

УДК 517.925.54:517.962.27/.8

АДАРЛАВ-М: ДИРЕКТИВА ДЛЯ ЧАСТОТНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ С САМОНАСТРОЙКОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

А.Г. Александров

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: alex7@ipu.rssi.ru

Ю.Ф. Орлов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119992, Москва, Ленинские горы

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

Key word: software, identification, adaptive control, frequency domain approach

В работе описывается директива для адаптивного управления объектом при произвольных ограниченных внешних возмущениях с самонастройкой испытательного сигнала. Реализована она в системе MATLAB. Приведен пример работы с директивой.

ADARLAB-M: DIRECTIVE FOR ADAPTIVE CONTROL WITH TEST SIGNAL SELFTUNING / A.G. Alexandrov (Institute of Control Sciences, 65, Profsoyuznaya, Moscow, 117997, Russia, E-mail: alex7@ipu.rssi.ru), Yu.F. Orlov (Moscow State University, Leninskiye gory, Moscow, 119992, Russia). In the paper new directive for adaptive control of plant excited by a external disturbance with test signal selftuning is described. This is a system MATLAB realization. An example of the directive application is given.

1. Введение

В последние десятилетия развивается несколько методов адаптивного управления при неизвестных ограниченных возмущениях и помехах: метод рекуррентных целевых неравенств [1], метод наименьших квадратов с зоной нечувствительности [2], частотное адаптивное управление [3], рандомизированные алгоритмы [4].

При частотном адаптивном управлении используется достаточно малый испытательный сигнал, являющийся суммой гармоник, число которых не превышает совокупную размерность пространства состояний объекта и регулятора. Одной из целей самонастройки амплитуд и частот гармоник испытательного сигнала является обеспечение его малости, так, чтобы вклад этого сигнала во вход и выход объекта был ограничен заданными величинами.

Программное обеспечение частотного адаптивного управления при заданных априори амплитудах и частотах испытательного сигнала составляет ряд директив пакета программ АДАПЛАБ [5] и АДАПЛАБ-М [6]. Последний пакет является MATLAB-приложением. Наряду с директивой D317: «Частотное адаптивное управление» он содержит также директиву M011: «Самонастройка испытательного сигнала» [7].

Настоящая работа посвящена директиве D317sefad: «Частотное адаптивное управление с самонастройкой испытательного сигнала». В ней объединяются указанные выше директивы для одномерных объектов (объектов с одним измеряемым входом и одним измеряемым выходом). Работа является продолжением статьи [8], содержащей описание директивы D111sefad: «Идентификация с самонастройкой испытательного сигнала», которая почти полностью включена в описываемую ниже директиву.

2. Область применения

Рассмотрим асимптотически устойчивый объект управления, описываемый дифференциальным уравнением

$$(1) \quad y^{(n)} + d_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + d_1\dot{y} + d_0y = k_\gamma u^{(\gamma)} + \dots + k_1\dot{u} + k_0u + f, \quad t \geq t_0,$$

где $y(t)$ – измеряемый выход, $u(t)$ – измеряемый вход (выход регулятора), $f(t)$ – неизвестное ограниченное возмущение: $|f(t)| \leq f^*$, где f^* – число. Коэффициенты d_i и k_j ($i = \overline{0, n-1}$, $j = \overline{0, \gamma}$) – неизвестные числа, n и $\gamma < n$ известны.

Возмущение является полигармонической функцией

$$f(t) = \sum_{i=1}^{\infty} f_i \sin(\omega_i^f t + \phi_i^f),$$

где ω_i^f и ϕ_i^f ($i = 1, 2, \dots$) неизвестные частоты и фазы, а амплитуды f_i ($i = 1, 2, \dots$) – неизвестные ограниченные числа, удовлетворяющие неравенству

$$\sum_{i=1}^{\infty} |f_i| \leq f^*,$$

где f^* – известное число.

Ищется регулятор

$$(2) \quad g_{n-1}u^{(n-1)} + \dots + g_1\dot{u} + g_0u = r_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + r_1\dot{y} + r_0y, \quad t \geq t_N > t_0,$$

такой, чтобы выход объекта, начиная с некоторого момента $t^* \geq t_N$ удовлетворял требованию к точности регулирования

$$(3) \quad |y(t)| \leq y^*,$$

где y^* – заданное число.

