Руководство пользователя пакета АДАПЛАБ 3

А.1 Назначение

Пакет АДАПЛАБ-3 - это MATLAB-приложение для конечно-частотной идентификации и частотного адаптивного управления. АДАПЛАБ-3 предназначен для планирования эксперимента и моделирование процессов идентификации и адаптивного управления. Настоящее Руководство содержит описание первой части пакета, предназначенной для моделирования процессов частотной идентификации и адаптивного управления (планирования эксперимента /23/).

Планирование эксперимента служит для уточнения (заданных по умолчанию) параметров алгоритмов идентификации и адаптации. Для этой цели используется технологическая модель, которая описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, которые, как и вид внешнего возмущения, определяются знаниями специалиста (технолога) об объекте управления. Это некоторая предполагаемая модель объекта, которая может существенно отличаться от истинной его модели. Параметры алгоритмов идентификации и управления, полученные при использовании технологической модели, служат их значениями при идентификации и адаптивном управлении в реальном времени.

А.2 Особенности

АДАПЛАБ -3 отличается от существующих программных систем следующим:

1. Внешние возмущения и помехи - произвольные, ограниченные функции.
2. Выходы и входы объекта в процессе идентификации и адаптации ограничены заданными числами.
3. Цель адаптивного управления - обеспечение заданных допусков на ошибки по регулируемым переменным.
4. Для сокращения времени идентификации используется новый алгоритм настройки длительности идентификации.

В приложении даны более подробные сведения об особенностях метода конечно-частотной идентификации и частотного адаптивного управления в сравнении с другими подходами.

А.3 Область применения

А.3.1 Идентификация

Поведение объекта описывается следующим разностным уравнением:

$$\begin{aligned} &y[kh]+d_1 y[k(h-1)]+\ldots+d_n y[k(h-n)]=k_1 u[k(h-1)]+\ldots \\ &\ldots+k_n u[k(h-n)]+f[k(h-1)] \quad (k=0,1,2,\ldots), \end{aligned} \tag{А.1}$$

где $y(kh)$ – выход объекта, измеряемый в момент времени kh (h – интервал дискретности измерений), $u(kh)$ – управляемый вход, $f(kh)$ – неизвестное ограниченное внешнее возмущение:

$$|f(kh)| \le f^* \quad (k=0,1,2,\ldots), \tag{А.2}$$

где f^* - число, d_i и k_i $(i=\overline{1,n})$ – неизвестные числа, подлежащие определению, n – порядок объекта – известен.

Сигналы $u(kh)$ и $y(kh)$ должны быть ограничены:

$$|u(kh)| \le u\_, \ |y(kh)| \le y\_ \ \ (k=0,1,2,\ldots), \tag{А.3}$$

где $u\_$ и $y\_$ – заданные положительные числа, являющиеся границами диапазонов входного и выходного сигналов.

Число y_ таково, что выполняется условие:

$$|\bar{y}(kh)| \le y\_ \ ,(k=0,1,2,\ldots) \tag{А.4}$$

В котором $\bar{y}(kh)$ - «естественный » выход объекта (выход в режиме его нормальной эксплуатации), когда испытательный сигнал отсутствует.

Примечание 1 Понятие «естественный» выход объекта может включать в себя более общий случай, когда к объекту (А.1), наряду с возмущениями *f(kh)* , приложен управляющий сигнал $u_{prog}(kh)$. В этом случае, в уравнении (А.1): $u(kh) = u_{prog}(kh) + u_{\text{test}}(kh)$; где $u_{\text{test}}(kh)$ - испытательный сигнал. Включая функцию $k_\gamma u_{prog}^\gamma + \ldots + k_1 \dot{u}_{prog} + k_0 u_{prog}$ в функцию *f(kh)* и опуская нижний индекс $u(kh) := u_{test}(kh)$; приходим к уравнению (А.1). Ограничения (А.3) и условие (А.4) означают, что испытательный сигнал использует лишь остаточные (остающиеся в режиме нормальной эксплуатации объекта) ресурсы $|\bar{y}(kh)| - y\_$ определяющиеся числами y_ и u_.

Задача идентификации состоит в нахождении оценок коэффициентов объекта (А.1).

А.3.2 Адаптивное управление

Адаптивное управление для объекта (А.1) формируется регулятором с кусочно-постоянными коэффициентами

$$g_{n-1}^{[i]}u^{(n-1)}+..+g_1^{[i]}\dot{u}+g_0^{[i]}u=r_{n-1}^{[i]}(y^{(n-1)}-\upsilon_{[i]}^{(n-1)})+..+r_1^{[i]}(\dot{y}-\dot{\upsilon}_{[i]}+r_0^{[i]}(y-\upsilon_{[i]})) \qquad (A.5)$$

где i - номер интервала адаптации $(i=\overline{1,N})$, $\upsilon_{[i]}(kh)$ - испытательный сигнал.

По окончании адаптации регулятор имеет вид

$$\begin{gathered} g_{n-1}u[k(h-1)]+..+g_1u[k(h-n+1)]+g_0u[k(h-n)]= \\ =r_{n-1}y[k(h-1)]+..+r_1y[k(h-n+1)]+r_0y[k(h-n)] \end{gathered} \qquad (A.6)$$

и обеспечивает выполнение требования к точности регулирования

$$|y(kh)|\le y^* \quad (k=0,1,2,\ldots) \qquad (A.7)$$

где y^* - заданное число. В процессе адаптации учитываются ограничения (A.3).

A.4 Директивы идентификации

A.4.1 Уровни неопределённости объекта

Запишем передаточную функцию объекта (A.1) в виде

$$\omega(s)=K\frac{\prod\limits_{k=p1+p2+p3}^{p1+p2+p3}(T_ks+1)\prod\limits_{k=p1+p2+p3+1}^{p=p1+p2+p3+p4}(T_k^2s^2+2T_k\xi_{k-p1-p3}s+1)}{\prod\limits_{k=1}^{p1}(T_ks+1)\prod\limits_{k=p1+1}^{p1+p2}(T_k^2s^2+2T_k\xi_{k-p1}s+1)}, \qquad (A.8)$$

где K - коэффициент передачи, *Tk (k=1,p)* - постоянные времени объекта, ξ *k (k=1,p2+p4)* - декременты затухания.

Пусть $K=K^0+\Delta K$, $T_k=T_k^0+\Delta T_k$ *(k=1,p)* и $\xi_k=\xi_k^0+\Delta\xi_k$ *(k=1,p2+p4)*, где $\Delta K,\Delta T_k$ и $\Delta\xi_k$ - отклонения параметров объекта от известных значений $K^0,T_k^0(k=1,p)$ и $\xi_k^0(k=1,p1+p4)$ параметров предполагаемой модели. Эти отклонения удовлетворяют неравенствам

$$\left|\frac{\Delta K}{K^0}\right|\le\delta^k,\left|\frac{\Delta T_k}{T_k^0}\right|\le\delta_k^T \;\; k{=}1{,}p \;\; \left|\frac{\Delta\xi_k}{\xi_k^0}\right|\le\delta_k^\xi \;\; k{=}1{,}p2{+}p4, \qquad (A.9)$$

в которых $\delta^K,\delta_k^T(k=1,p)$ и $\delta_k^\xi(k=1,p2+p4)$ положительные числа. Они являются допуска на отклонения параметров.

Три уровня значений этих допусков определяют уровни неопределённости коэффициентов объекта (A.1).

Первый уровень (низкий уровень неопределённости)

$$\delta^K\le 0.1,\delta_k^T\le 0.1(k=1,p),\delta_k^\xi\le 0.1(k=1,p2+p4) \qquad (A.10)$$

Структурные параметры $n, \gamma, p_i \quad (i = 1{,}4)$ - известны.

