ЭЛЕКТРОСТАЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (филиал)
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНСТИТУТА СТАЛИ И СПЛАВОВ
(Технологического университета)

А.Г. Александров, Л.С. Михайлова

ГАММА-2PC

Система программ для автоматизации разработки алгоритмов управления

Руководство пользователя

Электросталь 2005

УДК

Александров А.Г., Михайлова Л.С. ГАММА-2РС. Система программ для автоматизации разработки алгоритмов управления. Руководство пользователя. – Электросталь : ЭПИ МИСиС, 2005. – 85 с.

Приводится описание классов задач автоматического управления, решаемых с помощью системы ГАММА–2РС. Описываются правила ввода исходных данных и формы результатов решения задач синтеза алгоритмов работы регуляторов, идентификации и адаптивного управления. Описываются средства для модернизации системы и расширения класса решаемых задач. Пособие служит для освоения системы ГАММА–2РС при выполнении лабораторных работ по курсу "Теория автоматического управления"и "Системы автоматизированного проектирования систем управления", а также курсового и дипломного проектирования.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ

Назначение и функционирование системы

Система ГАММА-2PC предназначена для разработки алгоритмов управления и ориентирована на инженеров-разработчиков систем автоматического управления (САУ).

Инженер-разработчик САУ (пользователь) вводит по запросу системы: а) модель объекта управления (модель управляемого процесса) либо результаты его испытаний воздействиями, формируемыми системой для идентификации модели объекта, б) технические требования к САУ: допустимые величины ошибок управления, время регулирования и т.п.

Система работает автоматически, и результатом работы являются алгоритмы управления для САУ.

Система состоит из директив, каждая из которых имеет две части: интерфейсную и расчетную. Каждая директива решает определенный класс задач построения алгоритма управления. В системе имеется несколько групп директив: синтез регуляторов, идентификация, адаптивное управление, преобразование моделей и т.д.

ГАММА-2PC занимает промежуточное положение между отраслевыми пакетами, предназначенными для разработки алгоритмов управления в отраслях (авиации, нефтегазовых предприятиях, электроэнергетике и т.п.) и системами типа МАТЛАБ, сочетая практическую направленность отраслевых пакетов с гибкими и удобными средствами расширения системы, присущими МАТЛАБ. Для этой цели система ГАММА-2PC разделена на две части – среду пользователя и среду исследователя. *Среда пользователя* предназначена для инженера-разработчика САУ, который использует готовые директивы, а *среда исследователя* предназначена для разработки новых директив. Эта среда содержит модули, из которых исследователь формирует новые директивы, используя средства визуального программирования либо встроенный проблемно-ориентированный язык. Наличие такой среды позволяет легко адаптировать систему к потребностям инженеров-разработчиков САУ различных отраслей.

Сравнение с родственными системами

Наиболее известными и коммерчески доступными из существующих систем автоматизированного проектирования (САПР) САУ являются MATLAB [1], $MATRIX_x$ [2], KEDDC [3]. Эти системы далее будем называть исследовательскими.

Чтобы пояснить такое название и описать особенности использования этих систем, рассмотрим известное противоречие между современными методами и практикой синтеза регуляторов.

Дело в том, что качество работы любой реальной системы управления характеризуется инженерными показателями: максимум перерегулирования, установившимися ошибками по каждой регулируемой переменной, запасами по фазе и по модулю и т.д.

Эти показатели, проверяемые экспериментально, являются языком, с помощью которого формулируется техническое задание на проектирование реальных систем управления. С другой стороны, методы современной теории управления: модальное управление, АКОР, H-бесконечное субоптимальное управление исходят из показателей: значение корней характеристического полинома замкнутой системы, значение квадратичного функционала, H-бесконечной нормы матрицы замкнутой системы. Эти показатели будем называть аксиоматическими, так как они являются некими аксиомами соответствующих методов синтеза. Они, в отличие от инженерных, не могут быть проверены экспериментально.

Исследовательские САПР САУ содержат широкий набор модулей, позволяющих проектировать системы управления на основе перечисленных методов. Однако различие аксиоматических показателей и инженерных приводит к тому, что проектирование системы осуществляется по методу проб и ошибок: исследователь задает некоторые неопределенные параметры процедур синтеза (коэффициент функционала оптимизации в процедуре АКОР, изменяемые коэффициенты наблюдателя Люенбергера и т.д.), комбинирует модули синтеза и анализа и проверяет выполнение заданных допусков на инженерные показатели. Такой путь проектирования может быть реализован специалистом, хорошо знающим теорию и методы автоматического управления и в совершенстве владеющим всем арсеналом языковых и программных средств существующих САПР САУ. Такой специалист здесь и далее называется исследователем, а САПР САУ являющиеся средой его работы, – исследовательскими.

Рассмотрим трудности, которые возникают при использовании исследовательских САПР САУ инженерами-разработчиками систем управления, работающими в различных КБ и НИИ . Первая состоит в том, что такой инженер не обладает столь глубокими знаниями теории управления и методов синтеза как исследователь и ему трудно, оперируя различными методами, искать путь решения стоящей перед ним задачи синтеза. Вторая трудность состоит в затратах времени на программирование, отладку, испытание, хранение программ в средах исследовательских САПР САУ. Эта деятельность отвлекает инженера от решения его основной задачи – проектирования системы управления. Из изложенного следуют требования предъявляемые к САПР САУ для инженеров: 1. Инженер не должен участвовать в создании и организации программных средств для расчетов и построения интерфейса. Его общение с ЭВМ должно осуществляться только на языках теории управления и области техники, к которой относится объект управления, для которого синтезируется регулятор. 2. САПР САУ должна иметь специальные средства для модернизации и расширения её возможностей исследователем, который подготавливает САПР САУ для инженера.

ГАММА-2PC удовлетворяет этим требованиям.

Предшествующие системы

Первый пакет программ, который в последующем стал основой систем ГАММА, был разработан в 1968 г. на языке Алгол-60 для ЭВМ "Урал-3".

Он позволял решать задачи синтеза регуляторов минимально-фазового объекта по заданным допускам на значения установившихся ошибок.

Версия этого пакета, названная ГАММА-1 (синтез) и ГАММА-2 (анализ) для ЭВМ М-220, описана в [4]. Модернизация и расширение ее возможностей осуществлялась программистом-разработчиком ГАММА-1 и 2.

Интерактивный вариант пакета, названный ГАММА-1М, был создан в 1982 г. [5] на языке Фортран для ЭВМ серии ЕС-22. Последняя версия ГАММА-1М имела специальные средства для ее модернизации и расширения исследователем: язык для формирования различных программ из готовых модулей (подпрограмм) и средства для создания интерфейса.

Система ГАММА-1PC являлась развитием ГАММА-1М для персональных ЭВМ типа IBM PC. Первая версия была разработана в 1991 г. [6]. Она имела более удобные средства исследователя.

Последние версии системы ГАММА-1PC позволяют синтезировать регуляторы для неминимально-фазовых объектов, используя H-бесконечное субоптимальное управление и связь между варьируемыми коэффициентами уравнений Риккати H-бесконечного подхода и установившимися ошибками [7].

ГАММА1-РС демонстрировалась (либо о ней докладывалось) на различных международных конференциях, в частности: Первой Европейской конференции по автоматическому управлению, Гренобль, Франция, 1991; 12-м конгрессе ИФАК, Сидней, Австралия, 1993; Конференции по САПР систем управления, Гент, Бельгия, 1997.