Чтобы найти такой регулятор, формируется следующий регулятор с кусочно-постоянными коэффициентами

$$(4) \quad \begin{aligned} & g_{n-1}^{[i]} u^{(n-1)} + \dots + g_1^{[i]} \dot{u} + g_0^{[i]} u = \\ & = r_{n-1}^{[i]} (y^{(n-1)} + v_{[i]}^{(n-1)}) + \dots + r_1^{[i]} (\dot{y} + \dot{v}_{[i]}) + r_0^{[i]} (y + v_{[i]}), \\ & t_{i-1} \leq t \leq t_i \quad i = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где i – номер интервала адаптации ($i = \overline{1, N}$), $v_{[i]}(t)$ – испытательный сигнал:

$$v_{[i]}(t) = \rho_{[i]} \sin \omega_{[i]}(t - t_{i-1}) \quad i = \overline{1, N},$$

амплитуды которого определяются так, чтобы в процессе адаптации выполнялись ограничения

$$(5) \quad |y(t)| \leq y_-, \quad |u(t)| \leq u_-, \quad t \geq t_0,$$

где y_- и u_- – заданные числа ($y_- \geq y^*$), такие, что без испытательного сигнала (когда $v(t) = 0$) неравенства (5) выполняются с некоторым запасом. Предполагается, что при известных коэффициентах объекта (1) метод синтеза регулятора позволяет найти регулятор (2), обеспечивающий выполнение требования (3) к точности регулирования.

Задача адаптивного управления состоит в нахождении регулятора (2), а директива D317sefad: «Частотное адаптивное управление с самонастройкой испытательного сигнала» служит для решения этой задачи. Функции этой директивы могут быть использованы для планирования эксперимента адаптивного управления с целью определения коэффициентов алгоритма адаптации. Для этого используется технологическая модель объекта (1).

3. Особенности

На первом интервале адаптации объект (1) идентифицируется с помощью ам-функций TunFreq и IdPla, описанных в работе [8]. Полученные в результате идентификации оценки коэффициентов объекта (1) используются для синтеза регулятора (4) для второго интервала адаптации. Синтез осуществляется с помощью ем-функции Synt1. На втором интервале адаптации, система, состоящая из объекта (1) и синтезированного регулятора (ее уравнения для этапа планирования эксперимента формируются m-функцией FormTu) идентифицируется с помощью m-функций: TestOm3, TunAmp, TunFour и FrId, составляющих ам-функцию IdPla. Испытательные частоты для идентификации замкнутой системы определяются с помощью m-функции TestOm3 по собственным частотам предполагаемой системы, состоящей из модели объекта, идентифицированной на первом интервале адаптации и уравнений регулятора второго интервала. Эта система формируется также m-функцией FormTu.

Используя результат идентификации системы и известные коэффициенты регулятора, с помощью m-функции ReCalc вычисляются уточненные оценки частотных параметров объекта по которым находятся новые значения оценок его коэффициентов. Указанные ем- и m-функции объединяются в ам-функцию IdPlaSys, которая имеет структуру

$$\langle \text{IdPlaSys} \rangle = \langle \text{FormTu} \rangle \langle \text{TestOm3} \rangle \langle \text{TunAmp} \rangle \langle \text{TunFour} \rangle \langle \text{FrId} \rangle \langle \text{ReCalc} \rangle.$$

По результату идентификации объекта синтезируется регулятор для третьего интервала адаптации, и т.д., до тех пор, пока, в частности, не будет выполнено требование (3) к точности регулирования. Это требование проверяется ем-функцией AnSys.

Директива имеет следующую структуру

```
<D317sefad>=<интерфейс><TunFreq><IdPla><Synt1><FormTu><IdPlaSys>,
<интерфейс>=<исходные данные><преобразование исходных данных>,
<исходные данные>=<полиномы  $d(s)$  и  $k(s)$  объекта>
    <параметры  $\rho a \gamma$  внешнего возмущения>
    <граница выхода  $-y_-$  и входа  $-u_-$ >
    <требуемая точность регулирования  $y^*$ >
    <граница  $f^*$  внешнего возмущения>
    <интервал дискретности  $h$ >.
```

4. Основные функции

Синтез регулятора осуществляется с помощью ем-функции Synt1, в соответствии с которой решается задача о минимуме функционала

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ q_{11} y^2 + u^2 + \varepsilon_1^2 \dot{u}^2 + \dots + \varepsilon_{\psi}^2 [u^{(\psi)}]^2 \right\} dt,$$

где $\psi = n - \gamma$, а ε_i ($i = \overline{1, \psi}$) – коэффициенты, которые определяются в процессе работы функции Synt1 в зависимости от величины

$$q_{11} = \frac{f^{*2}}{y^{*2}},$$

так, чтобы модули корней полинома $\varepsilon(s) = 1 + \varepsilon_1^2 s^2 + \dots + \varepsilon_{\psi}^2 s^{2\psi}$ превышали частоты среза системы.