Второй уровень (средний уровень неопределённости)

$$0.1 \le \delta^K, 0.1 \le \delta_k^T (k = \overline{1, p}),$$
$$0.1 \le \delta_k^\xi (k = \overline{1, p2 + p4}) \tag{A.11}$$

Известны структурные параметры n и γ

Третий уровень (высокий уровень неопределённости)

Структурные параметры n и γ неизвестны.

Алгоритм (и следовательно директива) идентификации существенно зависит от уровня неопределённости объекта.

Директивы D123su и D123sdsu предназначены для идентификации объектов с первым уровнем неопределённости, а Dl23sursad1 - для идентификации объектов второго уровня неопределённости.

А.4.2 Испытательный сигнал

Для идентификации объекта (1) используется испытательный сигнал:

$$u(kh) = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \sin \omega_i kh, \quad k = \overline{0, N-1} \tag{A.12}$$

где ρ_i и ω_i - его амплитуды и частоты. Амплитуды испытательного сигнала определяются ограничениями (А.3) на выходы и входы объекта, а его частоты должны удовлетворять условию

$$\omega_l \le \omega \le \omega_u \tag{A.13}$$

где ω_l и ω_u - нижняя и верхняя границы собственных частот объекта:

А.4.3 Директива D123su

Она предназначена для идентификации объектов первого уровня неопределённости. Такая идентификация используется для диагностики режима работы объекта. Действительно, пусть имеется многорежимный объект (режимы А, В, С, ...), коэффициенты уравнения (А.1) которого существенно изменяются при переходе от режима к режиму. При этом в каждом режиме работы объекта, его коэффициенты известны достаточно точно и выполняются неравенства (А.10).

Цель идентификации - установить, работает ли объект, например, в режиме В или нет, сравнивая коэффициенты идентифицированного объекта с известными коэффициентами режима В.

Директива имеет следующую структуру

<D123su> = <интерфейс df123su> <протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные> <Преобразование исходных данных>,

<исходные данные> = <коэффициенты уравнения (А.1)> <параметры par внешнего возмущения> <интервал дискретности h> <амплитуды *rho* и частоты om испытательного сигнала> <длительность идентификации Ptau><момент начала фильтрации Tfi>.

Расчётная часть директивы - функция df123su имеет структуру

<df123su> = <Cauchy1> <Analysys3a> <FourSu1su> <Freqd2>

Она состоит из элементарных m-функций, с помощью которых выполняются содержательные для директивы операции. Эти элементарные m-функции называются em-функциями. Em-функции директивы:

Cauchyl - преобразует уравнение (А.1) к форме Коши;

Analysis3a - моделирует уравнение (А.1), приведённое к форме Коши (форма пространства состояний).

FourSu1su - фильтр Фурье - находит оценки частотных параметров объекта (А.1), вычисляя для каждого $\rho = \rho_i$ и $\omega = \omega_i$

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_i(N) &= \frac{2}{\rho_i N}\sum_{k=0}^{N-1} y(kh)\sin\omega_i kh \\ \hat{\beta}_i(N) &= \frac{2}{\rho_i N}\sum_{k=0}^{N-1} y(kh)\cos\omega_i kh \end{aligned} \qquad i = \overline{1,n} \tag{А.14}$$

где N - время фильтрации;

Feqd2 - решение частотных уравнений идентификации.

Примечание 2 Так как собственные частоты объекта (1) известны

$$\omega_i^C = \frac{1}{|T_i|} \quad i = 1, p\,, \tag{А.15}$$

то можно выбирать испытательные частоты достаточно близко к собственным.

Примечание 3 Амплитуды испытательных частот вычисляются следующим образом. Исходя из того, что каждая из *n* испытательных частот должна вносить одинаковый вклад в выходной сигнал *y* , будем определять

$$p_i = \frac{y\_/n}{\omega(j\omega_i)}, \; i = 1, n\,, \tag{А.16}$$

Если при этом нарушается условие

$$\sum_{i=1}^{n} \rho_i \leq u_{-} \tag{A.17}$$

то определив

$$\rho = \frac{u_{-}}{\sum\limits_{i=1}^{n} \rho_i} \tag{A.18}$$

и умножив правую часть (А.16) на это число, найдём искомые амплитуды.

Примечание 4 Для повышения точности идентификации следует выбирать испытательные частоты кратными наименьшей испытательной частоте.

А.4.4 Директива Dl23sdsu

Директива служит для более точной идентификации (диагностики) режима работы объекта, когда различие между коэффициентами объекта (А.1) для различных режимов его работы не очень велико. Если длительность идентификации задаётся как в директиве D123su априори, то точность идентификации может оказаться низкой, поэтому диагностика режима работы объекта будет неверной.

Поведение объекта описывается разностным уравнением (А.1). На объект (А.1) подается гармонический испытательный сигнал

$$u(kh) = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \sin \omega_i kh, \quad k = \overline{0, N-1}, \tag{A.19}$$

где n – порядок объекта, N – количество интервалов фильтрации, первый раз оно соответствует начальной длительности испытания $N = \dfrac{Ptau \cdot 2 \cdot \pi}{\omega_0 \cdot h}$, далее периоду наименьшей испытательной частоты $N = \dfrac{2 \cdot \pi}{\omega_0 \cdot h}$. Количество интервалов фильтрации показывает сколько раз на объект будет подаваться испытательный сигнал, если учитывать что подается он в каждый дискретный момент времени (то есть каждую h секунды). Величину $\dfrac{2 \cdot \pi}{\omega_0}$ называют периодом T наименьшей испытательной частоты, время испытания объекта всегда кратно этой величине.

С объекта снимаются частотные параметры его входа (α_u, β_u) и выхода (α_y, β_y):

$$\begin{aligned}
\alpha_y(N) &= \frac{2}{\rho N} \sum_{k=0}^{N-1} y(kh) \sin \omega kh, & \alpha_u(N) &= \frac{2}{\rho N} \sum_{k=0}^{N-1} u(kh) \sin \omega kh, \\
\beta_y(N) &= \frac{2}{\rho N} \sum_{k=0}^{N-1} y(kh) \cos \omega kh, & \beta_u(N) &= \frac{2}{\rho N} \sum_{k=0}^{N-1} u(kh) \cos \omega kh.
\end{aligned} \tag{A.20}$$

где α_y и β_y - частотные параметры выхода объекта, а α_u и β_u - частотные параметры входа объекта.

По ним вычисляются частотные параметры объекта:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{yi}\alpha_{ui} + \beta_{yi}\beta_{ui}}{\alpha_{ui}^2 + \beta_{ui}^2}, \qquad \beta_i = \frac{-\alpha_{yi}\beta_{ui} + \beta_{yi}\alpha_{ui}}{\alpha_{ui}^2 + \beta_{ui}^2}, \quad i = \overline{1,n}. \tag{A.21}$$

Оценки коэффициентов объекта (А.1) находятся решателем частотных уравнений на основе частотных параметров объекта (А.21). Решая частотные уравнения

$$\begin{cases} \sum\limits_{\nu=1}^{n} \hat{k}_\nu \cos\nu\omega_i h - \sum\limits_{\nu=1}^{n} \hat{d}_\nu \left(\hat{\alpha}_i \cos\nu\omega_i h + \hat{\beta}_i \sin\nu\omega_i h\right) = \hat{\alpha} \\ -\sum\limits_{\nu=1}^{n} \hat{k}_\nu \sin\nu\omega_i h + \sum\limits_{\nu=1}^{n} \hat{d}_\nu \left(\hat{\alpha}_i \sin\nu\omega_i h - \hat{\beta}_i \cos\nu\omega_i h\right) = \hat{\beta}_i \end{cases}, \quad i = \overline{1,n} \tag{A.22}$$