Наряду с разработкой системы ГАММА-1РС, начиная с 1991 г. разрабатывается пакет программ АДАПЛАБ [8-11], предназначенный для идентификации и адаптивного управления в условиях неизвестных, ограниченных возмущений и помех с неизвестными статистическими характеристиками.

В 1998 году началась разработка системы ГАММА-2РС [12], объединяющей возможности ГАММА-1РС и АДАПЛАБ и работающей под управлением операционной системы Windows.

1 СРЕДА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ (РАЗРАБОТЧИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ)

1.1 КЛАССЫ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ

Библиотека ГАММА-2РС состоит из трех групп директив:

1. Синтез регуляторов
2. Идентификация
3. Адаптивное управление

Список директив системы ГАММА-2РС — Таблица 1

N дир.	Название директивы
1. Идентификация	
D111	Частотная идентификация объекта с низким уровнем неопределенности
D111sd	Частотная идентификация объекта с низким уровнем неопределенности
D111sad	Частотная идентификация объекта со средним уровнем неопределенности
D111sfload	Частотная идентификация объекта со средним уровнем неопределенности
D111sefad	Частотная идентификация объекта с высоким уровнем неопределенности
2. Адаптивное управление	
D311	Частотное адаптивное управление объектом с низким уровнем неопред.
D311sd	Частотное адаптивное управление объектом с низким уровнем неопред.
D311sad	Частотное адаптивное управление объектом со средним уровнем неопред.
3. Синтез регуляторов	
D411	Аналитическое конструирование регуляторов (АКоР)
D413	Оптимальная система с наблюдателем (минимально-фазовый объект)
D431	H_∞-субоптимальное управление
D441	Точное управление объектом первого вида
D442	Точное управление объектом второго вида
D443	Точное управление объектом третьего вида
D444	Точное управление объектом четвертого вида

1.2 ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

1.2.1 Технические средства, вызов и загрузка системы

Система ГАММА-2PC предназначена для работы на персональной ЭВМ типа IBM PC. Система работает под управлением ОС Windows 95/98/2000/NT. Рекомендуемое разрешение экрана – 800x600 (мелкие шрифты) и выше. Для просмотра файлов справки на компьютере должна быть установлена программа Microsof Word из пакета Microsoft Office.

Вызов и загрузка системы осуществляется запуском программы newgamma.exe. Для удобства запуска рекомендуется создать ярлык на рабочем столе или в меню "Пуск".

1.2.2 Интерфейс пользователя

Запросы системы. При запуске системы на экран выводится заставка с двумя кнопками: "пользователь"и "разработчик". Для работы с готовыми директивами следует нажать кнопку "пользователь".

Рис. 1.1. Заставка системы ГАММА-2PC.

Далее на экран выводится список доступных директив, разбитый на группы. Пользователь выбирает нужную директиву и запускает ее.

Рис. 1.2. Директивы системы ГАММА-2PC.

Ввод исходных данных После выбора директивы появляется окно ввода исходных данных.

Рис. 1.3. Пример окна ввода исходных данных.

При вводе данных необходимо придерживаться следующих правил:

а) Дифференциальные и алгебраические уравнения записываются в их естественной форме. Формат записи уравнения следующий:

```
<У> :: = <ЧсУ> = <ЧсУ> | <ЧсУ> = 0
<ЧсУ> :: [{?}],<ЧУ>| [{?}]\,<ЧУ>{?}<ЧУ>
<ЧУ> :: = [<К>],<ИД>,[<НП>],[(<НПР>)],
```

где <У> – уравнение; <ЧсУ> – часть уравнения (левая или правая); <ЧУ> – член уравнения; <К> – коэффициент (целое или вещественное число), если <К> = 1, то <К> в записи члена уравнения можно опустить; <ИД> – идентификатор (строка); <НП> – номер переменной (целое число); <НПР> – номер производной (целое число), если <НПР> = 0, то <НПР> можно не указывать. Например, j-я производная i-й компоненты вектора z записывается как zi(j). Левые и правые части уравнений разделяются символом "=", знак "+" у первых членов уравнений можно опускать в левой и правой частях.

б) Матрица записывается в виде последовательности целых или вещественных чисел по строкам, элементы одной строки отделяются друг от друга символом ",", строки отделяются символом ";".

в) Вектор записывается в виде последовательности целых или вещественных чисел, разделенных символом ";".

г) Числа записываются в соответствии с правилами: Целые числа – в их естественной форме, например, 3, 205 и т.п. Вещественные числа – в форме с фиксированной или плавающей точкой, например, 7.1264, -8.74E-3 и т.п.

Загрузка и сохранение данных. Система имеет возможность сохранения и загрузки как отдельных элементов (чисел, векторов, матриц, уравнений), так и всех исходных данных одновременно. Для сохранения отдельного элемента следует нажать на кнопку "Сохр"справа от панели ввода этого элемента и в открывшемся окне ввести имя файла. Нажав на кнопку "Загр", можно аналогичным образом загрузить данные из файла. Для сохранения и загрузки всего набора исходных данных следует воспользоваться пунктами верхнего меню "Сохранить"и "Загрузить".

Вывод результатов. Результаты работы директивы автоматически выводятся в окно протокола. Для сохранения протокола в текстовом файле, например, для последующей печати, следует нажать на пункт меню "Сохранить"и в открывшемся окне ввести имя файла.

Рис. 1.4. Пример окна протокола.

2 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ

2.1.1 Виды моделей объектов

1. Уравнения объекта, заданного в форме Коши, имеют вид

$$\dot{x} = Ax + \tilde{B}_1\tilde{w} + B_2u, \quad y = C_2x, \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$ — вектор состояний объекта; $u(t) \in R^m$ — вектор управлений; $y(t) \in R^r$ – вектор измеряемых переменных; $\tilde{w}(t) \in R^\mu$ — вектор внешних возмущений; A, B_1, B_2 и C_2 — известные матрицы чисел соответствующих размеров. Уравнения (1) можно привести к форме "вход-выход", которая имеет вид

$$T_1(s)y = T_2(s)u + T_3(s)\tilde{w}, \tag{2}$$

где полиномиальные матрицы

$$T_1(s) = \sum_{k=0}^{r} T_k^{(1)}s^k, \quad T_2(s) = \sum_{k=0}^{m} T_k^{(2)}s^k, \quad T_3(s) = \sum_{k=0}^{\mu} T_k^{(3)}s^k$$

строятся [14] на основе матриц уравнений (1).

2. Объект (1) называется минимально-фазовым (устойчивым по управлению), если корни уравнения

$$\det T_2(s) = 0 \tag{3}$$

имеют отрицательные вещественные части.

3. Для описания задачи точного управления [14, 15] рассмотрим систему управления, описываемую уравнениями

$$\dot{x} = Ax + \tilde{B}_1\tilde{w} + B_2u, \quad y = C_2x, \quad \tilde{z} = \tilde{C}_1x, \tag{4}$$

$$\dot{x}_c = A_cx_c + B_cy, \quad u = D_cx_c + C_cy, \tag{5}$$

где $z(t) \in R^{m_1}$ — вектор регулируемых переменных, $x_c(t) \in R^{n_c}$ — вектор состояний регулятора (5), A_c, B_c, D_c, C_c и $\tilde{C}_1$ — матрицы чисел соответствующих размеров.