Примечание 1. Желаемая точность (3) системы может не достигаться, если частота среза системы, во многом обусловленная значением q_{11} , превышает собственные частоты немоделируемой динамики и модули корней полинома $k(s)$ с положительными их вещественными частями. В этом случае ем-функция Synt1 выдает сообщение. ■

M-функция FormTu формирует уравнение системы на основе уравнений объекта

$$(6) \quad \dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + \mathbf{b}_1 u + \mathbf{b}_2 f, \quad y = \mathbf{c}\mathbf{x},$$

и регулятора

$$(7) \quad \dot{\mathbf{x}}_c = A_c \mathbf{x}_c + \mathbf{b}_c (y - v), \quad u = \mathbf{c}_c \mathbf{x}_c + d_c (y - v).$$

Уравнение системы имеет вид

$$(8) \quad \dot{\mathbf{x}}_s = A_s \mathbf{x}_s + \mathbf{b}_{s1} v + \mathbf{b}_{s2} f, \quad \begin{aligned} y_{s1} = y &= \mathbf{c}_{s1} \mathbf{x}_s + d_{s11} v + d_{s12} f, \\ y_{s2} = u &= \mathbf{c}_{s2} \mathbf{x}_s + d_{s21} v + d_{s22} f, \end{aligned}$$

где $A_s = \begin{pmatrix} A + d_c \mathbf{b}_1 \mathbf{c} & \mathbf{b}_1 \mathbf{c}_c \\ \mathbf{b}_c \mathbf{c} & A_c \end{pmatrix}$, $\mathbf{b}_{s1} = \begin{pmatrix} -d_c \mathbf{b}_1 \\ -\mathbf{b}_c \end{pmatrix}$, $\mathbf{b}_{s2} = \begin{pmatrix} -\mathbf{b}_2 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$,
 $\mathbf{c}_{s1} = \begin{pmatrix} \mathbf{c} & \mathbf{0} \end{pmatrix}$, $\mathbf{c}_{s2} = \begin{pmatrix} d_c \mathbf{c} & \mathbf{c}_c \end{pmatrix}$, $d_{s11} = 0$, $d_{s12} = 0$, $d_{s21} = -d_c$, $d_{s22} = 0$.

M-функция `ReCalc` позволяет найти частотные параметры объекта (1) по частотным параметрам системы (1), (2), при известном регуляторе (2). Для этого используется очевидная связь передаточной функции $w(s) = k(s)/d(s)$ объекта с передаточной функцией $w_s(s) = k_s(s)/d_s(s)$ замкнутой системы и передаточной функцией $w_c(s) = r(s)/g(s)$ регулятора:

$$w(s_k) = \frac{w_s(s_k)}{[w_s(s_k) + 1]w_c(s_k)} = \alpha_k + j\beta_k \quad k = \overline{1, n},$$

где $s_k = j\omega_k$ ($k = \overline{1, n}$).

5. Пример

Рассмотрим асимптотически устойчивый объект управления, описываемый уравнением

$$(9) \quad d_3 \ddot{y} + d_2 \dot{y} + d_1 y + d_0 y = k_1 \dot{u} + k_0 u + f$$

с неизвестными коэффициентами и неизвестным возмущением $f(t)$ ограниченным известным числом f^* .

Задача состоит в том, чтобы найти регулятор

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

такой, чтобы, начиная с некоторого момента времени t_N выход объекта с этим регулятором не превышал величины $y^* = 0.2$.

Примечание 2. В численных экспериментах (на этапе планирования процесса адаптации) использовалась технологическая модель [9] с коэффициентами

$$(10) \quad d_3 = 0.2, \quad d_2 = 1.24, \quad d_1 = 5.24, \quad d_0 = 1; \quad k_1 = -0.4, \quad k_0 = 1,$$

возмущением $f(t) = \text{sign}(\sin 2.75t)$ и интервалом дискретности $h = 0.01$ с.