находим оценки $\hat{k}$ и $\hat{d}$ коэффициентов передаточной функции:

$$W(z^{-1}) = \frac{k_1 z^{-1} + \ldots + k_n z^{-n}}{1 + d_1 z^{-1} + \ldots + d_n z^{-n}} = \frac{k(z^{-1})}{1 + d(z^{-1})}. \tag{A.23}$$

После этого испытание продолжается и через определенное количество интервалов фильтрации N, соответствующее периоду T минимальной испытательной частоты, частотные параметры входа и выхода (А.20) снимаются вновь, вычисляются оценки частотных параметров объекта (А.21), решаются частотные уравнения (А.23) и находятся оценки $\hat{k}$ и $\hat{d}$ коэффициентов передаточной функции (А.23). Проверяется условие:

$$\begin{gathered} \left| \hat{\alpha}_i^{Ptau\cdot T} - \hat{\alpha}_i^{Ptau\cdot T+T} \right| < epsg, \; \left| \hat{\beta}_i^{Ptau\cdot T} - \hat{\beta}_i^{Ptau\cdot T+T} \right| < epsg, \; i = \overline{1,n} \\ \left| \hat{k}_0^{Ptau\cdot T} - \hat{k}_0^{Ptau\cdot T+T} \right| < epsg, \left| \hat{k}_1^{Ptau\cdot T} - \hat{k}_1^{Ptau\cdot T+T} \right| < epsg, \\ \left| \hat{d}_0^{Ptau\cdot T} - \hat{d}_0^{Ptau\cdot T+T} \right| < epsg, \; \left| \hat{d}_1^{Ptau\cdot T} - \hat{d}_1^{Ptau\cdot T+T} \right| < epsg. \end{gathered} \tag{A.24}$$

В общем виде:

$$\begin{gathered} \left| \hat{\alpha}_i^{Ptau\cdot T+jT} - \hat{\alpha}_i^{Ptau\cdot T+(j+1)T} \right| < epsg, \; \left| \hat{\beta}_i^{Ptau\cdot T+jT} - \hat{\beta}_i^{Ptau\cdot T+(j+1)T} \right| < epsg, \; i = \overline{1,n} \\ \left| \hat{k}_0^{Ptau\cdot T+jT} - \hat{k}_0^{Ptau\cdot T+(j+1)T} \right| < epsg, \left| \hat{k}_1^{Ptau\cdot T+jT} - \hat{k}_1^{Ptau\cdot T+(j+1)T} \right| < epsg, \\ \left| \hat{d}_0^{Ptau\cdot T+jT} - \hat{d}_0^{Ptau\cdot T+(j+1)T} \right| < epsg, \; \left| \hat{d}_1^{Ptau\cdot T+jT} - \hat{d}_1^{Ptau\cdot T+(j+1)T} \right| < epsg, \end{gathered} \tag{A.25}$$

$$j = \overline{0, P1\max}.$$

где $epsg$ - предельно допустимая разность (коэффициент корреляции), которая задается заранее.

Если условие не выполнено, испытание продолжается, через определенное количество интервалов фильтрации, соответствующее периоду минимальной испытательной частоты, снимаются частотные параметры входа и выхода (А.20), находятся частотные параметры объекта (А.21) и оценки коэффициентов объекта (А.22). Проверяется условие (А.25), в котором полученные результаты сравниваются с предыдущими. Испытание продолжается до тех пор, пока условие (А.25) не будет выполнено.

Если условие (А.25) не выполняется, то по истечении заданной максимальной длительности pMax, выводится сообщение «Невозможно настроить длительность испытательного сигнала» и испытание прекращается.

А.4.5 Директива Dl23sursad1

А.4.5.1 Цели и особенности директивы

Значительные интервалы разброса коэффициентов объекта (А.1) второго уровня неопределённости не позволяют найти априори амплитуды испытательного сигнала так, чтобы выполнялись ограничения (А.3) выхода объекта, и поэтому необходима самонастройка амплитуд испытательных гармоник в процессе идентификации. Она выполняется em-функцией TunAmpsur1 следующим образом.

Амплитуда *р* сигнала (А.12) находится путём уменьшения его значения, начиная с

$$\rho_i = \frac{u\_ \cdot \omega_i}{\sum_{j=1}^{n} \omega_j}. \tag{А.26}$$

где n – порядок объекта, N – начальное количество интервалов фильтрации: $N = \frac{2 \cdot \pi \cdot p_н}{\omega_l \cdot h}$, где

$p_н$ – начальное число базовых периодов T_l в испытательном сигнале, $T_l = \frac{2\pi}{\omega_l}$, ω_l – нижняя граница испытательных частот.

Амплитуды считаются настроенными, когда выход объекта не превышает заданного y_.

По окончании процесса настройки амплитуд, когда найдены искомые амплитуды ρ^*, вычисляется показатель интенсивности испытательного сигнала

$$\chi = \frac{\left| y_{\max} - \bar{y}_{\max} \right|}{\left| y_{\max} \right|}, \tag{А.27}$$

в котором

$$\bar{y}_{\max} = \max_{\frac{N^{[0]}}{2} \le k \le N^{[0]}} \left|\bar{y}(kh)\right|, \; y_{\max} = \max_{\frac{3N^{[0]}}{2} \le k \le 2N^{[0]}} \left|y(kh)\right|, \qquad (A.28)$$

где $\bar{y}(kh)$ – «естественный» выход объекта, когда $u(kh) = 0$.

Если $\chi < 0.1$, значит, испытательный сигнал слишком мал.

A.4.5.2 Структура директивы

Директива **Dl23sursad1** имеет следующую структуру:

<D123sursad1> = <интерфейс> <df123sursad1> <протокол>,

<интерфейс> = <исходные данные> <преобразование исходных данных>,

<исходные данные> = <коэффициенты уравнения (A.1)> <параметры par внешнего возмущения> <интервал дискретности> <граница выхода - *y*_ и входа - u_> <оценки границ собственных частот объекта>.

Расчётная часть директивы - функция **Df 123sursad1** имеет структуру

<Df 123sursad1> = <Cauchy1> <TunAmpsur1> <tunFoursur5> <Freqd2>.

A.4.6 Директива D123sfloadsu1

A.4.6.1 Цели и особенности директивы

Неопределённые интервалы разброса коэффициентов объекта (A.1) второго уровня неопределённости не позволяют найти априори оценки $\hat{\omega}_l$ и $\hat{\omega}_u$, нижней и верхней границ собственных частот объекта и поэтому необходимо оценить эти границы в процессе идентификации. Оценка нижней границы собственных частот осуществляется em-функцией TunFlosu следующим образом. Задаваясь достаточно малым числом $\omega = \omega_{in}$ (которое называется начальным значением оценки нижней границы ω_l и является параметром алгоритма оценивания нижней границы), возбуждаем объект (A.1) гармоникой (A.12) при $\omega = \omega_{in}$ и амплитудой, определяемой с помощью функции TunAmpsur и вычисляем оценку:

$$\hat{\omega}_l^{(1)} = \frac{\omega_0 \hat{\alpha}(N)}{\hat{\beta}(N)},$$

где длительность N находится с помощью функции TunFoursur. Затем изложенное повторяется для $\omega = \omega_{in}/2$ и находится новая оценка $\hat{\omega}_l^{(2)}$ и т.д., до тех пор, пока не выполнится условие

$$\frac{|\,\widehat{\omega}_l^{(i)}-\widehat{\omega}_l^{(i-1)}\,|}{|\,\widehat{\omega}_l^{(i-1)}\,|}\le\varepsilon_{om}\quad i=2,3,\,..\,,maxom, \tag{A.29}$$

где ε_{om} - заданное число (это параметр алгоритма оценивания нижней границы, по умолчанию он равен 0.1); *maxom* -число иттераций по частоте для оценки нижней границы Функция (это параметр алгоритма оценивания нижней границы, по умолчанию он равен 10). **TunFlosu** является укрупнённой m-функцией (am-функцией), так как она состоит из em-функций. Эта am-функция имеет вид

<TunFlosu> = <TunAmpsur1> <initFoursur1> <TunFourflosu>.