Пусть компоненты вектора возмущений, представлены в виде

$$\tilde{w}_i(t) = \sum_{k=0}^{\rho} (\delta_{ki}^s \sin \omega_{ki} t + \delta_{ki}^c \cos \omega_{ki} t) \qquad (i = \overline{1, \mu}), \tag{6}$$

где амплитуды δ_k^s, δ_k^c и частоты ω_k $(k = \overline{0, \rho})$ — произвольные числа, но такие, что

$$|\tilde{w}_i(t)| \leq w_i^* \qquad (i = \overline{1, \mu}), \tag{7}$$

где w_i^* $(i = \overline{1, \mu})$ — заданные числа (границы внешних возмущений).

Установившиеся значения регулируемых переменных

$$\tilde{z}_{i,st} = \limsup_{t \to \infty} |\tilde{z}_i(t)| \qquad (i = \overline{1, m_1}).$$

Будем говорить, что регулятор (5) обеспечивает точное управление в установившемся режиме (или, для сокращения, точное управление), если

$$\tilde{z}_{i,st} \leq \tilde{z}_i^* \qquad (i = \overline{1, m_1}), \tag{8}$$

где z_i^* $(i = \overline{1, m_1})$ — заданные числа.

4. Объект первого вида описывается уравнениями

$$\dot{x} = Ax + \tilde{B}_1(\tilde{w} + u), \quad y = x, \quad \tilde{z} = \tilde{C}_1 x, \tag{9}$$

которые совпадают с (4) при $\tilde{B}_1 = B_2$ $(\mu = m)$ и $C_2 = I_n$ (I_n — единичная матрица размеров $n \times n$).

5. Объект второго вида описывается уравнениями (4) если:

а) $$y = \tilde{z} \quad (C_1 = C_2); \tag{10}$$

б) полином $\det T_2(s)$ — гурвицев (корни уравнения (3) имеют отрицательные вещественные части).

6. Объект третьего вида описывается уравнениями

$$\dot{x} = Ax + \tilde{B}_1 \tilde{w} + B_2 u, \quad y = x, \quad \tilde{z} = \tilde{C}_1 x.$$

Это более общий вид, чем первый ($\tilde{B}_1 \neq B_2$).

7. Объект четвертого вида описывается уравнениями (4) при условии (10). Это более общий вид, чем второй (отсутствуют ограничения на корни $\det T_2(s)$).

8. Модель объекта в форме Лагранжа имеет вид

$$\sum_{i=0}^{\gamma_1} Q^{(i)} s^i q = \sum_{j=0}^{\gamma_2} M^{(j)} s^j u + \sum_{k=0}^{\gamma_3} L^{(k)} s^k w, \tag{11}$$

$$y = \bar{D} q, \tag{12}$$

где $q(t) \in R^{n_1}$ — вектор промежуточных переменных, $Q^{(i)}$, $M^{(j)}$, $L^{(k)}$, $\bar{D}$ ($i = \overline{0, \gamma_1}$; $j = \overline{0, \gamma_2}$; $k = \overline{0, \gamma_3}$) — заданные матрицы чисел соответствующих размеров.

2.1.2 Аналитическое конструирование регуляторов (директива D411)

Пусть имеется полностью управляемый объект, описываемый уравнением

$$\dot{x} = Ax + B_2 u. \tag{13}$$

Требуется найти матрицу D_c регулятора

$$u = D_c x \tag{14}$$

такую, чтобы на движениях системы (13), (14) при произвольных начальных отклонениях $x(t_0)$ минимизировался функционал

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T u) dt \tag{15}$$

с заданной матрицей $Q \geq 0$.

Решение этой задачи состоит в нахождении матрицы $P > 0$, удовлетворяющей алгебраическому уравнению Риккати

$$AP + P^T A - P B_2^T B_2 P = -Q \tag{16}$$

и вычислению искомой матрицы

$$D_c = -B^T P \tag{17}$$

Часто функционал (15) задается в форме

$$J = \int_0^\infty (\tilde{z}^T Q^{(0)} \tilde{z} + u^T u) dt, \quad Q^{(0)} > 0, \tag{18}$$

где $Q^{(0)}$ — заданная положительно определенная матрица. В этом случае в функционале (15)

$$Q = \tilde{C}_1^T Q^{(0)} \tilde{C}_1 \tag{19}$$

Рассмотрим функционал более общей структуры, чем (18), содержащий производные управлений

$$J = \int\limits_0^\infty (\tilde{z}^T Q^{(0)} \tilde{z} + \sum_{i=0}^{\psi} u^{(i)^T} M_i^T M_i u^{(i)}) dt, \tag{20}$$

где $M_i \quad (i = \overline{0, \psi})$ — заданная матрица ($M_0 = I_m$). Решение задачи АКоР для функционала (20) имеет вид:

$$\sum_{i=0}^{\psi} C_i u^{(i)} = \bar{D}_c x, \tag{21}$$

где C_i, $\bar{D}_c \quad (i = \overline{0, \psi})$ — матрицы чисел, которые являются решением специально построенных уравнений, аналогичных уравнениям (16), (17).

Директива D411 имеет следующую структуру:

```
<D411>=<интерфейс><расчетная часть><протокол>,
<интерфейс>=<исходные данные>
               <преобразование исходных данных>,
<исходные данные>=<Дифференциальные уравнения
объекта управления в форме Коши (1)><Матрица
при регулируемых переменных><Матрица Q
функционала (18)><Амплитуды ступенчатых внешних
возмущений><Время моделирования>.
```

Расчётная часть директивы D411 имеет структуру:

```
<расчетная часть>=<m017a><m010a><m0211a><m0212><Masp>.
```

2.1.3 H_∞-субоптимальное управление (директива D431)

Модель системы в пространстве состояний. Рассмотрим стационарную систему управления, описываемую уравнениями

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u, \quad z = C_1 x + D_{12} u, \quad y = C_2 x + D_{21} w, \tag{22}$$

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c y, \quad u = C_c x_c + D_c y. \tag{23}$$

Второе из этих уравнений совпадает с (5), а первое отличается от (4) слагаемыми $D_{12}u$ и $D_{21}w$, где $w = [\tilde{w}, \eta]^T$, $\eta(t) \in R^r$ — вектор помех измерения, D_{12} и D_{21} —

матрицы чисел соответствующих размерностей. Эти матрицы должны обладать следующими свойствами

$$D_{12}^T[C_1, D_{12}] = [0, I_m] \tag{24}$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ D_{21} \end{bmatrix} D_{21}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ I_r \end{bmatrix} \tag{25}$$

(I_m и I_r — единичные матрицы размеров $m \times m$ и $r \times r$ соответственно). Чтобы удовлетворить требование (24), сформируем вектор z как

$$z = \begin{bmatrix} \tilde{z} \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_1 \\ 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} u$$

и тогда матрицы

$$C_1 = \begin{bmatrix} \tilde{C}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix}$$

удовлетворяют (24).

Условие (25) выполняется, так как

$$B_1 = [\tilde{B}_1, 0], \quad D_{21} = [0, I_r]$$

Вектор z связан с вектором внешних возмущений соотношением

$$z = H(s)w, \tag{26}$$

Задача H_∞ оптимизации. H_∞ норма устойчивой действительной матрицы $H(s)$ — это число

$$\|H(s)\|_\infty = \sup_{0 \le \omega \le \infty} \bar{\sigma}[H(j\omega)], \tag{27}$$

где $\bar{\sigma}[H(j\omega)]$ — наибольшее сингулярное значение матрицы $H(j\omega)$, вычисляемое как

$$\bar{\sigma}[H(j\omega)] = \max_i \{\lambda_i^{1/2}[H^T(-j\omega)H(j\omega)]\}, \tag{28}$$

где $\lambda_i[M]$ — i-тое собственное значение матрицы M.

