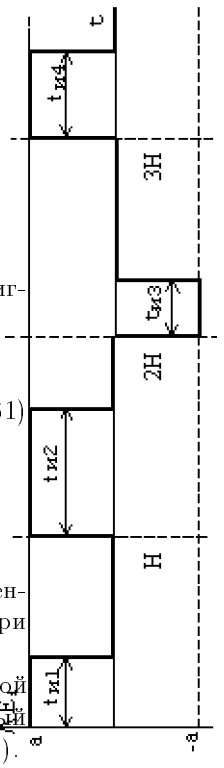

Рис. 1

На вход блока ШИМ при идентификации подается испытательный сигнал: $E(t) = \rho_1 \sin \omega_1 t + \rho_2 \sin \omega_2 t$.

Уравнение (58) запишем в виде:

$$\dddot{y} + d_2\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{E}_1 + k_0 E_1. \tag{61}$$

где $d_2 = \frac{T+T_1}{TT_1}$, $d_1 = \frac{1}{TT_1}$, $d_0 = 0$, $k_1 = \frac{kT_2}{TT_1}$, $k_0 = \frac{k}{TT_1}$.

Коэффициенты d_i, k_j, $i = 1, 2$, $k = 0, 1$ –неизвестные числа.

В остальном задача идентификации объекта с ШИМ полностью идентична задаче идентификации объекта без ШИМ, описанной в п. 6.1.1, при этом $\lambda = 0$.

Для нахождения оценок частотных параметров наряду с параллельной фильтрацией (директивы 131.1, 131.3, 131.5) используется более точный алгоритм последовательной фильтрации (директивы 131.2, 131.4, 131.6).

Алгоритм идентификации объекта с ШИМ

В директивах 131.1, 131.2, 131.3, 131.4 идентификация осуществляется с использованием алгоритма,описанному в п. 6.1.3 (директива 111.3).

В директивах 131.4, 131.5 при идентификации используется следующий алгоритм:

а) Определяются оценки частотных параметров объекта с исполнительным устройством (методом последовательной фильтрации);

b) Вычисляются оценки частотных параметров объекта:

$$\bar{\alpha}_i = -\omega_i \hat{\beta}_i, \qquad \bar{\beta}_i = \omega_i \hat{\alpha}_i, \qquad i = \overline{1,n}; \tag{62}$$

c) Решая частотные уравнения, находят оценки коэффициентов объекта без исполнительного устройства и затем идентифицированный объект дополняется исполнительным устройством.

Примечание: директивы 131.3, 131.4 являются сокращенными вариантами директив 131.1, 131.2 соответственно (в них не определяется интервал дискретности).

6.2 Метод наименьших квадратов (директива 211.3)

Рассмотрим полностью управляемый дискретный объект управления, описываемый уравнением

$$y(k)+\varphi_1 y(k-1)+\cdots+\varphi_n y(k-n) = r_1 u(k-1)+\cdots+r_n u(k-n)+f(k), \tag{63}$$

где $f(k)$ – внешнее воздействие, являющееся случайным процессом с независимыми значениями (случайным процессом типа «белый шум»), причем

$$M\{f(k)\} = 0; \quad M\{f^2(k)\} = \sigma_f^2, \tag{64}$$

(σ_f^2 – некоторое число), параметры φ_i, r_i $\left(i = \overline{1,n}\right)$ – неизвестные числа, оценки которых требуется найти в результате идентификации.

Вводя обозначения

$$\left.\begin{array}{rcl} \delta(k-1) & = & \| \, y(k-1), \cdots, y(k-n), u(k-1), \cdots, u(k-n) \, \|'; \\ \beta & = & \| \, -\varphi_1, \cdots - \varphi_n, r_1, \cdots, r_n \, \|', \end{array}\right\} \tag{65}$$

запишем (63) как

$$y(k) - \delta'(k-1)\beta = f(k).$$

Вектор неизвестных параметров β будем искать из условия минимума суммы квадратов невязок

$$L_N = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N}[y(k) - \delta'(k-1)\beta]^2.$$

В соответствии с методом наименьших квадратов построится последовательность, сходящаяся к искомому вектору β.

Такая последовательность определяется рекуррентными соотношениями [9], [10]:

$$\beta(k) = \beta(k-1) + P(k)\delta(k-1)[y(k) - \delta'(k-1)\beta(k-1)], \quad \beta(0) = \beta^{(0)}; \quad (66)$$

$$P(k) = P(k-1) - P(k-1)\delta(k-1)\delta'(k-1)P(k-1)c(k-1), \quad (67)$$

где

$$c(k-1) = (1 + \delta'(k-1)P(k-1)\delta(k-1))^{-1}, \quad (68)$$

6.2.1 Директива 211.1: Директива 211.3 со стандартным приведением к форме вход-выход

Отличается от директивы 211.3 способом построения дискретной модели объекта для определения правильности выбранного интервала дискретности.