Параметры алгоритма оценки нижней границы собственных частот дополняются параметрами алгоритма настройки длительности, реализуемого em-функцией **TunFourflosu**, так как последние могут не совпадать с одноимёнными параметрами em-функции **TunFoursu** , используемой при идентификации.

Оценка верхней границы $\widehat{\omega}_u$ собственных частот объекта может быть получена косвенным либо прямым способом. В директиве **Dl23sfloadsu1** используется косвенный способ, который предполагает, что известна оценка M диапазона собственных частот объекта:

$$M=\frac{\omega_u}{\omega_l}$$

и тогда искомая граница

$$\widehat{\omega}_u=M\widehat{\omega}_l,$$

где M - параметр алгоритма оценки верхней границы (по умолчанию M = 30).

A.4.6.2 Структура директивы

Расчётная часть директивы **Dl23sfloadsu1** содержит am-функцию **Df123sursad1** , так, как после определения нижней границы собственных частот задача идентификации сводится к задаче, решаемой директивой **D123sursad1 .** Итак,

D123sfloadsu1> = <интерфейс> <Df123sfloadsu1> <протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные> <преобразование исходных данных>,

<исходные данные> = <коэффициенты уравнения (A.1)> <параметры par внешнего возмущения> <интервал дискретности > <грани-ца выхода - *y*_ **и входа** - u_>.

Расчётная часть директивы:

<Df123sfloadsu1> = <Cauchy1> <tunflosu> <testom2> <omm>
<tunampsur1> <tunFoursur5> <freqd2>

А.5 Директивы адаптивного управления

А.5.1 Структура директив

Интервалы адаптации регулятора (А.5) состоят из групп интервалов. Во время первой группы интервалов ($i = 1, N_{ИД}$) объект (А.1) идентифицируется с помощью директив идентификации, в зависимости от уровня неопределённости его коэффициентов. Затем, с помощью em-функции AKORD3 находится (по идентифицированным коэффициентам объекта) регулятор (А.5), при $i = N_{ид} + 1$ объект замыкается этим регулятором и начинается вторая группа интервалов адаптации, в течение которой находятся частотные параметры система, состоящей из объекта замкнутого регулятором.

Заметим, что при достаточно большой длительности идентификации объекта в течение первой группы интервалов можно достичь низкого уровня неопределённости замкнутой системы. Однако, это означает, что в течение указанного времени будет нарушаться требование (А.7) к точности. Чтобы сократить это время, длительность идентификации объекта уменьшается, и замкнутая система может иметь средний уровень неопределённости.

Директивы адаптации состоит из следующих частей: dm-функции идентификации, am-функции для синтеза регулятора, em-функции определения частотных параметров замкнутой системы и em-функции для вычисления уточнённых оценок частотных параметров объекта.

А.5.2 Основные функции

А.5.2.1 Am-функция AKORD3

Am-функция AKORD3 – функция конструирования оптимального регулятора.

Расчетная часть функции имеет следующую структуру:

<akord3>=<dare><vost2><Srez3d><Formeps1><Dec2><formu1d><dare><vost2><radi5>

В основе алгоритма синтезатора регулятора лежит решение задачи АКОР (LQ-оптимизации).

Модель объекта в дискретной форме описывается разностными уравнениями (А.1).

Для решения задачи АКОР приведем модель объекта к форме Коши:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) &= C_d x(k) \end{aligned} \quad (А.30)$$

Требуется найти управление

$$u(k) = Kx(k), (k = 0,1,2...) \quad (А.31)$$

такое, чтобы на асимптотически устойчивых движениях системы, возбужденных произвольными начальными отклонениями минимизировался функционал:

$$J=\sum_{k=1}^{\infty}\left\{\begin{matrix} x^T(k)Qx(k)+u^T(k)Ru(k)+\varepsilon_1{}^2\left[\frac{u(k+1)-u(k)}{h}\right]^2+\varepsilon_2{}^2\left[\frac{u(k+2)-u(k+1)}{h}\right]^2+\ldots \\ \ldots+\varepsilon_\psi{}^2\left[\frac{u(k+\psi)-u(k+\psi-1)}{h}\right]^2 \end{matrix}\right\} \qquad (A.32)$$

где ε_i $(i=\overline{1,\psi})$ – достаточно малые коэффициенты, $\psi=n-1$;

$Q=C^TqC$ – положительно-определенная матрица в которой коэффициент q определяется по формуле:

$$q=\frac{f^{*2}}{y\_^2}. \qquad (A.33)$$

C – вектор выхода объекта;

R- положительно-определенная весовая матрица.

Используя функцию **dare** решается дискретное уравнение Риккати:

$$A_d^T PA_d - P - A_d^T PB_d(B_d^T PB_d+R)^{-1}B_d^T PA_d = -Q \qquad (A.34)$$

По результатам решения уравнения Риккати находится матрица K оптимального управления

$$\begin{matrix} u(k)=Kx(k),(k=0,1,2\ldots) \\ K=-(B_d^T PB_d+R)^{-1}\cdot B_d^T PA_d \end{matrix} \qquad (A.35)$$

Реализация данного управления затруднена тем, что не все переменные состояния объекта доступны непосредственному измерению, а можно измерять измерить лишь компоненты вектора y связанные с переменными состояния соотношением:

$$y(k)=C_d x(k) \qquad (A.36)$$

В функции **vost2** используется прямой метод восстановления, для того чтобы связать неизмеряемые переменные состояния объекта с иго измеряемым выходом.

$$\begin{cases} y(k)=C_d x(k) \\ y(k+1)=C_d x(k+1)=C_d A_d x(k)+C_d B_d u(k) \\ y(k+2)=C_d A_d x(k+1)+C_d B_d u(k+1)=C_d A_d^2 x(k)+C_d B_d u(k)+C_d B_d u(k+1) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ y(k+n-1)=C_d A_d^{n-1}x(k)+C_d A_d^{n-2}B_d u(k)+\ldots.+C_d B_d u(k+n-2) \end{cases} \qquad (A.37)$$

Данную систему можно записать в виде:

$$\begin{vmatrix} C_d \\ C_d A_d \\ \ldots \\ \ldots \\ C_d A_d^{n-1} \end{vmatrix} x(k)=\begin{vmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ \ldots \\ \ldots \\ y(k+n-1) \end{vmatrix}-\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ C_d B_d & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ C_d A_d^{n-2}B_d & C_d A_d^{n-3}B_d & \ldots & \ldots. & C_d B_d \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \ldots \\ \ldots \\ u(k+n-2) \end{vmatrix} \qquad (A.38)$$

M(n x 1) y(n x 1) F(n x (n-1)) u((n-1) x 1)

Или

$$x(k) = M^{-1}y - M^{-1}Fu$$
$$u(k) = C^{'}x(k) = C^{'}M^{-1}y - C^{'}M^{-1}Fu \qquad (A.39)$$

Вектора содержащие коэффициенты полиномов регулятора в форме вход - выход находятся как

$$r_{1d} = C^{'}M^{-1};$$
$$g_{1d} = C^{'}M^{-1}F; \qquad (A.40)$$

Далее используя функцию **Srez3d** из равенства

$$\left|\frac{k(j\omega_{cp})}{d(j\omega_{cp})}\cdot\frac{r_{1d}(j\omega_{cp})}{g_{1d}(j\omega_{cp})}\right| = 1 \qquad (A.41)$$

находится частота среза замкнутой системы, или максимальная из частот среза, если таковых несколько. При этом используется итерационный метод деления отрезка пополам.