Задача 1(*задача* H_∞ *–субоптимального управления) [16] . Найти регулятор (23) такой, чтобы выполнялось следующее условие*

$$\|H(s)\|_\infty \le \gamma, \tag{29}$$

где γ *— заданное положительное число и*

$$\gamma > \gamma_0 = \min_{K(s)} \|H(s)\|_\infty. \tag{30}$$

Алгоритм решения задачи H_∞-субоптимального управления. H_∞ субоптимальный регулятор находится на основе следующего [16] алгоритма 1.

1) Задать некоторое значение $\gamma > 0$.

2) Решить два уравнения Риккати

$$A^T P + PA + \gamma^{-2} P B_1 B_1^T P - P B_2 B_2^T P = -C_1^T C_1, \tag{31}$$

$$AR + RA^T + \gamma^{-2} R C_1^T C_1 R - R C_2^T C_2 R = -B_1 B_1^T, \tag{32}$$

и найти $P \geq 0$ и $R \geq 0$. Если такие матрицы не существуют, увеличив γ, вернуться к 2.

3) Проверить, что матрицы P и R неотрицательно-определенные и $|\lambda_i[PR]| < \gamma^2$ $(i = \overline{1,n})$, если это условие нарушается, вернуться к 2, увеличив γ, если выполняется, вернуться к 2, уменьшив γ.

4) Сформировать матрицы регулятора (23)

$$\begin{gathered} A_c = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T P - (I - \gamma^{-2} RP)^{-1} R C_2^T C_2, \\ B_c = (I - \gamma^{-2} RP)^{-1} R C_2^T, \quad C_c = -B_2^T P, \quad D_c = 0. \end{gathered} \tag{33}$$

Примечание 1. *Если все компоненты вектора состояний объекта управления (22) измеряются ($y = x$), тогда решается только уравнение Риккати (31), и регулятор (23) имеет вид*

$$u = D_c x, \quad D_c = -B_2^T P. \tag{34}$$

Уравнения (31), (32) решаются на основе вычисления собственных чисел гамильтониановых матриц

$$H_\infty = \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ -{}_1^T C_1 & -A^T \end{bmatrix} \tag{35}$$

$$J_\infty = \begin{bmatrix} A^T & \gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2 \\ -B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix} \tag{36}$$

Для решения уравнения (16) используется матрица (35) при $\gamma \to \infty$.

Директива имеет следующую структуру:

<D431>$=$<интерфейс><расчетная часть><протокол>,
<интерфейс>$=$<исходные данные>
<преобразование исходных данных>,
<исходные данные>$=$<Дифференциальные уравнения объекта управления в форме Коши (1)><Матрица при регулируемых переменных><Матрица при измеряемых переменных><Значение коэффициента γ (30) ><Амплитуды ступенчатых внешних возмущений><Время моделирования>.

Расчётная часть директивы D431 имеет структуру:

<расчетная часть>$=$<m017a><m017b><m017c><m017d>
<m010c><m010b> <m0211c> <m0212> <m0211d> <m036>
<m039a><Masp>.

2.1.4 Точное управление (директивы D413, D441, D442, D443, D444)

Задача точного управления. Заменим требования (8) к установившимся ошибкам системы (22), (23) неравенством

$$\tilde{z}_{st}^T Q^{(0)} \tilde{z}_{st} \leq \eta^2, \tag{37}$$

где

$$Q^{(0)} = \mathrm{diag}\Big[(z_1^*)^{-2}, \ldots, (z_{m_1}^*)^{-2}\Big], \quad \tilde{z}_{st} = [\tilde{z}_{1,st}, \ldots, \tilde{z}_{m_1,st}]^T. \tag{38}$$

При $\eta = 1$ условие (37) достаточно для выполнения требований (8).

Обозначим

$$J(\bar{\omega}, \bar{\delta}) = \tilde{z}_{st}^T Q^{(0)} \tilde{z}_{st}, \tag{39}$$

где

$$\bar{\omega} = [w_1, \ldots, w_\rho]^T, \quad \bar{\delta} = [\bar{\delta}^{(1)^T}, \ldots, \bar{\delta}^{(\rho)^T}]^T, \tag{40}$$

$$\bar{\delta}^{(k)} = [\delta_1^{(k)}, \ldots, \delta_\mu^{(k)}]^T, \quad (k = \overline{1, \rho_1}),$$

$$\delta_i^{(k)} = \sqrt{|\delta_i^{s,k}|^2 + |\delta_i^{c,k}|^2} \quad (\ (i = \overline{1, \mu}), \quad (k = \overline{1, \rho_1})).$$

Будем говорить, что $\bar{\delta} \in \Delta$ и $\bar{\omega} \in \Omega$, если выполняются ограничения (7). Значение

$$J = \sup_{\bar{\omega} \in \Omega} \sup_{\bar{\delta} \in \Delta} J(\bar{\omega}, \bar{\delta}) \tag{41}$$

называется показателем установившейся точности.

Задача 2.*(задача точного управления установившимся состоянием). Найти регулятор (5) такой, чтобы ошибка системы (4), (5) удовлетворяла неравенству*

$$J \leq \eta^2 \tag{42}$$

для $\eta = 1$. *Если такого регулятора не существует, то найти регулятор и допуск* η^2, *для которых выполняется условие (37).*

Объект первого вида (Директива D441). Рассмотрим объект управления, описываемый уравнениями (9).

Пусть этот объект, возбужденный одночастотным внешним возмущением $\tilde{w}$, замкнут регулятором (обратная связь по состоянию)

$$u = D_c^* x, \tag{43}$$

в котором матрица D_c^* определяется как

$$D_c^* = -B_2^T P^*, \tag{44}$$

где P^* — положительно определенная матрица, удовлетворяющая уравнению Риккати

$$A^T P^* + P^* A - P^* B_2 B_2^T P^* = -\alpha^2 \tilde{C}_1^T \tilde{Q}^{(0)} \tilde{C}_1. \tag{45}$$

Если коэффициент α уравнения Риккати (45) выбирается из неравенства

$$\alpha^2 \geq \sum_{i=1}^{\mu} {w_i^*}^2, \tag{46}$$

тогда регулятор (43) обеспечивает [14] выполнение требований (42) для $\eta = 1$ к точности системы (9), (43).

Директива D441 имеет следующую структуру:

<D441>=<интерфейс><расчетная часть><протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные>

<преобразование исходных данных>,

<исходные данные>=<Дифференциальные уравнения объекта управления в форме Лагранжа (11)><Матрица при регулируемых переменных><Амплитуды ступенчатых внешних возмущений><Вектор допустимых установившихся ошибок><Время моделирования>.

Расчётная часть директивы D441 имеет структуру:

<расчетная часть>="<m102a><m017a><m034><m010a>

<m0211a> <m0212><Masp>.

Способы преобразования уравнений

Объект второго вида (Директивы D413 и D442). Рассмотрим два пути преобразования уравнения (2) к форме (9) объекта управления первого вида.