6.3 Идентификационное частотное адаптивное управление (директива 311.2)

6.3.1 Постановка задачи

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый уравнением (34). Управление $u(t)$ формируется регулятором, описываемым следующим дифференциальным уравнением:

$$g_{n-1}^{[i]}u^{(n-1)} + \cdots + g_0^{[i]}u = r_{n-1}^{[i]}y^{(n-1)} + \cdots + r_0^{[i]}y + l_q\tilde{u}_{[i]}^{(q)} + \cdots + l_0\tilde{u}_{[i]}, \quad t_{i-1} \le t \le t_i \quad i = \overline{2,N} \quad (69)$$

с кусочно-постоянными коэффициентами $g_j^{[i]}$, $r_k^{[i]}$ $\left(j,k = \overline{0,n-1}, \quad i = \overline{0,N}\right)$, моменты времени t_i $\left(i = \overline{1,N}\right)$ – находятся в процессе адаптации,

$$\tilde{u}_{[i]}(t) = e^{\tilde{\lambda}(t-t_{i-1})}\sum_{k=1}^{2n-1}\tilde{\rho}_k \sin\tilde{\omega}_k(t - t_{i-1}), \quad t_{i-1} \le t \le t_i \quad i = \overline{1,N}, \quad (70)$$

$\tilde{u}_{[i]}(t)$ – испытательное воздействие, которое при $i = 1$ содержит n первых гармоник.

Отрезки времени $I_1 = [t_0, t_1)$, $I_2 = [t_1, t_2)$, ..., $I_N = [t_{N-1}, t_N)$ называются интервалами настройки регулятора. На первом интервале

$$u(t) = \tilde{u}_{[1]}(t) \quad (71)$$

В начале каждого интервала настройки должно выполняться условие

$$\sum_{k=0}^{n-1} y^{(i)^2}(t_q) \le \varepsilon_0^2, \ \left(q = \overline{1,N}\right) \quad (72)$$

где ε_0^2 – некоторое число. Это условие позволяет рассматривать систему (34), (69) как N независимых систем, описывающих процессы на каждом интервале.

При $t \geq t_N$ регулятор описывается уравнением

$$\begin{array}{l} g_{n-1}u^{(n-1)} + \cdots + g_0 u = r_{n-1}y^{(n-1)} + \cdots + r_0 y, \quad t \geq t_N, \\ g_i = g_i^{(N)}, \quad r_i = r_i^{(N)}. \end{array} \tag{73}$$

Задача. *Найти алгоритм адаптации (настройки) коэффициентов регулятора(69) такой, чтобы, начиная с некоторого момента t_N, характеристический полином системы (34), (73)*

$$\varphi(s) = d(s)g(s) - k(s)r(s)$$

и заданный гурвицев полином (полином корни которого лежат в левой полуплоскости)

$$\psi(s) = \psi_{2n-1}s^{2n-1} + \cdots + \psi_1 s + \psi_0 \tag{74}$$

были близки так, что

$$\frac{|\varphi_i - \psi_i|}{|\psi_i|} \leq \varepsilon_i^{\psi} \quad i = \overline{0, 2n-1}, \tag{75}$$

где ε_i^{ψ} – заданные положительные числа.

6.3.2 Алгоритм адаптации

На первом этапе идентифицируется объект – определяются оценки $\hat{d}_i$, $\hat{k}_j$ $\left(i = \overline{0, n-1},\ \ j = \overline{0, \gamma}\right)$ в соответствии с алгоритмом п. 6.1.3.

Далее формируются полиномы $\hat{d}(s) = s^n + \hat{d}_{n-1}s^{n-1} + \ldots + \hat{d}_0$, $\hat{k}(s) = \hat{k}_\gamma s^\gamma + \hat{k}_{\gamma-1}s^{\gamma-1} + \ldots + \hat{k}_0$ и путем решения тождества Безу:

$$\hat{d}(s)\hat{g}(s) - \hat{k}(s)\hat{r}(s) = \psi(s) \tag{76}$$

определяются коэфициенты $g_i^{[2]} = \hat{g}_i$, $r_i^{[2]} = \hat{r}_i$ $\left(i = \overline{0, n-1}\right)$ регулятора

$$(g_{n-1}^{[2]}s^n + \cdots + g_0^{[2]})u = (r_{n-1}^{[2]}s^n + \cdots + r_0^{[2]})y + l(s)\tilde{u}_{[2]} \tag{77}$$