Алгоритм работы дискретного регулятора заключается в формировании управляющего сигнала u(k) по измеряемому выходу объекта y(k). Если степень числителя рассчитанного регулятора превышает степень его знаменателя, то физически это означает, что формирование управляющего сигнала на данном интервале дискретности необходимо производить по значению выхода объекта на следующих интервалах дискретности. Реализовать данный алгоритм управления в реальном времени не представляется возможным. Поэтому необходимо синтезировать дискретный регулятор степень числителя которого не превышает степень знаменателя.

Очевидно, что реализуемый алгоритм должен иметь структуру

$$u(k) = C^{'}x(k), k = 0,1,2,... \qquad (A.42)$$

где $C^{'}$ матрица оптимального управления получена на основе решения дискретного уравнения Риккати, при решении которого в функционале оптимизации учитываются коэффициенты полинома реализуемости ε_i^2. Поэтому необходимо вычислить коэффициенты полинома коэффициенты полинома ε_i^2 входящего в функционал оптимизации которые ранее брались равными нулю. Для этого используется функция **Formeps1**.

$$\varepsilon_i^2 = \frac{C_n^i}{\alpha^{2i}\omega_{cp}^{2i}}, i = \overline{1,\psi_1} \qquad (A.43)$$

где C_n^i - число сочетаний из n элементов по i , α - параметр алгоритма синтеза $\alpha \in [5..10]$,

ω_{cp} - частота среза системы.

С помощью функции декомпозиции полинома **Dec2** находится гурвицев полином e_1, из тождества:

$$e_1(s)e_1(-s)=\varepsilon(s^2) \quad (A.44)$$

где $\varepsilon(s^2)$ - полином коэффициентами которого являются коэффициенты ε_i^2 рассчитанные ранее функцией **Formeps1** .

С помощью функции **formu1d** рассчитываются расширенные матрицы объекта управления для решения дискретных уравнений Риккати с учетом полинома реализуемости. Обозначим

$$x_{n+1}(k)=u(k), x_{n+2}(k)=\frac{u(k+1)-u(k)}{h} \quad (A.45)$$

Тогда

$$\begin{cases} hx_{n+2}(k)=x_{n+1}(k+1)-x_{n+1}(k) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ hx_{n+\psi}(k)=x_{n+\psi-1}(k+1)-x_{n+\psi-1}(k) \end{cases} \quad (A.46)$$

Или

$$\begin{cases} x_{n+1}(k+1)=x_{n+1}(k)+hx_{n+2}(k) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ x_{n+\psi-1}(k+1)=x_{n+\psi-1}(k)+hx_{n+\psi}(k) \end{cases} \quad (A.47)$$

$$A_{ud}=\begin{vmatrix} A_d & B_d & 0 \\ 0 & & E_1 \end{vmatrix} \qquad B_{ud}=\begin{vmatrix} 0 \\ h \end{vmatrix} \qquad Q_{ud}=\begin{vmatrix} Q & 0 \\ 0 & Ee_2 \end{vmatrix} \qquad R_{ud}=e_1(\psi+1) \quad (A.48)$$

где e_2 - это e_1 без $\psi+1$ элемента

E_1 - матрицы размером $\psi\times\psi$, имеющая вид

$$E_1=\begin{vmatrix} 1 & h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (A.49)$$

По расширенным матрицам $A_{ud}, B_{ud}, Q_{ud}, R_{ud}$ вновь с помощью функции **dare** решается дискретное уравнение Риккати и находится матрица $C_2^{'}$ оптимального управления.

Используя прямой метод восстановления, функцией **vost2** строится новый регулятор с полиномами r_{2d}, g_{2d} .

Формируются матрицы вида:

$$A_{dg} = \begin{vmatrix} 1 & h & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & h & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h \\ hC_2^{'}(\psi) & hC_2^{'}(\psi-1) & hC_2^{'}(\psi-2) & \dots & hC_2^{'}(1) \end{vmatrix}$$

$$B_{dg} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ h \end{vmatrix} \qquad (A.50)$$

$$C_{dg} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix}$$

По матрицам A_{dg}, B_{dg}, C_{dg} находятся полиномы передаточной функции в форме «вход-выход» k_{dg}, d_{dg}.

Конечные коэффициенты регулятора находятся как

$$g_d = \left|d_{dg}\right| - \left|0 \quad h^{\psi} g_{2d}\right|$$
$$r_d = h^{\psi} r_{2d} \qquad (A.51)$$

После вычисления полиномов передаточной функции регулятора с помощью функции **Radi5** вычисляется радиус r запасов устойчивости замкнутой системы:

$$r^2 = \min\left(\frac{d(\omega)g(\omega) - k(\omega)r(\omega)}{d(\omega)g(\omega)}\right) \qquad \omega_{\min} <= \omega <= \omega_{\max}. \qquad (A.52)$$

A.5.2.2 Em-функция FormTu

Функция формирования матриц уравнений замкнутой системы по матрицам уравнений объекта и регулятора в форме Коши. Она формирует уравнение системы (A.1), (A.6) на основе уравнений объекта

$$\dot{x} = Ax + b_1 u + b_2 f \qquad , y = cx \qquad (A.53)$$

и регулятора

$$\dot{x}_c = A_c x_c + b_c (y - \upsilon) \qquad u = c_c x_c + d_c (y - \upsilon) \qquad (A.54)$$

Уравнение системы имеет вид

$$\dot{x}_s = A_s x_s + b_{s1}\upsilon + b_{s2} f, \quad y_{s1} = y = c_{s1} x_s + d_{s11}\upsilon + d_{s12} f, \quad y_{s2} = u = c_{s2} x_s + d_{s21}\upsilon + d_{s22} f \qquad (A.55)$$

AnSys2d - m – функция решений уравнений системы.

А.5.2.3 Директива D323su

Она предназначена для диагностики режима работы объекта и синтеза регулятора, обеспечивающего заданные требования к точности регулирования.

В соответствии с этой директивой объект идентифицируется с помощью dm-функции <df123su> и синтезирует регулятор, используя am-функцию <AKORD3>**.**

Директива имеет структуру:

<D323su>=<интерфейс><df323su><протокол>,

<интерфейс> = <исходные данные> <преобразование исходных данных>,

<исходные данные> = <исходные данные директивы D123SU> <интервал дискретности замкнутой системы> <длительность идентификации замкнутой системы> <момент начала фильтрации><верхняя граница модуля ошибки регулирования> <верхняя граница модуля внешнего возмущения >.

Расчётная часть директивы - dm-функция **Df323su** имеет вид

<Df323su>=<df123su><akord3><cauchy1><formtu><ansys2d>

А.5.2.4 Директива D323sdsu

Директива служит для более точной идентификации режима работы объекта и синтеза регулятора. Её расчетная часть - dm-функция <**df123sdsu**> отличается от dm-функции <**df323su**> dm-функцией <**df123sdsu**> **.**

Структура директивы:

<D323sdsu> = <интерфейс> <df323sdsu> <протокол>

<интерфейс> = <исходные данные> <преобразование исходных данных>,

<исходные данные> = <исходные данные директивы d123su> <интервал дискретности замкнутой системы> <верхняя граница модуля ошибки регулирования> <верхняя граница модуля внешнего возмущения >.

Расчётная часть директивы - dm-функция **Df323sdsu** имеет вид

<Df323sdsu>=<df123sdsu1><akord3><cauchy1><formtu><ansys2d><tunFoursur3s1>

TunFoursur3s1 **–** функция Фурье-фильтрации с самонастройкой длительности фильтрации. Эта функция идентична tunFoursur5

А.5.2.5 Директива D323susad

Директива предназначена для адаптивного управления объектом второго уровня неопределённости. В отличие от директивы **<d323sdsu>,** она содержит самонастраивающуюся амплитуду испытательного сигнала $\upsilon(kh)$**.** Самонастройка испытательного сигнала осуществляется так, чтобы выполнялись ограничения на входы и выходы объекта, и для проверки этого используется em-функция **<formtu>.**

Она имеет структуру:

<D323susad>=<интерфейс><Df323susad><протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные><Преобразование исходных данных>,

<Исходные данные> = <исходные данные директивы D323susad> <интервал дискретности замкнутой системы> <верхняя граница модуля ошибки регулирования> <верхняя граница модуля внешнего возмущения >.