Первый способ состоит в использовании "условных" векторов управлений и возмущений

$$\bar{u} = T_2^{-1}(0)T_2(s)u, \quad \bar{w} = T_2^{-1}(0)T_3(s)\tilde{w}. \tag{47}$$

Тогда уравнение (2) принимает вид

$$T_1(s)y = T_2(0)(\bar{u} + \bar{w}). \tag{48}$$

Это уравнение легко преобразуется в форму

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}_2(\bar{u} + \bar{w}), \quad \tilde{z} = y = \bar{C}_1\bar{x}, \tag{49}$$

где $\bar{x}$ — полностью измеряемый вектор, который выражается через вектор y следующим образом

$$\bar{x} = \Gamma(s)y, \tag{50}$$

где $\Gamma(s)$ — полиномиальная матрица.

Второй способ базируется на использовании вектора $\bar{\bar{w}}$, который является решением следующего уравнения

$$T_2(s)\bar{\bar{w}} = T_3(s)w \tag{51}$$

Тогда уравнение (2) представляется в форме $T_1(s)y = T_2(s)(u+\bar{\bar{w}})$, которую можно преобразовать следующим образом

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + B_2(\bar{u}+\bar{w}), \quad \bar{\bar{z}} = \bar{\bar{y}} = \bar{\bar{C}}_1\bar{\bar{x}}. \tag{52}$$

Методы синтеза

Первый метод (директива D442). Для того, чтобы использовать процедуру раздела 2.1.4, необходимо найти границы $\bar{w}_i^*$ "внешних возмущений" $\bar{w}$. Эти границы могут быть вычислены на основе (47) при одночастотном возмущении следующим образом

$$\bar{w}_i^* = \sup_{0\le\omega\le\infty}\left|[T_2^{-1}(0)T_3(j\omega)\delta]_{(i)}\right| \quad (i=\overline{1,m}) \tag{53}$$

После замены в неравенстве (46) w_i^* на $\bar{w}_i^*$ $(i=\overline{1,m})$ решается уравнение Риккати (45) при $A=\bar{A}$, $B_2=\bar{B}_2$, $C_1=\bar{C}_1$ и находится

$$\bar{u} = \bar{D}_c\bar{x}. \tag{54}$$

Уравнение регулятора в форме "вход-выход" следует из (54), если принять во внимание выражения (47) и (50) для $\bar{u}$ и $\bar{x}$,

$$G(s)u = R(s)y, \tag{55}$$

где полиномиальные матрицы

$$G(s) = T_2^{-1}(0)T_2(s), \quad R(s) = \bar{D}_c\Gamma(s). \tag{56}$$

Преобразование уравнения (55) к форме (23) дает искомый регулятор.

Однако может случиться, что уравнение (55) не преобразуется к форме (23). Например, если $r=m=1$ и степень полинома $R(s)$ больше степени полинома $G(s)$.

В таком случае уравнение Риккати (45) изменяется следующим образом. Вспоминая, что уравнение Риккати (45) дает решение задачи о минимуме функционала

$$J = \int_0^\infty[\alpha^2 y^T Q^{(0)} y + u^T u]dt, \quad \tilde{z} = y \tag{57}$$

при $w = 0$.

Если функционал (57) заменить на

$$J_\varepsilon = \int_0^\infty [\alpha^2 y^T Q^{(0)} y + u^T u + \varepsilon_1 \dot{u}^T \dot{u} + \ldots + \varepsilon_k u^{(k)^T} u^{(k)}] dt, \tag{58}$$

где $\varepsilon_i \quad (i = \overline{1,k})$ — положительные достаточно малые числа, тогда полиномиальная матрица $G(s)$ имеет структуру

$$\tilde{G}(s) = T(s) T_2^{-1}(0) T_2(s), \tag{59}$$

где $T(s)$ — полиномиальная матрица степени k, которая может быть всегда выбрана из условий преобразования (55) к форме (23).

Коэффициенты матрицы $T(s)$ исчезают вместе с $\varepsilon_i \quad (i = \overline{1,k})$, так же как коэффициенты матрицы $\bar{R}(s)$, входящей в матрицу $\tilde{R}(s) = R(s) + \bar{R}(s)$.

Регулятор, полученный таким способом

$$\tilde{G}(s) u = \tilde{R}(s) y, \tag{60}$$

близок к регулятору (55) на интервале частот $[0, \omega^*]$, где ω^* зависит от $\varepsilon_i \quad (i = \overline{0,k})$ и он стремится к бесконечности, если $\varepsilon_i \quad (i = \overline{1,k})$ стремится к нулю.

Второй метод (директива D413) опирается на уравнение (51). Границы внешнего возмущения $\bar{\bar{w}}(t)$ определяются для одночастотного случая как

$$\bar{\bar{w}}_i^* = \sup_{0 \le \omega \le \infty} [T_2^{-1}(j\omega) T_3(j\omega) \bar{\delta}]_i, \qquad (i = \overline{1,\mu}), \tag{61}$$

Регулятор (23) описывается в этом случае уравнениями

$$\dot{\hat{x}} = \bar{\bar{A}} \hat{x} + \bar{\bar{B}}_2 \bar{\bar{u}} + K_f (\bar{\bar{y}} - \bar{\bar{C}}_2 \hat{x}), \tag{62}$$

$$\bar{\bar{u}} = C_c \hat{x}, \tag{63}$$

где (62) — уравнение наблюдателя, которое может быть переписано как (23), где

$$A_c = \bar{\bar{A}} + \bar{\bar{B}}_2 C_c - K_f \bar{\bar{C}}_2, \quad B_c = K_f, \quad D_c = 0. \tag{64}$$

Неизвестные матрицы K_f и C_c регулятора (62), (63) определяются как

$$C_c = -B_2^T \bar{\bar{P}}, \quad K_f(\rho) = R(\rho) C_2^T, \tag{65}$$

где $\bar{\bar{P}}$ и $R(\rho)$ – положительно определенные матрицы решения уравнений Риккати

$$\bar{\bar{A}}^T \bar{\bar{P}} + \bar{\bar{P}}\bar{\bar{A}} - \bar{\bar{P}}\bar{\bar{B}}_2\bar{\bar{B}}_2^T\bar{\bar{P}} = -\alpha^2 \bar{\bar{C}}_2^T \tilde{Q}^{(0)} \bar{\bar{C}}_2, \tag{66}$$

$$\bar{\bar{A}}R(\rho) + R(\rho)\bar{\bar{A}}^T - R(\rho)\bar{\bar{C}}_2^T\bar{\bar{C}}_2R(\rho) = -Q - \rho^2\bar{\bar{B}}_2 W \bar{\bar{B}}_2^T. \tag{67}$$

Здесь W и Q — положительная и неотрицательно определенная квадратные матрицы соответственно, ρ — некоторое число. Если параметр α уравнения Риккати (66) выбирать из неравенства (46) $\Big($где w_i^* заменяется на $\bar{\bar{w}}_i^*$ $\quad (i = \overline{1,m})\Big)$ и ρ^2 в (67) — достаточно большое число $(\rho \to \infty)$ [17], тогда регулятор (23) с коэффициентами (64), (65) решает задачу точного управления. Наблюдатель (62), в котором матрица K_f определяется на основе уравнения Риккати (67) будем называть наблюдателем К-Д (Калман–Дойл)

Директива D413 имеет следующую структуру:

```
<D413>=<интерфейс><расчетная часть><протокол>,
<интерфейс>=<исходные данные>
            <преобразование исходных данных>,
<исходные данные>=<Дифференциальные уравнения
объекта управления в форме Коши (1)><Матрица
при регулируемых переменных><Матрица Q
функционала оптимизации><Значение коэффициента
Дойла ><Амплитуды ступенчатых внешних
возмущений><Время моделирования>.
```