Перепишем систему (34) , (77) в виде

$$\varphi^{[2]}(s)u = d(s)l(s)\tilde{u}_{[2]} + r^{[2]}(s)f, \tag{78}$$

где

$$\varphi^{[2]}(s) = d(s)g^{[2]}(s) - k(s)r^{[2]}(s) \tag{79}$$

Передаточная функция «объекта» (78)

$$w_u(s) = \frac{l(s)d(s)}{\varphi^{[2]}(s)} \tag{80}$$

Определение. *Набор* $2n$ *чисел*

$$\theta_k = \operatorname{Re} w_u(\tilde{s}_k), \quad \gamma_k = \operatorname{Im} w_{ul}(\tilde{s}_k),, \quad k = \overline{1, 2n-1} \tag{81}$$

называется частотными параметрами выхода обратной связи в системе (34),(77). ■

Оценки этих частотных параметров находятся как выходы фильтра Фурье

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_k(\tilde{\delta}) &= \frac{2}{\tilde{\rho}\tilde{\tau}} \int\limits_{\tilde{t}_F}^{\tilde{t}_F+\tilde{\tau}} u(t) e^{-\tilde{\lambda}(t-\tilde{t}_0)} \sin\tilde{\omega}_k(t-\tilde{t}_0)dt = \theta_k + e_k^{\theta}(\tilde{\delta}), \quad k = \overline{1, n}, \\
\hat{\gamma}_k(\tilde{\delta}) &= \frac{2}{\tilde{\rho}\tilde{\tau}} \int\limits_{\tilde{t}_F}^{\tilde{t}_F+\tilde{\tau}} u(t) e^{-\tilde{\lambda}(t-\tilde{t}_0)} \cos\tilde{\omega}_k(t-\tilde{t}_0)dt = \gamma_k + e_k^{\gamma}(\tilde{\delta}), \quad k = \overline{1, n},
\end{aligned} \tag{82}$$

где $\tilde{t}_F$ $(\tilde{t}_F > \tilde{t}_0)$ – время начала фильтрации, $\tilde{\delta} = \tilde{t}_F - \tilde{t}_0 + \tilde{\tau}$ – интервал фильтрации, $\varepsilon_k^{\theta}(\tilde{\delta})$, $\varepsilon_k^{\gamma}(\tilde{\delta})$ $\left(k = \overline{1, n}\right)$ – ошибки фильтрации, исчезающие при $\tilde{\delta} \to \infty$.

Применяя алгоритм п. 6.1.3 для объекта (78), определяются оценки $\varphi_i^{[2]}$,$k_j^{[2]}(s)$, $\left(i = \overline{0, 2n-1}, \;\; j = \overline{0, \gamma}\right)$ как решение частотных уравнений (43), в которых n заменено $2n-1$ и $\hat{d}(s)$ на $\hat{\varphi}^{[2]}(s)$.

Если найденное $\hat{\varphi}^{[2]}(s)$ удовлетворяет условию (75), то регулятор (77) при $\tilde{u} = 0$ является искомым.

Если условие (75) нарушается, то вычисляются оценки частотных параметров объекта $\hat{\alpha}_k$ и $\hat{\beta}_k$, $\left(k = \overline{1, n}\right)$, которые связаны с частотными параметрами выхода обратной связи соотношениями

$$\hat{\alpha}_k + j\hat{\beta}_k = \frac{(\theta_k + j\gamma_k) - w_l(\tilde{s}_k)}{w_c(\tilde{s}_k)(\theta_k + j\gamma_k)} \quad k = \overline{1, n} \tag{83}$$

где

$$w_c^{[2]}(s) = r^{[2]}(s)/g^{[2]}(s), w_l^{[2]}(s) = l/g^{[2]}(s)$$

Решаются частотные уравнения (43) и определяются оценки $\hat{d}_i^{[3]}(s)$, $\hat{k}_j^{[3]}(s)$, $\left(i = \overline{0, n-1}, \;\; j = \overline{0, \gamma}\right)$. Если они удовлетворяют условиям (46), (47), то путем решения тождества Безу находятся коэффициенты регулятора

$$g^{[3]}(s)u = r^{[3]}(s)y + l\tilde{u}_{[3]} \tag{84}$$

и т.д.

Для учета дискретности измерений и управления дифференциальные уравнения (69) заменяются разностными уравнениями вида (49).