Расчётная часть директивы - dm-функция **Df323susad** имеет вид

<Df323susad>=<Df123sursad1><akord3><cauchy1><formtu><ansys2d><tunampsus><initfoursurs><TunFursur3s1>

Tunampsus – функция самонастройки испытательного сигнала. Работает по тому же принципу что и tunampsur1.

А.5.2.6 Директива D323sfloadsu1

Директива служит для адаптивного управления объектом второго уровня неопределенности, когда априорная оценка **(omlow)** нижней границы собственных частот отсутствует.

Директива имеет структуру:

<D323sfloadsu1>=<интерфейс><Df323sfloadsu1><протокол>

<интерфейс>=<исходные данные><преобразование исходных данных>,

<исходные данные> = <исходные данные директивы Dfl23sfloadsu1> <интервал дискретности замкнутой системы> <верхняя граница модуля ошибки регулирования> <верхняя граница модуля внешнего возмущения >.

Расчётная часть директивы - dm-функция **<df323sfloadsu1>** имеет вид

<df323sfloadsu1>=<akord3><cauchy1><formtu><ansys2d><tunampsus>

<initfoursurs><initfoursus3s1>

А.6 М-функции директив

Df123su - dm-функция конечно-частотной идентификации с заданными амплитудами и частотами испытательного сигнала, а также с заданной длительностью идентификации

Синтаксис:

[vkd,vdd,Tend,x]=Df123su(d, k, m, np, gamp, par, h, om, rho, Ptau, Tfi, Tbegin, x, flag)

Исходные данные:

d - вектор коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

к - вектор коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

m - вектор коэффициентов при возмущении,

пр - предполагаемая степень знаменателя передаточной функции объекта,

gamp - предполагаемая степень числителя передаточной функции объекта,

par - вектор параметров внешнего возмущения объекта (раг(1) - тип возмущения: 1 - ступенька, 2 - гармоника, 3 - меандр, и т.д.),

h - интервал дискретности,

om - вектор частот испытательного сигнала,

rho - вектор амплитуд испытательного сигнала,

Ptau - время идентификации (число периодов минимальной испытательной частоты),

Tfi - задержка начала фильтрации (число периодов минимальной испытательной частоты),

Tbegin - время (момент) начала идентификации объекта,

x - вектор состояния объекта,

flag - флаг построения графика: flag $\neq 0$ - график строить, flag = 0 - график не строить.

Результаты вычислений:

vdd - оценка вектора коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

vkd - оценка вектора коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

Tend - время (момент) окончания идентификации.

Cauchyl - m-функция построения матриц объекта в форме Коши по коэффициентам формы (1) «вход-выход»

Синтаксис:

[A, B, C,D] = Cauchyl (d, k, m)

Результаты вычислений:

A, B, C, D - матрицы объекта в форме Коши:

$$\dot{x} = Ax + B1u + B2f \quad , \; y = Cx + D1u + D2\eta \qquad \text{(A.56)}$$

Omm2 - m-функция доопределения кратных испытательных частот так, чтобы они были кратными интервалу дискретности *h*

Синтаксис:

om = omm2 (om, h)

Analysis3a - m-функция моделирования процессов в объекте

Синтаксис:

[y, x] = Analysis (A, B, C, D, u1, t, h, x, flag)

Исходные данные:

u1 - входное воздействие,

t - вектор времени моделирования.

Результаты вычислений:

y - вектор выходных переменных.

FourSu1su - em-функция Фурье-фильтрации (вычисления частотных параметров объекта (1))

Синтаксис:

[vay,vby,vau,vbu] = FourSu1su (y, om, np, rho, h, Ptau, Tfi)

Исходные данные:

y – матрица выходных воздействий с объекта,

om - вектор частот испытательного сигнала,

rho - вектор амплитуд испытательного сигнала,

h - интервал дискретности,

Ptau - время идентификации (число периодов минимальной испытательной частоты),

Tfi - задержка начала фильтрации (число периодов минимальной испытательной частоты),

Результаты вычислений:

vay,vby,vau,vbu - векторы оценок частотных параметров объекта.

Freqd2 - em-функция решения частотных уравнений идентификации

Синтаксис:

[vkd, vdd] = Freqd2 (sd, vvalf, vvbet)

Исходные данные:

vvalf ,vvbet - вектора оценок частотных параметров объекта,

Результаты вычислений:

vdd - оценка вектора коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

vkd - оценка вектора коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

Df123sdsu1 - dm-функция конечно-частотной идентификации с заданными амплитудами и частотами испытательного сигнала и самонастройкой длительности идентификации

Синтаксис:

[vkd,vdd,om,rho,Tend,x]=df123sdsu1(d,k,m,np,par, h, om, rho, epsg, Ptau, P1max, Tbegin, x, flag);

Исходные данные:

d - вектор коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

к - вектор коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

m - вектор коэффициентов при возмущении,

np - предполагаемая степень знаменателя передаточной функции объекта,

par - вектор параметров внешнего возмущения объекта (par(1) - тип возмущения: 1 - ступенька, 2 - гармоника, 3 - меандр, и т.д.),

h - интервал дискретности,

om - вектор частот испытательного сигнала,

rho - вектор амплитуд испытательного сигнала,

Ptau - время идентификации (число периодов минимальной испытательной частоты),

P1мах - максимально допустимое число интервалов самонастройки длительности идентификации

Tbegin - время (момент) начала идентификации объекта,

x - вектор состояния объекта,

flag - флаг построения графика: flag $\neq 0$ - график строить, flag = 0 - график не строить.

Результаты вычислений:

vdd - оценка вектора коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

vkd - оценка вектора коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

Tend - время (момент) окончания идентификации.

TunFoursu5 - am-функция Фурье-фильтрации с самонастройкой длительности идентификации объекта.

Синтаксис:

[valf,vbet,vkd,vdd,Tend,x] = tunFoursur5 (Ad, Bd, Cd ,Dd ,np, par, h,om ,rho, Ptau, epsg, P1max, Tbegin, x, flag)

Результаты вычислений:

valf – частотные параметры объекта,

vbet - частотные параметры объекта,

vdd - оценка вектора коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

vkd - оценка вектора коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

Tend - время (момент) окончания идентификации.

Dfl23sursad1 - dm-функция конечно-частотной идентификации с заданными оценками границ испытательных частот, с самонастройкой испытательных амплитуд и длительности идентификации.

Синтаксис:

[vkd,vdd, om, rho, Tend, x] = df123sursad1 (d, k, m, np, par, y_, u_, h, omL, M, epsg, Ptau, Pamax, P1max, Tbegin,x,flag)

Исходные данные:

d - вектор коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

к - вектор коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

m - вектор коэффициентов при возмущении,

пр - предполагаемая степень знаменателя передаточной функции объекта,

par - вектор параметров внешнего возмущения объекта (раг(1) - тип возмущения: 1 - ступенька, 2 - гармоника, 3 - меандр, и т.д.),

y_ - ограничение на выход объекта,

u_ - ограничение на вход объекта,

h - интервал дискретности,

omL - - априорные оценки нижней границы,

М - диапазона собственных частот объекта,

Ptau - время идентификации (число периодов минимальной испытательной частоты),

Рамах - максимально допустимое число интервалов самонастройки амплитуды испытательного сигнала,

P1мах - максимально допустимое число интервалов самонастройки длительности идентификации,

Tbegin - время (момент) начала идентификации объекта,

x - вектор состояния объекта,

flag - флаг построения графика: flag $\neq 0$ - график строить, flag = 0 - график не строить.