Передаточная функция объекта (9) с коэффициентами (10) имеет вид

$$w(s) = \frac{-0.4s + 1}{(5s + 1)(0.04s^2 + 0.24s + 1)} = -2 \frac{s - 2.5}{(s + 0.2)(s^2 + 6s + 25)}. \quad \blacksquare$$

В результате работы директивы `D317sefad` получено следующее:

1. Определена нижняя граница испытательных частот объекта $\hat{\omega}_l = 0.19$ ($\omega_0 = 0.1$). Это результат работы ам-функции `TunFreq`.
2. Получены оценки коэффициентов объекта:

$$(11) \quad d_3^{[1]} = 0.206, \quad d_2^{[1]} = 1.24, \quad d_1^{[1]} = 5.26, \quad d_0^{[1]} = 1; \\ k_1^{[1]} = -0.4037, \quad k_0^{[1]} = 1.0001.$$

Это результат работы ам-функции `IdPla`.

Передаточная функция идентифицированного объекта имеет вид

$$(12) \quad \hat{w}(s) = -1.95 \frac{s - 2.477}{(s + 0.198)(s^2 + 5.85s + 24.35)}.$$

Эти результаты совпадают с результатами работы директивы `D111sefad`, полученными в [8], так как исходные данные директив `D317sefad` и `D111sefad` совпадают (совпадают также ам-функции `TunFreq` и `IdPla`).

3. Используя данные (11) синтезирован регулятор (4) с передаточной функцией

$$(13) \quad \hat{w}_c(s) = \frac{-2.318s^2 - 12.76s - 42.57}{0.01s^2 + 0.2794s + 7.436}.$$

Это результат работы ам-функции `Synt1`.

4. Получены новые оценки коэффициентов объекта. Передаточная функция идентифицированного объекта приняла вид

$$(14) \quad \hat{w}(s) = -2 \frac{s - 2.323}{(s + 0.24)(s^2 + 6.012s + 24.97)}.$$

Это результат работы ам-функции `IdPlaSys`, в соответствии с которой была идентифицирована система с объектом (9) и регулятором (13), а затем, с помощью m-функции `ReCalc` определены частотные параметры объекта и по ним осуществлена его идентификация. Сравнивая передаточные функции (12) и (14) заключаем об их близости и поэтому процесс адаптации заканчивается.

5. Анализируя выходы замкнутой системы с помощью em-функции `AnSys` получаем $\max |y(t)| \leq 0.12$ и следовательно требование к точности регулирования выполнено.

Список литературы

1. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.
2. Zhao X., Lozano R. Adaptive pole placement for continuous-time system in the presence of bounded disturbance // 12-th World Congress of IFAC. Sydney. Australia. Preprints, 1993. V. I. P. 205-210.
3. Александров А.Г. Частотное адаптивное управление устойчивым объектом при неизвестном ограниченном возмущении // Автоматика и телемеханика, 2000. Т. 61. № 4. С. 106-116.
4. Бунич А.Л., Бахтадзе Н.Н. Синтез и применение дискретных систем управления с идентификатором. М.: Наука, 2003.

5. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. Пакет программ АДАПЛАБ: новые возможности для моделирования процессов адаптации // Труды II Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», SICPRO'03, М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2003. CD-ROM № ISBN 5-201-14948-0. С. 2556-2570.
6. Alexandrov A.G., Orlov Yu.F., Mikhailova L.S. Identification and Adaptation Toolbox for MATLAB // 13-th Symposium on System Identification. Rotterdam, 2003. on CD-ROM. P. 995-1000.
7. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф., Михайлова Л.С. АДАПЛАБ-М: директива для самонастройки испытательного сигнала // Труды II Всероссийской научной конференции: «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. CD-ROM № ISBN 5-201-14971-5. С. 6-17.
8. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. ADAPLAB-M: директива для частотной идентификации с самонастройкой испытательного сигнала // Труды IV Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». SICPRO'05. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2005.
9. Graebe S.F. Robust and adaptive control of an unknown plant: A benchmark of new format // 12-th World Congress of IFAC. Sydney. Australia. Preprints, 1993. V. III. P. 165-170.