Расчётная часть директивы D413 имеет структуру:

```
<расчетная часть>=<m017a><m017c><m010e><m010b>
<m0211c> <m0212> <m0211d> <m0212> <m040><Masp>.
```

Директива D442 имеет следующую структуру:

```
<D442>=<интерфейс><расчетная часть><протокол>,
<интерфейс>=<исходные данные>
            <преобразование исходных данных>,
<исходные данные>=<Дифференциальные уравнения
объекта управления в форме Лагранжа (11)><Матрица
при регулируемых переменных><Амплитуды
ступенчатых внешних возмущений><Вектор
допустимых установившихся ошибок>.
```

Расчётная часть директивы D442 имеет структуру:

```
<расчетная часть>="<m102a><m017a><m017b><m017c><m017d>
<m010c><m010b> <m0211c> <m0212> <m0211d> <m036>
<m039a><Masp>.
```

Объект третьего вида (директива D443). **Определение 1.** *Объектом третьего вида называется объект, описываемый уравнениями*

$$\dot{x} = Ax + B_1\tilde{w} + B_2u, \quad \tilde{z} = \tilde{C}_1x, \quad y = x. \tag{68}$$

Он отличается от объекта первого вида неравенством

$$B_1 \neq B_2 \tag{69}$$

Для объекта (68) может не существовать управления $u = D_cx$, решающего задачу точного управления. Однако есть два частных случая, когда такое решение существует. Первый случай: существует число γ^2, такое, что матрица

$$B_3B_3^T = B_2B_2^T - \gamma^{-2}B_1B_1^T \geq 0 \tag{70}$$

при этом пара (B_3, A) — стабилизируема (неравенство (70) означает, что $B_3B_3^T$ — неотрицательно определенная матрица).

В этом случае находим минимальное $\gamma^2 = \gamma_2^2$, при котором выполняется неравенство (70), и решаем при $\gamma^2 = \gamma_2^2$ следующее уравнение Риккати

$$A^TP + PA + \gamma^{-2}PB_1B_1^TP - PB_2B_2^TP = -\alpha^2C_1^T\tilde{Q}^{(0)}C_1, \tag{71}$$

которое при $\tilde{Q}^{(0)} = I_m$ и $\alpha = 1$ совпадает с уравнением (31).

Параметр α в уравнении (71) должен удовлетворять условию

$$\alpha^2 = \rho\gamma_2^2 \sum_{i=1}^{m} (w_i^*)^2 \tag{72}$$

<u>Второй случай:</u> полином $\det \tilde{T}_2(s)$ — гурвицев, где $\tilde{T}_2(s)$ — матричный полином уравнения объекта (68) в форме "вход-выход", если $\tilde{z}$ — выход

$$\tilde{T}_1(s)\tilde{z} = \tilde{T}_2(s)u + \tilde{T}_3(s)\tilde{w} \tag{73}$$

В этом случае решим задачу 1 для объектов второго вида $y = \tilde{z}$ и получим регулятор

$$G(s)u = R(s)\tilde{z} \tag{74}$$

Приводим его к форме Коши и полагаем $\tilde{z} = C_1 x$.

Объекты третьего вида (общий случай)

В этом случае число α, входящее в (71), неизвестно, и поэтому используется следующий алгоритм: изменить α и находить минимальное значение $\gamma^2(\alpha)$ (при котором решение уравнения (71) $P > 0$) до получения чисел α_0 и ν^2 таких, что

$$\nu^2 = \frac{\gamma_{min}^2(\alpha_0)}{\alpha_0^2} = \min_{\alpha} \frac{\gamma_{min}^2(\alpha)}{\alpha^2} \tag{75}$$

Искомое в задаче точного управления число

$$\eta^2 = \nu^2 \sum_{i=1}^{\mu} w_i^{*2} \tag{76}$$

Директива D443 имеет следующую структуру:

```
<D443>=<интерфейс><расчетная часть><протокол>,
<интерфейс>=<исходные данные>
            <преобразование исходных данных>,
<исходные данные>=<Дифференциальные уравнения
объекта управления в форме Лагранжа (11)><Матрица
при регулируемых переменных><Матрица Q0
функционала оптимизации><Значение коэффициента
alpha><Амплитуды ступенчатых внешних
возмущений><Вектор допустимых установившихся
ошибок><Время моделирования >.
```

Расчётная часть директивы D443 имеет структуру:

```
<расчетная часть>="<m102a><m017a><m017b><m017c>
<m017d><m010e> <m0211a> <m0212><m0331> <m0211c>
<m0212><m036> <Masp>.
```

Объекты четвертого вида (директива D444). **Определение 2.** *Объектом четвертого вида называется объект (1), который может быть неминимально-фазовым (нарушается условие (в) определения 2).*

Чтобы решить задачу точного управления для такого объекта, используем уравнения

$$A^T P + PA + \gamma^{-2}\beta^2 PB_1\tilde{Q}^{(1)}B_1^T P - PB_2B_2^T P = -\alpha^2 C_1^T\tilde{Q}^{(0)}C_1, \tag{77}$$

$$AR + RA^T + \gamma^{-2}\alpha^2 RC_1^T\tilde{Q}^{(0)}C_1R - RC_2^T C_2 R = -\beta^2 B_1\tilde{Q}^{(1)}B_1^T, \tag{78}$$

где $\tilde{Q}^{(1)} = \mathrm{diag}[\tilde{q}_{11}^{(1)}, \ldots, \tilde{q}_{mm}^{(1)}]$, $\tilde{q}_{11}^{(1)} \geq 0$, β — некоторое число, пара $(B_1\tilde{L}^{(1)}, A)$ — стабилизируема, где $\tilde{L}^{(1)} = \mathrm{diag}\left[\sqrt{\tilde{q}_{11}^{(1)}}, \ldots, \sqrt{\tilde{q}_{mm}^{(1)}}\right]$ $(\tilde{L}^{(1)^T}\tilde{L}^{(1)} = \tilde{Q}^{(1)})$.

Эти уравнения совпадают с уравнениями (31) и (32) при $\alpha = \beta = 1$, $\tilde{Q}^{(0)} = I$, $\tilde{Q}^{(1)} = I$, $C_1 = C_2$.

Выражения для матриц регулятора (23) имеют вид

$$\begin{gathered} A_c = A + \gamma^{-2}\beta^2 B_1\tilde{Q}^{(1)}B_1^T P - B_2B_2^T P - (I - \gamma^{-2}RP)^{-1}RC_2^T C_2, \\ B_c = (I - \gamma^{-2}RP)^{-1}RC_2^T, \quad C_c = -B_2^T P, \quad D_c = 0. \end{gathered} \tag{79}$$

Уравнение (78) совпадает при $B_1 = B_2$ с уравнением (67), используемом для построения наблюдателя во втором методе синтеза регуляторов. Поэтому, если объект (1) — минимально-фазовый и приведен к форме (52), то при $\gamma \to \infty$ и достаточно больших β^2 в уравнениях (77) и (78) регулятор (23) с коэффициентами (79) дает решение задачи, если α удовлетворяет неравенству (46) при $w_i^* = \bar{w}_i^*$ $(i = \overline{1, \mu})$.