Примечание 6.4 Наряду с фильтрацией по $u(t)$ в директивах АДАПЛАБ используется фильтрация по $y(t)$, когда на вход фильтра Фурье подается выход объекта. Перепишем систему (34)(77) в виде

$$\varphi^{[2]}(s)y = k(s)l\tilde{u}_{[2]} + g(s)^{[2]}f \tag{85}$$

Передаточная функция "объекта" (85)

$$w_{cl}(s) = k(s)/\varphi^{[2]}(s) \tag{86}$$

Оценки частотных параметров выхода обратной связи в системе (34),(77) $\hat{\nu}_k = \mathrm{Re}\, w_{cl}(\tilde{s}_k)$, $\hat{\mu}_k = \mathrm{Im}\, w_{cl}(\tilde{s}_k)$ определяются по формулам (82), где $\hat{\theta}_k$ заменено на $\hat{\nu}_k$, $\hat{\gamma}_k$ на $\hat{\mu}_k$, $u(t)$ на $y(t)$. Оценки частотных параметров объекта $\hat{\alpha}_k$ и $\hat{\beta}_k$, $\left(k = \overline{1,n}\right)$, в случае фильтрации по $y(t)$, вычисляются как

$$\hat{\alpha}_k + j\hat{\beta}_k = \frac{\hat{\nu}_k + j\hat{\mu}_k}{(\hat{\nu}_k + j\hat{\mu}_k)w_c^{[2]}(j\tilde{\omega}_k) + w_l^{[2]}(j\tilde{\omega}_k)}, \quad k = \overline{1,n} \tag{87}$$

где $w_c^{[2]}(s) = r^{[2]}(s)/g^{[2]}(s), w_l^{[2]}(s) = 1/g^{[2]}(s)$

6.3.2 Директива 311.1: Директива 311.2 со стандартным приведением к форме вход-выход

Отличается от директивы 311.2 способом построения дискретной модели объекта для определения правильности выбранного интервала дискретности.

6.3.3 Директива 311.3: Директива 311.2 с фильтрацией по $y(t)$

Реализована в соответствии с алгоритмом п. 6.3.2, но на 2-м интервале адаптации на вход фильтра Фурье подается выход объекта $y(t)$, а не выход регулятора (см. примечание 6.4)

6.3.4 Директива 312.1: Выбор интервала дискретности для директивы 311.2

Определяет, является ли выбранный интервал дискретности достаточно малым для объекта и замкнутой системы. Реализована в соответствии с процедурой, изложенной в примечании 6.3.

6.3.5 Идентификационное частотное адаптивное управление при больших интервалах дискретности (директива 321.1)

Объект (34) заменяется его дискретной моделью (49) Управление $u(t) = u(kT)$ формируется регулятором, описываемым следующим разностным уравнением:

$$\begin{gathered} \bar{g}_0^{[i]} u(k) + \bar{g}_1^{[i]} u(k-1) + \cdots + g_n^{[i]} u(k-n) = \\ \bar{r}_1^{[i]} y^{(k-1)} + \cdots + \bar{r}_n^{[i]} y + (k-n) + l_1 \tilde{u}_{[i]}^{(k-1)} + \cdots + l_q \tilde{u}_{[i]}(k-q) \end{gathered} \tag{88}$$

$t_{i-1} \le t \le t_i \quad i = \overline{2, M}$

с кусочно-постоянными коэффициентами $\bar{g}_j^{[i]}$, $\bar{r}_k^{[i]}$ $\left(j=\overline{0,n},\ k=\overline{1,n},\ i=\overline{0,N}\right)$, моменты времени t_i $\left(i = \overline{1, M}\right)$, кратные h – находятся в процессе адаптации,

$$\tilde{u}_{[i]}(t) = \tilde{u}_{[i]}(kh) e^{\tilde{\lambda}(kh)} \sum_{j=1}^{2n-1} \tilde{\rho}_j \sin \tilde{\omega}_j (kh), \quad kh \le t \le (k+1)h \quad i = \overline{1, M}, \tag{89}$$

$\tilde{u}_{[i]}(t)$ – испытательное воздействие, которое при $i = 1$ содержит n первых гармоник.

Алгоритм адаптации аналогичен непрерывному случаю (см. п. 6.3.2) Идентификация дискретной модели осуществляется в соответствии с алгоритмом п. 6.1.4

6.3.6 Директива 321.2: Объединение директив 321.1 и 322.1

Аналогична директиве 321.1 . Добавлено моделирование объекта, замкнутого идеальным регулятором.