Приложение

П.1. М-функции

FormTu – функция построения матриц системы в форме Коши

Синтаксис:

$$[As, Bs, Cs, Ds] = \text{FormTu} (A, B, C, D, Ac, Bc, Cc, Dc)$$

Исходные данные:

A, B, C, D – матрицы объекта (6) с $B=[B1 \ B2]$,
Ac, Bc, Cc, Dc – матрицы регулятора (7).

Результаты вычислений:

As, Bs, Cs, Ds – матрицы замкнутой системы (8) с

$$Bs=[Bs1 \ Bs2], \quad Cs=[Cs1 \quad Cs2], \quad Ds=[Ds11 \ Ds12 \ Ds21 \ Ds22].$$

ReCalc – функция вычисления частотных параметров объекта (1) по матрицам регулятора (7) и замкнутой системы (8)

Синтаксис:

$$[alf, bet] = \text{ReCalc} (As, Bs, Cs, Ds, Ac, Bc, Cc, Dc, om)$$

Исходные данные:

om – вектор испытательных частот объекта.

Результаты вычислений:

alf, bet – частотные параметры объекта.

AnSys – функция для определения максимальных значений выхода и входа объекта, замкнутого регулятором

Синтаксис:

$[um, um, Tend, x] = AnSys(A, B, C, D, par, pa, Ac, Bc, Cc, Dc, h, Tbegin, x)$

Исходные данные:

par – вектор параметров внешнего возмущения (первый элемент – **par(1)** – тип возмущения: 1 – ступенька, 2 – гармоника, 3 – меандр, и т.д.),
pa – вектор параметров алгоритма идентификации,
h – интервал дискретности,
Tbegin, x – время (момент) начала моделирования и вектор состояния.

Результаты вычислений:

um, um – модули максимальных значений выхода и входа объекта,
Tend, x – время (момент) окончания моделирования и вектор состояния.

П.2. Em-функции

Synt1 – функция синтеза регулятора, исходя из требования к точности

Синтаксис:

$[Ac, Bc, Cc, Dc] = Synt1(A, B, C, D, fbound, ybound)$

Исходные данные:

fbound – граница f^* внешнего возмущения,
ybound – допустимая граница y^* выхода объекта.

П.3. Am-функции

IdPlaSys – функция частотной идентификации объекта по результатам идентификации замкнутой системы

Синтаксис:

$[Aid, bid, cid, did, Tend, x] = IdPlaSys \dots$
 $(A, B, C, D, par, pa, y_-, u_-, Ac, Bc, Cc, Dc, h, Tbegin, x)$

Исходные данные:

y₋ – ограничение на выход объекта: $|y(t)| < y_-$,
u₋ – ограничение на вход объекта: $|u(t)| < u_-$.

Результаты вычислений:

Aid, bid, cid, did – матрицы идентифицированного объекта в форме Коши: $\dot{x} = Aid \cdot x + bid \cdot u, y = cid \cdot x + did \cdot u$.

П.4. Dm-функции – директивы (как объединение am-функций)

D317sefad – функция частотного адаптивного управления

Синтаксис:

$$[g, r] = \text{D317sefad} (d, k, m, \text{par}, \text{pa}, \text{fbound}, \text{ybound}, y_, u_, h)$$

Исходные данные:

d – вектор коэффициентов при выходном сигнале объекта,
k – вектор коэффициентов объекта при управлении,
m – вектор коэффициентов объекта при возмущении.

Результаты вычислений:

g – вектор коэффициентов при выходном сигнале регулятора,
r – вектор коэффициентов регулятора при испытательном сигнале.

D317sad – функция частотного адаптивного управления с заданными испытательными частотами для объекта (либо с заданной нижней границей испытательных частот)

Синтаксис:

$$[g, r] = \text{D317sad} (d, k, m, \text{par}, \text{pa}, \text{om}, \text{fbound}, \text{ybound}, y_, u_, h)$$

Исходные данные:

om – заданный n -мерный вектор испытательных частот.

D317 – функция частотного адаптивного управления с заданными амплитудами и частотами испытательного сигнала для объекта и замкнутой системы

Синтаксис:

$$[g, r] = \text{D317} (d, k, m, \text{par}, \text{pa}, \text{om}, \text{ro}, \text{fbound}, \text{ybound}, y_, u_, h)$$

Исходные данные:

ro – заданный n -мерный вектор амплитуд испытательного сигнала.