Результаты вычислений:

vdd - оценка вектора коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

vkd - оценка вектора коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

om - вектор частот испытательного сигнала,

rho - вектор амплитуд испытательного сигнала,

Tend - время (момент) окончания идентификации.

TunAmpsur1 - em-функция самонастройки амплитуд испытательного сигнала

Синтаксис:

[rho,Tend,x] = tunampsur1 (Ad,Bd,Cd,Dd,np,par,h,om,ampi,rhoi,y_,u_,Ptau,Pamax,Tbegin,x, flag)

TestOm2 - m-функция формирования испытательных частот

Синтаксис:

[om] = TestOm2 (np, omLow, omup, h)

Decren3 - m-функция деления (понижение порядка) полинома на его корни, модули которых превышают заданное число mden.

Синтаксис:

[vkd1,vdd1,vk,vd] = Decren 3 (vkd, vdd, h, mden)

Исходные данные:

vk - вектор коэффициентов полинома,

mden - заданное положительное число.

Результаты вычислений:

vkd1,vdd1 - полиномы, модули корней которого меньше числа mden.

Dfl23sfloadsu1 - dm-функция конечно-частотной идентификации с определением нижней границы собственных частот объекта (при заданном диапазоне собственных частот), самонастройкой амплитуд испытательного сигнала и длительности идентификации

Синтаксис:

[vkd,vdd,om,rho,Tend,x]=df123sfloadsu1d,k,m,np,par,y_,u_,h,inom, M, epsg, Ptau, Pamax, P1max, np1,PtauLo,PamaxLo,P1maxLo,epsomLo,P2ommax,Tbegin,x,flag)

TunFlosu - am-функция определения оценки нижней границы собственных частот объекта

Синтаксис:

[vomLo,Tend,x]=tunfLosu(Ad, Bd, Cd, Dd, np1, par, h, y_, u_, inom, PtauLo, PamaxLo, P1maxLo, epsomLo,P2ommax,Tbegin,x,flag)

Результаты вычислений:

vomLo - оценка нижней границы собственных частот объекта.

Df323su - dm-функция частотного адаптивного управления с заданными амплитудами и частотами испытательных сигналов объекта и замкнутой системы, а также с заданной длительностью их идентификации

Синтаксис:

[rd,gd,ym,um,Tend,x]=Df323su(d,k,m,np, gamp, par, h, om, rho, Ptau, Tfi, Tbegin, x, flag)

Исходные данные:

d - вектор коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

к - вектор коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

m - вектор коэффициентов при возмущении,

пр - предполагаемая степень знаменателя передаточной функции объекта,

gamp - предполагаемая степень числителя передаточной функции объекта,

par - вектор параметров внешнего возмущения объекта (раг(1) - тип возмущения: 1 - ступенька, 2 - гармоника, 3 - меандр, и т.д.),

h - интервал дискретности,

om - вектор частот испытательного сигнала,

rho - вектор амплитуд испытательного сигнала,

Ptau - время идентификации (число периодов минимальной испытательной частоты),

Tfi - задержка начала фильтрации (число периодов минимальной испытательной частоты),

Tbegin - время (момент) начала идентификации объекта,

x - вектор состояния объекта,

flag - флаг построения графика: flag $\neq 0$ - график строить, flag = 0 - график не строить.

Результаты вычислений:

gd - оценка вектора коэффициентов знаменателя передаточной функции объекта,

rd - оценка вектора коэффициентов числителя передаточной функции объекта,

ym – максимальный выход объекта,

um - максимальный выход регулятора,

Tend - время (момент) окончания идентификации.

Akord3 - am-функция синтеза регулятора

Синтаксис:

[rd, gd] = akord3 (dd, kd, q, h)

Исходные данные:

dd,kd – коэффициенты дискретной модели объекта,

q = fb / yb,

h-интервал дискретности.

Результаты вычислений:

rd, gd - коэффициенты дискретной модели регулятора.

Srez3d - em-функция определения частоты среза объекта

Синтаксис:

omsr = Srez3d (d, k, g, r, h, omin, omax, flag)

Исходные данные:

omin,omax - возможные границы диапазона частот, в котором находится частота среза.

Результаты вычислений:

omsr - частота среза системы.

FormEps1 - em-функция определения коэффициентов самосопряжённого полинома реализуемости

Синтаксис:

eps = FormEps (psi, alpha, omega)

Исходные данные:

alpha - заданное число (параметр алгоритма синтеза.

Результаты вычислений:

eps - вектор коэффициентов самосопряжённого полинома $e_1(-s)e_1(s)$ реализуемости.

Radi5 - em-функция вычисления радиуса запасов устойчивости

Синтаксис:

[ra, L] = radi5 (d, k, g, r, s)

Результаты вычислений:

ra - радиус запасов устойчивости.

AnSys2d - m-функция моделирования (решения) уравнений системы

Синтаксис:

[ym,um,Tend,x]=ansys2d(Asd,Bsd,Csd,Dsd,par,h,om,Ptaus,Tbegin,x,flag)

Df323sdsu - dm-функция частотного адаптивного управления с самонастройкой длительности адаптации при заданных амплитудах и частотах испытательных сигналов объекта

Синтаксис:

[rd,gd,ym,um,Tend,x]=df323sdsu(do,ko,mo,npo,gampo, par, h, omo, rho, epsg, Ptau, P1max, fb, yb, epsgs,Ptaus,P1maxs,Tbegin,x,flag)

Исходные данные:

epsgs - граница коэффициентов динамической корреляции,

Ptaus - начальная длительность (длительность первого интервала) идентификации,

P1maxs - максимально допустимое число интервалов самонастройки длительности идентификации объекта, замкнутого регулятором.

Df323susad - dm-функция частотного адаптивного управления с самонастройкой длительности идентификации объекта, замкнутого регулятором, и с самонастройкой амплитуд испытательного сигнала при заданных оценках границ собственных частот объекта.

Синтаксис:

[rd,gd,ym,um,Tend,x]=df323susad(do,ko,mo,npo,gampo,par, h, y_, u_, omL, M, epsg, Ptau, Pamax, P1max,fb,yb,epsgs,Ptaus,P1maxs,Tbegin,x,flag)

FormTu - m-функция формирования матриц уравнений замкнутой системы по матрицам уравнений объекта и регулятора в форме Коши

Синтаксис:

[As,Bs,Cs,Ds] = FormTu (A,B,C,D,Ac,Bc,Cc,Dc)

Исходные данные:

A, B, C, D - матрицы объекта с B=[B1 B2],

Ac, Bc, Cc, Dc - матрицы регулятора (22).

Результаты вычислений:

As, Bs, Cs, Ds - матрицы замкнутой системы

tunamps -em-функция самонастройки амплитуд испытательного сигнала объекта, замкнутого регулятором.

Синтаксис:

[rhos,Tend,x] = tunampsus (Asd,Bsd,Csd,Dsd,np,par,h,om,rho,y_,u_,Ptau,Pamaxs,Tbegin,x, flag)

Исходные данные:

rhos - начальная амплитуда.

Df323sfloadsu1 - dm-функция частотного адаптивного управления с самонастройкой длительности идентификации объекта, замкнутого регулятором, с самонастройкой амплитуд испытательных сигналов и определением оценки нижней границы собственных частот объекта.