6.3.7 Директива 322.1: Выбор интервалов задержки и фильтрации

Упрощенный вариант директивы 321.1. Внешнее возмущение положено равным $f(t) = 1(t)$, чтобы определить количество интервалов задержки фильтрации, необходимых для построения требуемого регулятора.

6.4 Адаптивное управление на основе МНК (директива 411.1)

Пусть имеем объект (63) и требуется найти регулятор

$$\varphi_{p0} u(k) + \varphi_{p1} u(k-1) + \cdots + \varphi_{pn} u(k-n_p) = r_{p0} y(k) + \cdots + r_{p\mu_p} y(k-\mu_p), \tag{90}$$

где φ_{pi}, r_{pi} $\left(i=\overline{0,n_p},\ \ j=\overline{0,\mu_p}\right)$ – искомые числа, при котором достигается цель управления, задаваемая критерием

$$\lim_{k\to\infty} M\{y^2(k)\} < \infty, \tag{91}$$

Потребуем дополнительно, чтобы корни характеристического полинома замкнутой системы имели наперед заданные значения.

Преобразуя (63), (90) по Лапласу при нулевых начальных условиях, запишем уравнения объекта и регулятора в виде

$$\varphi(z^{-1})y = r(z^{-1})u + f; \tag{92}$$

$$\varphi_p(z^{-1})u = r_p(z^{-1})y + r_{p0}y, \tag{93}$$

где z – комплексное число;

$$\varphi(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n}\varphi_i z^{-i}; \quad r(z^{-1}) = \sum_{i=1}^{\mu} r_i z^{-i} \tag{94}$$

$$\varphi_p(z^{-1}) = \varphi_{p0} + \sum_{i=1}^{n}\varphi_{pi} z^{-i}; \quad r_p(z^{-1}) = \sum_{i=1}^{\mu_p} r_{pi} z^{-i} \tag{95}$$

Для удобства далее будем использовать обозначения $\lambda = z^{-1}$. Характеристический полином системы (92),(93) имеет вид

$$\begin{gathered} D(\lambda) = \varphi(\lambda)\varphi_p(\lambda) - r(\lambda)r_p(\lambda) = \\ = \left(1+\sum_{i=1}^{n}\varphi_i\lambda^i\right)\left(\sum_{i=0}^{n}\varphi_{pi}\lambda^i\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} r_i\lambda^i\right)\left(\sum_{i=0}^{n} r_{pi}\lambda^i\right). \end{gathered} \tag{96}$$

Желаемый полином замкнутой системы

$$D^*(\lambda) = \left(\prod_{i=1}^{2n}\lambda_i^*\right)\prod_{i=1}^{2n}(\lambda_i - \lambda_i^*) = d_{2n}^*\lambda^{2n} + \cdots + d_1^*\lambda + 1, \tag{97}$$

где $\lambda_i^* \quad \left(i=\overline{1,2n}\right)$ – заданные числа, $|\lambda_i| \geq 1 \ \left(i=\overline{1,2n}\right)$.

Для реализации алгоритма регулирования (90) потребуем, чтобы

$$r_{p0} = 0. \tag{98}$$

Кроме того, пусть

$$\varphi_{p0} = 1. \tag{99}$$

Для определения остальных параметров регулятора (90) запишем на основе (96) и (97). Тогда

$$\left(1+\sum_{i=1}^{n}\varphi_i\lambda^i\right)\left(1+\sum_{i=1}^{n}\varphi_{pi}\lambda^i\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} r_i\lambda^i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} r_{pi}\lambda^i\right) - \sum_{i=1}^{2n} d_i^*\lambda^i - 1 = 0 \tag{100}$$

Приравнивая нулю коэффициенты при одинаковых степенях λ, получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных φ_{pi}, r_{pi} $\left(i = \overline{1,n}\right)$. Эта система имеет вид

$$N(\beta)\gamma = d^*, \tag{101}$$

$$\gamma = \| \varphi_{p1}, \cdots, \varphi_{pn}, r_{p1}, \cdots, r_{pn} \|', \quad d = \| d^*_{2n}, d^*_{2n-1}, \cdots, d^*_1 \|',$$

где $N(\beta)$ – матрица чисел размером $2n \times 2n$, элементами которой являются параметры объекта, представленные как компоненты вектора $\beta = \| -\varphi_1, \cdots, -\varphi_n;\ r_1, \cdots, r_n \|$.