Число ν в выражении (76) находится аналогично изложенному в разделе 5.3.4

$$\nu^2 = \min_{\substack{0 \leq \alpha \leq \infty \\ 0 \leq \beta \leq \infty}} \frac{\gamma_{min}^2(\alpha, \beta)}{\alpha^2}. \tag{80}$$

Директива D444 имеет следующую структуру:

<D444>=<интерфейс><расчетная часть><протокол>,
<интерфейс>=<исходные данные>
<преобразование исходных данных>,
<исходные данные>=<Дифференциальные уравнения объекта управления в форме Лагранжа (11)><Матрица при регулируемых переменных><Матрица при измеряемых переменных><Матрица Q0 функционала оптимизации ><Матрица Q1 функционала оптимизации><Значение коэффициента alpha><Значение коэффициента betta><Вектор допустимых установившихся ошибок><Время моделирования >.

Расчётная часть директивы D444 имеет структуру:

<расчетная часть>=<m102a><m017a><m017b><m017c>
<m017d><m010e><m010d> <m010a><m0212><m0211b>
<m0212> <m033><m0211e>verb«m0211f>"<m0212><m036><m037a><m037b>
<m039b><Masp>.

2.2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ

2.2.1 Постановка задачи

Рассмотрим асимптотически устойчивый объект, описываемый дифференциальным уравнением

$$y^{(n)}+d_{n-1}y^{(n-1)}+\cdots+d_1\dot{y}+d_0y=k_\gamma u^{(\gamma)}+\cdots+k_1\dot{u}+k_0u+f, \quad t\geq t_0, \tag{81}$$

где $y(t)$ – измеряемый выход; $u(t)$ – измеряемый вход, формируемый для целей идентификации и называемый *испытательным сигналом*; $f(t)$ – неизвестное ограниченное возмущение: $|f(t)|\leq f^*$, где f^* – заданное число. Коэффициенты d_i и k_j $\left(i=\overline{0,n-1},\right.$ $\left.j=\overline{0,\gamma}\right)$ – неизвестные числа ($\gamma<n$). Для простоты далее полагаем, что n – известное число.

Выход и вход объекта (81) ограничены:

$$|y(t)| \leq y_{-}, \quad |u(t)| \leq u_{-}, \quad t \geq t_0, \tag{82}$$

где y_{-} и u_{-} – заданные числа. Число y_{-} таково, что выполняется условие

$$|\bar{y}(t)| < y_{-}, \quad t \geq t_0, \tag{83}$$

в котором $\bar{y}(t)$ – «естественный» выход объекта (выход в режиме его нормальной эксплуатации), когда испытательный сигнал отсутствует ($u(t) = 0$).

Примечание 2. Понятие «естественный» выход объекта может включать в себя более общий случай, когда к объекту (81) наряду с возмущениями $f(t)$ приложен управляющий сигнал $u_{\text{prog}}(t)$. В этом случае в уравнении (81): $u(t) = u_{\text{prog}}(t) + u_{\text{test}}(t)$, где $u_{\text{test}}(t)$ – испытательный сигнал. Включая функцию $k_\gamma u_{\text{prog}}^{(\gamma)} + \cdots + k_1 \dot{u}_{\text{prog}} + k_0 u_{\text{prog}}$ в функцию $f(t)$ и опуская нижний индекс $u(t) := u_{\text{test}}(t)$, приходим к уравнению (81). Ограничения (82) и условие (83) означают, что испытательный сигнал использует лишь остаточные (остающиеся в режиме нормальной эксплуатации объекта) ресурсы $|\bar{y}(t)| - y_{-}$, определяющиеся числами y_{-} и u_{-}.

Задача идентификации состоит в нахождении оценок коэффициентов объекта (81).

2.2.2 Уровни неопределённости объекта

Запишем передаточную функцию объекта (81) в виде

$$w(s) = K \frac{\prod\limits_{k=p_1+p_2+1}^{p_1+p_2+p_3} (T_k s + 1) \prod\limits_{k=p_1+p_2+p_3+1}^{p=p_1+p_2+p_3+p_4} \left(T_k^2 s^2 + 2T_k \xi_{k-p_1-p_3} s + 1\right)}{\prod\limits_{k=1}^{p_1} (T_k s + 1) \prod\limits_{k=p_1+1}^{p_1+p_2} \left(T_k^2 s^2 + 2T_k \xi_{k-p_1} s + 1\right)},$$

где K – коэффициент передачи, T_k $\left(k = \overline{1,p}\right)$ – постоянные времени объекта, ξ_k $\left(k = \overline{1, p_2 + p_4}\right)$ – декременты затухания.

Пусть $K = K^0 + \varDelta K$, $T_k = T_k^0 + \varDelta T_k$ $\left(k = \overline{1,p}\right)$ и $\xi_k = \xi_k^0 + \varDelta \xi_k$ $\left(k = \overline{1, p_2 + p_4}\right)$, где $\varDelta K$, $\varDelta T_k$ и $\varDelta \xi_k$ – отклонения параметров объекта от известных значений K^0, T_k^0 $\left(k = \overline{1,p}\right)$ и ξ_k^0 $\left(k = \overline{1, p_2 + p_4}\right)$ – параметров предполагаемой модели.

Эти отклонения удовлетворяют неравенствам

$$\left|\frac{\varDelta K}{K^0}\right| \leq \delta^K, \quad \left|\frac{\varDelta T_k}{T_k^0}\right| \leq \delta_k^T \quad k = \overline{1,p}, \quad \left|\frac{\varDelta \xi_k}{\xi_k^0}\right| \leq \delta_k^\xi \quad k = \overline{1, p_2 + p_4},$$

в которых δ^K, δ_k^T $\left(k=\overline{1,p}\right)$ и δ_k^ξ $\left(k=\overline{1,p_2+p_4}\right)$ – положительные числа (допуска на отклонения параметров).

Три уровня значений этих допусков определяют уровни неопределённости коэффициентов объекта (81).

Первый уровень (низкий уровень неопределённости)

$$\delta^K \le 0.1, \quad \delta_k^T \le 0.1 \ \left(k=\overline{1,p}\right), \quad \delta_k^\xi \le 0.1 \ \left(k=\overline{1,p_2+p_4}\right). \tag{84}$$

Структурные параметры n, γ, p_i $\left(i=\overline{1,4}\right)$ – известны.

Второй уровень (средний уровень неопределённости)

$$\begin{gathered} 0.1 \le \delta^K \le 5, \quad 0.1 \le \delta_k^T \le 5 \ \left(k=\overline{1,p}\right), \\ 0.1 \le \delta_k^\xi \le 5 \ \left(k=\overline{1,p_2+p_4}\right). \end{gathered} \tag{85}$$

Известен структурный параметр n.

Третий уровень (высокий уровень неопределённости)

$$\delta^K \ge 5, \quad \delta_k^T \ge 5 \ \left(k=\overline{1,p}\right), \quad \delta_k^\xi \ge 5 \ \left(k=\overline{1,p_2+p_4}\right).$$

Структурные параметры n, γ, p_i $\left(i=\overline{1,4}\right)$ – неизвестны.

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

Директивы `D111` и `D111sd` предназначены для идентификации объектов с первым уровнем неопределённости, `D111sad` – для идентификации объектов второго и `D111sefad` – третьего уровня неопределённости.