Синтаксис:

[rd,gd,ym,um,Tend,x]=df323sfloadsu1(do,ko,mo,npo,gampo,par,h,y_,u_,inom,M,epsg,Ptau,Pamax, P1max,np1,PtauLo,PamaxLo,P1maxLo,epsomLo,P2ommax,fb,yb,epsgs,Ptaus,P1maxs,Tbegin,x,flag)

А.7 Особенности конечно-частотной идентификации и частотного адаптивного управления

К настоящему времени разработан ряд методов идентификации объектов управления, описываемых линейными дифференциальными уравнениями. Эти методы условно можно разделить на две группы в зависимости от предположений о помехах измерения и внешних возмущениях, приложенных к объекту.

Первую группу составляют методы идентификации объектов, помехи и возмущения в которых случайные процессы с известными статистическими характеристиками. Это различные варианты метода наименьших квадратов и метода стохастической аппроксимации. Их описание приводится в известных книгах /22, 23/.

Вторая группа - это методы идентификации при неизвестных ограниченных помехах и возмущениях (с неизвестными статистическими характеристиками): рандомизированные алгоритмы /24, 25/ и конечно-частотная идентификация /26/.

Процесс идентификации может быть пассивным либо активным. В случае *пассивной* идентификации измеряемым входом объекта является управление, которое зависит от целей объекта и не связано с задачей идентификации. Может случится, что при таком входе идентификация объекта невозможна. В связи с этим используется *активная* идентификация, при которой измеряемый вход объекта содержит наряду с управлением дополнительное воздействие (испытательный сигнал), предназначенное для идентификации объекта.

В рандомизированных алгоритмах испытательный сигнал - случайный процесс с известными статистическими характеристиками и поэтому трудно гарантировать заданные допуска на выходы объекта.

В методе конечно-частотной идентификации испытательный сигнал представляет собой сумму гармоник с автоматически настраиваемыми (самонастраиваемыми) амплитудами и частотами. Число этих гармоник не превышает размерность вектора состояний объекта управления. Самонастройка амплитуд осуществляется для выполнения требований к допустимым границам входа и выхода объекта, которые выполняются, когда испытательный сигнал отсутствует. Особое место занимает метод инструментальных переменных /23/, который разработан в рамках первой группы методов, однако он может использоваться для активной идентификации при неизвестных ограниченных помехах и возмущениях. В работе /27/ этот метод сравнивается с конечно-частотным и, в частности, показано, что самонастройка испытательных частот позволяет существенно уменьшить время идентификации по сравнению с методом инструментальных переменных.

В теории адаптивного управления при неизвестных ограниченных внешних возмущениях также можно выделить несколько направлений.

Первое из них связано с системами с эталонной моделью. Адаптивное управление в этих системах вначале строилось без учета внешних возмущений. Затем было показано, что эти системы могут терять устойчивость при внешних возмущениях. Это привело к появлению большого числа работ /28/ по построению алгоритмов адаптивного управления, обеспечивающих стабилизацию в этих и других следящих системах при внешних возмущениях. При этом процесс адаптации сходится к некоторой, заранее неизвестной, ошибке слежения.

Начало второго направления было положено методом рекуррентных целевых неравенств /22/. Важной особенностью этого направления является содержательность цели адаптивного управления, выраженной в форме ограничений (допусков) на отклонения установившегося выхода объекта. Это направление развивается в работах /29/. Однако, численная реализация полученных алгоритмов адаптивного управления затруднена. Это естественная цена за то, что оно обеспечивает наилучшую точность регулирования при неизвестных коэффициентах объекта и произвольном ограниченном внешнем возмущении.

В частотном адаптивном управлении /30/, как и во втором направлении, цель управления - величина установившегося выхода объекта. Внешнее возмущение - сумма бесконечного числа гармоник с неизвестными амплитудами и частотами, и ограниченной известным числом суммой амплитуд. Для идентификации объекта и замкнутой системы используется метод конечно-частотной идентификации /7/, в соответствии с которым объект или замкнутая система возбуждаются испытательным сигналом в виде суммы гармоник, число которых не превышает размерности пространства состояний объекта или замкнутой системы. Частоты испытательного сигнала не должны совпадать с частотами внешнего возмущения. Это условие проверяется в процессе идентификации, что несколько сужает класс внешних возмущений.

В описанных выше методах адаптации регулятор непрерывно перестраивается, а при частотном адаптивном управлении изменение параметров регулятора происходит через достаточно большие промежутки времени (интервалы адаптации). Это обеспечивает линейность модели системы на этих интервалах (тогда, как в других методах модель системы нелинейна и трудно найти условия, при которых в процессе адаптации значения входа и выхода объекта не принимали бы недопустимо больших значений) и поэтому не возникает трудностей численной реализации алгоритма адаптации.

Литература

1. Александров А.Г. Частотный алгоритм адаптивного управления // Межвузовский научный сборник «Аналитические методы синтеза регуляторов». – Саратов: Саратовский политехнический институт, 1984.
2. Лапин М.К. Дипломная работа «Разработка программного обеспечения и исследование адаптивного регулятора ЧАР-23», 2007
3. Трефилов П.А. Частотный адаптивный регулятор ЧАР-1. // Межвузовский научный сборник «Аналитические методы синтеза регуляторов». – Саратов: Саратовский политехнический институт, 1984.
4. Александров А.Г. Частотное адаптивное управление. ч. I, II. // АиТ. 1994. № 12. С. 93-104, АиТ. 1995. № 1. С. 117–128.
5. Сперанский К.Р. Экспериментальное исследование частотного адаптивного регулятора ЧАР-5 // Частотное управление. – М.: Московский институт стали и сплавов. Научные труды, 1994. С. 99-122.
6. Александров В.А., Орлов Ю.Ф. Проблемы реализации частотного адаптивного регулятора // Частотное управление. – М.: Московский институт стали и сплавов. Научные труды, 1994. С. 123-133.
7. Александров А.Г. Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик // Известия РАН «Теория и системы управления». 1995. №2. С. 63-67.
8. Александров А.Г., Богачев А.С. Частотный адаптивный регулятор // Материалы III международной научно-технической конференции «Микропроцессорные системы автоматики». – г. Новосибирск, 19-24 февраля 1996 г.
9. Александров А.Г. Конечно-частотная идентификация: граница частот испытательного

сигнала // АиТ. 2001. Т. 62. №11.
10. Александров А.Г. Конечная частотная идентификация: самонастройка испытательного сигнала // Сб. научных трудов «Робастное управление и частотная идентификация». – Электросталь, ЭПИ МИСиС. 2004.С 67-97.
11. Alexandrov A.G. “Finite-frequency identifacation: selftunung of test signal”. // 16th world congress of IFAC, Preprints, Praha, 2005.
12. Alexandrov A.G., Orlov Ju. F. “Frequency adaptive contrtol of multivariable plants”. // 15th world congress of IFAC, Preprints, Barcelona, 2002.
13. Щеголева К.Н. Дипломная работа «Разработка и исследование идентификатора на базе одноплатной ЭВМ», 2007
14. Лъюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991.432с.
15. Граничин О.Н., Поляк Б. Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. – М.: Наука, 2003.
16. Бунич А.Л., Бахтадзе Н.Н. Синтез и применение дискретных систем управления с идентификатором. – М.: Наука, 2003.
17. Alexandrov A.G. Finite-frequency method of identification // 10-th IFAC Sympos. Syst. Identification. Preprints. 1994. V. 2. P. 523-527.
18. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. Сравнение двух методов идентификации при неизвестных ограниченных возмущениях.//АиТ, No.10, 2005,стр.128-148.
19. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука, 1990.296с.
20. Соколов В.Ф. Адаптивное робастное управление дискретным скалярным объектом в *1* -постановке // АиТ, 1998. Т. 59. No 3. С. 107-131.
21. Alexandrov A.G. Accurate adaptive control // Proceedings of the IASTED International Conference "Automation Control and Information Technology". Novosibirsk: ACTA Press, June 10-13 2002. ISNB: 0-88986-342-3. P. 212-217.