Адаптивный регулятор, обеспечивающий достижение цели управления (91), описывается уравнением

$$u(k)+\varphi_{p1}(k)u(k-1)+\cdots+\varphi_{pn}(k)u(k-n_p) = r_{p1}(k)y(k-1)+\cdots+r_{pn}(k)y(k-n), \tag{102}$$

$$k = n, n+1, \ldots$$

параметры которого являются решением линейного алгебраического уравнения

$$N(\beta(k))\gamma(k) = d^*, \quad k = n, n+1, ldots, \tag{103}$$

где $\beta(k)$ – вектор оценок параметров объекта (66), получаемых на основе рекуррентных соотношений (66)-(68).

В этих соотношениях вектор $\delta(k)$, определяемый (65), доступен непосредственному измерению. При достаточно больших значениях k корни характеристического полинома системы (63), (102) будут близки к заданным числам λ^*_i $\left(i = \overline{1,2n}\right)$.

6.5 Адаптивное управление с эталонной моделью (директива 511.1)

Рассматривается полностью управляемый и полностью наблюдаемый объект, описываемый уравнением

$$a^p(s)y = b^p(s)u + c^p(s)f, \tag{104}$$

где $a^p(s) = a^p_0 + \cdots + a^p_{n-1}s^{n-1} + s^n$; $b^p(s) = b^p_0 + \cdots + b^p_{n-2}s^{n-2} + s^{n-1}$, $b^p(s)$ – гурвицев полином; $c^p(s) = c^p_0 + \cdots + c^p_{np}s^{np}$, $np < n$; $y(t)$ – выходной сигнал объекта; $u(t)$ – управление.

Коэффициенты полиномов $a^p(s)$ и $b^p(s)$ неизвестны. Степени же их предполагаются известными.

Эталонная модель, описывается уравнением

$$a^m(s)y^m = b^m(s)g, \tag{105}$$

где $a^m(s) = a_0^m + \cdots + a_{n-1}^m s^{n-1} + s^n$, $b^m(s) = b_0^m + \cdots + b_{n-2}^m s^{n-2} + s^{n-1}$, $a^m(s)$ и $b^m(s)$ – гурвицевы полиномы; $y^m(t)$ – выходной сигнал модели; $g(t)$ – задающее воздействие.

Передаточная функция $W^m(s) = k^m \cdot \dfrac{b^m(s)}{a^m(s)}$ эталонной модели (105) является строго пассивной, т.е.

$$\mathrm{Re}[W(j\omega)] > 0 \quad \text{и} \quad W\,\mathrm{Re}[W(j\omega)] > 0.$$

Требуется найти адаптивный регулятор, такой, что выполнится целевое условие:

$$\lim_{t\to\infty} |y(t) - y^m(t)| = 0. \tag{106}$$

Адаптивный регулятор описывается уравнением $u(t) = \mathbf{b}'(t)\mathbf{v}(t)$, где

$$\mathbf{b}(t) = [b_0(t), \mathbf{b}^{(1)}(t), b_n(t), \mathbf{b}^{(2)}(t)]', \quad \mathbf{v}(t) = [y(t), \mathbf{v}^{(1)}(t), g(t), \mathbf{v}^{(2)}(t)], \quad \text{или}$$

$$u(t) = b_0(t)y(t) + \mathbf{b}'^{(1)}(t)\mathbf{v}^{(1)}(t) + b_n(t)g(t) + \mathbf{b}'^{(2)}(t)\mathbf{v}^{(2)}(t). \tag{107}$$

Вектора $v^{(1)}$ и $v^{(2)}$ являются решением системы уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}^{(1)}(t) &= F\mathbf{v}^{(1)}(t) + \mathbf{c}y(t), \\ \dot{\mathbf{v}}^{(2)}(t) &= F\mathbf{v}^{(2)}(t) + \mathbf{c}u(t), \end{aligned} \tag{108}$$

где матрица $F = \left[\begin{array}{c|c} 0 & E_{n-2} \\ \hline -\mathbf{p} & \end{array}\right]$, вектора $\mathbf{c}' = [0, \ldots, 0, 1]$ и $\mathbf{p} = [b_1^m, b_2^m, \ldots, b_{n-2}^m]$.

Алгоритм настройки параметров $b(t)$ управления, при котором достигается цель управления (106) имеет вид

$$\dot{b}(t) = -\Gamma^{-1}\mathbf{v}(t)(y(t) - y^m(t)) \tag{109}$$

где Γ – произвольная положительно определенная матрица чисел размеров $2n \times 2n$.

6.6 Частотное адаптивное управление с ПИД-регуляторами

6.6.1 Частотное адаптивное управление с ПИД-регуляторами (директива 314.2)

Рассмотрим объект управления, описываемый уравнением (при $n = 2$):

$$(Ts + 1)(T_1 s + 1)y = k(T_2 s + 1)u, \tag{110}$$

где

T, T_1, T_2, k – неизвестные постоянные времени и коэффициент передачи.

Это уравнение можно переписать в виде:

$$\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{u} + k_0 u, \tag{111}$$

где $d_1 = \frac{T+T_1}{TT_1}$, $d_0 = \frac{1}{TT_1}$, $k_1 = \frac{kT_2}{TT_1}$, $k_0 = \frac{k}{TT_1}$.

ПИД-регулятор, синтезируемый в директиве, описывается следующим уравнением:

$$T_{1p}\dot{u} + u = k_p \left[\varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt + T_g \dot{\varepsilon} \right], \tag{112}$$

в котором T_{1p} – достаточно малое число, $\varepsilon = y - g$, где g – ступенчатое задающее воздействие $(g(t) = \bar{g} \cdot 1(t)$, $\bar{g}$ – заданное число$)$.

Учитывая испытательный сигнал, это уравнение можно записать как

$$g_2\ddot{u} + g_1\dot{u} = r_2\ddot{\varepsilon} + r_1\dot{\varepsilon} + r_0\varepsilon + lv, \tag{113}$$

где $g_2 = T_{1p}T_u$, $g_1 = T_u$, $r_1 = k_pT_u$, $r_0 = k_p$.

Алгоритм частотного адаптивного управления для системы (111)–(113), реализованный в директиве, отличается от алгоритма, описанного в п. 6.3, только особенностями идентификации объекта (они были описанны в п. 6.1.5) и видом синтезируемого регулятора. На этапе идентификации системы "объект – регулятор" используется метод определения частотных параметров по выходу регулятора.

6.6.2 Директива 314.1: Директива 314.2 без задающего воздействия

Совпвдает с директивой 314.2, но отсутствует задающее воздействия.

6.6.3 Директива 314.3: Директива 314.2 с фильтрацией по $y(t)$

Аналогична директиве 314.2. Отличие: состоит в фильтрации по $y(t)$.

6.6.4 Директива 116.4: Моделирование объекта с дискретным ПИД–регулятором

Директива 116.4 предназначена для моделирования системы "объект – ПИД-регулятор", описываемой уравнениями (111) , (112).

Кроме того, эти директивы формируют дискретную модель объекта (110), которая описывается разностным уравнением в форме Коши:

$$x_0(k+1) = A_0x_0(k) + b_0u(k),\ y(k) = c_0x_0(k) + d_0u(k)\ (k = 1, ...) \tag{114}$$

где $x_0(k)$ – вектор размерности $n_д = 2$, A_0 – матрица 2×2, b_0 и c_0 – вектора, а d_0 – число.

В директиве 116.4 предусмотренно, наряду с решением системы уравнений (111),(112), их решение, когда уравнения регулятора описываются разностными уравнениями. При этом моделирование производится как с приближенным, так и с точным дискретным регулятором.

Приближенная дискретная модель ПИД-регулятора строится путем замены оператора s в уравнении регулятора:

$$(T_u T_p s^2 + T_u s)u = (k_p T_u T_g s^2 + k_p T_u s + k_p)\varepsilon \qquad (115)$$

выражением $s = (z-1)/h$, где z – оператор сдвига вперед ($zu(k) = u(k+1)$), h-интервал дискретности.

Точная дискретная модель регулятора строится путем приведения этого уравнения к форме Коши $\dot{x}_1 = r_0\varepsilon$, $\dot{x}_2 = (1 - g_2/g_2)x_2 + (r_2/g_2 - r_1)\varepsilon$, $u = 1/g_2 x_2 + r_2/g_2\varepsilon$, построения дискретной модели уравнений в форме Коши и приведения построенных уравнений к форме "вход-выход".

6.6.5 Директива 315.2: Неадаптивное модальное управление с ПИ, ПИД и ПДД регуляторами

Директива 315.2 осуществляет решение тождества Безу, вычисление коэффициентов ПИД–регулятора, а также моделирование процессов при этих коэффициентах.

Коэффициенты регуляторов определяются по известным параметрам объектов управления путем решения модального тождества Безу

$$(s^2 + d_1 s + d_0)s(g_3 s^2 + g_2 s + g_1) - (k_1 s + k_0)(r_2 s^2 + r_1 s + r_0) = \psi(s) \quad (116)$$

в котором желаемый (модальный) полином замкнутой системы

$$\psi(s) = \prod_{i=1}^{4}(q_i s + 1),$$

где q_i, $(i = \overline{1,4})$ – заданные числа.

Результатом решения этого тождества является коэффициенты ПИД–регулятора (113).

$$T_{1p} = g_2/g_1 \ , \ k_p = r_1/g_1 \ , \ T_u = r_1/r_0 \ , \ T_g = r_2/r_1 \qquad (117)$$

6.6.6 Директива 316.1: Идентификация и модальное управление по экспериментальным данным

Эта директива предназначена для имитации полунатурных испытаний объекта и реализует алгоритмы идентификации и модального управления

по экспериментальным данным(в число исходных данных для директивы входит файл с результатами моделирования реального объекта).

6.7 Частотное адаптивное управление с ПДД-регуляторами для объекта с ШИМ

6.7.1 Частотное адаптивное управление с ПДД-регуляторами (директива 331.2)

Аналогична директиве 314.3. Отличие состоит в том, что объект управления имеет вид (58) или (61), идентификация объекта имеет особенности, описанные в п. 6.1.13, при идентификации объекта используется алгоритм п. 6.1.13.

6.7.2 Директива 116.5: Моделирование объекта с дискретным ПДД–регулятором и ШИМ

Директива 116.5 аналогична директиве 116.4 и предназначена для моделирования системы "объект – ПДД-регулятор", содержащих блок ШИМ.

В этой директиве в качестве уравнений системы используются уравнения (61) управляемого процесса с исполнительным устройством и уравнение ПДД–регулятора:

$$(T_{2p}T_u s^2 + T_{1p}T_u s + T_u)E = K_p(T_u T_g s^2 + T_u s + 1)\varepsilon \qquad (118)$$

В директиве строится приближенная и точная модели дискретного ПДД–регулятора.

6.7.3 Директива 333.1: Неадаптивное модальное управление с ШИМ по экспериментальным данным

Эта директива идентична директиве 316.1 и предназначена для имитации полунатурных испытаний объекта(включая исполнительный механизм и блок ШИМ) с ПД– либо ПДД–регулятором.

Она также реализует алгоритмы идентификации и модального управления по экспериментальным данным(в число исходных данных для директивы входит файл с результатами моделирования реального объекта).

Здесь особенность идентификатора состоит в том, что идентифицируется объект без исполнительного устройства, т.е. реализуется алгоритм 6.1.13.

6.7.4 Директива 332.1: Неадаптивное модальное управление с ШИМ

Директива 332.1 предназначена для проверки результатов работы директивы 333.1 и реализует алгоритмы идентификации и модального управле-

ния по результатам моделирования действительной модели.

7 Литература

1. *«Автоматизированное проектирование систем управления» (под ред. М.Джамшиди, Ч.Дж.Херчета). Машиностроение*, **1989**.
2. Grubel G., H.D.Joors, M.Otter and R.Finstewalder. *«The ANDECS Design Environment for Control Engineering». Preprints of 12th World Congress IFAC*, vol. **6**, Sidney, **1993**.
3. Szafnicki K., Gentil S. *«Toward a Knowledge-Based Training Tool for Identification with Bench-mark». 10th IFAC Simposium on System Identification, Preprints*, vol. **2**, **1994**.
4. Эйкхофф П. *«Основы идентификации систем управления». М. Мир*, **1975**.
5. Красовский А.А. *«Динамика непрерывных самонастраивающихся систем». М. Наука*, **1963**.
6. Александров А.Г. *«Метод частотных параметров». Автоматика и телемеханика*, N **12**, **1989**.
7. Александров А.Г. *«Частотное адаптивное управление, I,II». Автоматика и телемеханика*, N **12**, **1994**, N **1**, **1995**.
8. Александров А.Г. *«Идентификационное частотное адаптивное управление». Известия РАН «Теория и системы управления»*, N **2**, **1995**.
9. Александров А.Г. *«Оптимальные и адаптивные системы». М. Высшая школа*, **1989**.
10. Astrom K.J. and B.Wittenmark *«Adaptive control». Addison-Wesley*, **1989**.
11. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. *«Адаптивное управление динамическими объектами». М. Наука*, **1981**.
12. Graebe S.F. *«Robust and Adaptive Control of Unknown Plant: A Benchmark of New Format». 12th World Congress IFAC. Preprints of papers*, vol. **3**, **1993**.
13. Narendra K.S. *«Robust Adaptive Control in the Presence Bounded Disturbances». IEEE, Trans. on Automat. Control*, N **4**, **1986**.
14. Острём К., Виттенмарк Б. *«Система управления с ЭВМ». М. Мир*, **1987**.