2.2.3 Испытательный сигнал

Для идентификации объекта (81) используется испытательный сигнал

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

где ρ_i и ω_i $\left(i=\overline{1,n}\right)$ – его амплитуды и частоты. Амплитуды испытательного сигнала определяются ограничениями (82) на выходы и входы объекта, а его частоты должны удовлетворять условию

$$\omega_l \le \omega \le \omega_u,$$

где ω_l и ω_u – нижняя и верхняя границы собственных частот объекта. Это означает, что

$$\omega_l = \min_{1 \le k \le p} \left\{ \frac{1}{|T_k|} \right\}, \quad \omega_u = \max_{1 \le k \le p} \left\{ \frac{1}{|T_k|} \right\}.$$

Заметим, что интервал дискретности h должен удовлетворять неравенству

$$h = \frac{2\pi}{\omega_u N}, \quad N > 20.$$

2.2.4 Директива D111: Частотная идентификация

Она предназначена для идентификации объектов первого уровня неопределённости. Такая идентификация используется для диагностики режима работы объекта. Действительно, пусть имеется многорежимный объект (режимы A, B, C, ...), коэффициенты уравнения (81) которого существенно изменяются при переходе от режима к режиму. При этом в каждом режиме работы объекта его коэффициенты известны достаточно точно и выполняются неравенства (84).

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

Директива имеет следующую структуру:

<D111>=<интерфейс><Df111><протокол>, (86)

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

<исходные данные>=<коэффициенты уравнения (81)><параметры par внешнего возмущения><интервал дискретности h><амплитуды ρ_i и частоты ω_i $\left(i = \overline{1, n}\right)$ испытательного сигнала><длительность идентификации $\tau + t_F$><момент начала фильтрации t_F>. (87)

Расчётная часть директивы Df111 имеет структуру:

<Df111>=<Cauchy1><Omm><Analysis><FourSu><FrId>. (88)

Она состоит из модулей, с помощью которых выполняются содержательные для директивы операции:

Cauchy1 – преобразует уравнение (81) к форме Коши;

Omm – изменяет заданные испытательные частоты так, чтобы их периоды были кратны интервалу дискретности h;

Analysis – моделирует уравнение (81), приведённое к форме Коши.

FourSu – фильтр Фурье – находит оценки частотных параметров объекта (81), вычисляя для каждого $\rho = \rho_i$ и $\omega = \omega_i$ $\left(i = \overline{1, n}\right)$

$$\begin{aligned} \alpha(\tau) &= \frac{2}{\rho\tau} \int\limits_{t_F}^{t_F+\tau} y(t) \sin \omega(t - t_F)\, dt, \\ \beta(\tau) &= \frac{2}{\rho\tau} \int\limits_{t_F}^{t_F+\tau} y(t) \cos \omega(t - t_F)\, dt, \end{aligned} \tag{89}$$

где τ – время фильтрации (кратное h), t_F – момент начала фильтрации.

FrId1 – решение частотных уравнений идентификации.

Примечание 3. Так как собственные частоты ω_i^c $\left(i = \overline{1, p}\right)$ объекта (81) известны

$$\omega_i^c = \frac{1}{|T_i|} \quad i = \overline{1, p},$$

то можно выбирать испытательные частоты достаточно близко к собственным. В частности, n испытательных частот могут быть выбраны близкими к корням знаменателя передаточной функции объекта ($\omega_i = \omega_i^c$, $i = \overline{1, p_1 + p_2}$), используя модуль `VibFp`.

Примечание 4. 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

$$\rho_i = \frac{y_-/n}{|W(j\omega_i)|} \quad i = \overline{1, n}, \tag{90}$$

Если при этом нарушается условие

$$\sum_{i=1}^{n} \rho_i \le u_-,$$

то, определив

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

и умножив правую часть (90) на это число, найдём искомые амплитуды.

Эти операции выполняются модулем `VibAm`.

Примечание 5. Для повышения точности идентификации следует выбирать испытательные частоты кратными наименьшей испытательной частоте.

2.2.5 Директива D111sd: Частотная идентификация с самонастройкой длительности фильтрации

Директива служит для более точной идентификации (диагностики) режима работы объекта, когда различие между коэффициентами объекта (81) для различных режимов его работы не очень велико. Если длительность идентификации задаётся, как в директиве `D111`, априори, то точность идентификации может оказаться низкой, поэтому диагностика режима работы объекта будет неверной.

Для обеспечения точности идентификации необходима самонастройка длительности фильтрации (selftuning of duration of identification) – это отражено в названии директивы аббревиатурой `sd`).

Длительность идентификации определяется из условий

$$\left|\frac{\bar{\alpha}(\tau)}{\alpha(\tau)}\right| \leq \varepsilon_\alpha, \quad \left|\frac{\bar{\beta}(\tau)}{\beta(\tau)}\right| \leq \varepsilon_\beta, \quad \tau \geq \tau_l, \tag{91}$$

в которых $\bar{\alpha}(\tau)$ и $\bar{\beta}(\tau)$ – выходы фильтра Фурье (89) при $y(t) = \bar{y}(t)$, а ε_α и ε_β – заданные числа – параметры алгоритма самонастройки длительности идентификации (по умолчанию $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\beta = 10^{-3}$). При фиксированном $\tau = \tau^*$ числа

$$K_\alpha(\tau^*) = \left|\frac{\bar{\alpha}(\tau^*)}{\alpha(\tau^*)}\right| \quad \text{и} \quad K_\beta(\tau^*) = \left|\frac{\bar{\beta}(\tau^*)}{\beta(\tau^*)}\right|$$

называются *коэффициентами динамической корреляции.*

Они характеризуют связь внешнего возмущения и испытательного сигнала. Если такая связь отсутствует, то

$$\lim_{\tau\to\infty} K_\alpha(\tau) = \lim_{\tau\to\infty} K_\beta(\tau) = 0.$$

Процедура 1 (самонастройки длительности идентификации). Существо процедуры заключается в следующем:

1. Задаём начальную длительность

$$\tau_1 = p_{10}\frac{2\pi}{\omega}, \tag{92}$$

где p_{10} – параметр алгоритма самонастройки длительности – заданное число (по умолчанию $p_{10} = 3$), и прикладываем к объекту (81) испытательный сигнал

$$u(t) = \rho \sin \omega(t - t_0) \tag{93}$$

с заданными амплитудой ρ и частотой ω (например, $\rho = \rho_1$ и $\omega = \omega_1$). Выходы фильтра Фурье (89) дают числа $\alpha(\tau_1)$ и $\beta(\tau_1)$.

2. Полагаем $u(t) = 0$ и в момент времени $\tau = 2\tau_1$ получим на выходах фильтра (89) числа $\bar{\alpha}(\tau_1)$ и $\bar{\beta}(\tau_1)$.

3. Проверяем выполнение неравенств (91). Если они нарушаются, то возвращаемся к п. 1, удваиваем длительность идентификации при $u(t) \neq 0$ и $u(t) = 0$ и, составляя отношение выходов фильтра Фурье $\alpha(4\tau_1)$ и $\bar{\alpha}(6\tau_1)$, проверяем условие (91). Продолжая этот процесс, найдём искомую длительность τ_l. Длительность этого процесса может быть ограничена числом $p_{\max}$, которое определяет максимальное число описанных увеличений длительности идентификации. Число $p_{\max}$ также является параметром алгоритма самонастройки длительности (по умолчанию $p_{\max} = 10$). Эта процедура реализуется модулем `TunFour`.

Директива `D111sd` имеет структуру (86), в которой:

а) исходные данные интерфейса (87) не содержат задаваемых длительности идентификации – $\tau + \tau_F$ и момента начала фильтрации – t_F;

б) расчётная часть – `Df111sd` имеет структуру (88), где модуль `FourSu` заменен модулем `TunFour`.

Директива `D111sd` содержит параметры алгоритма самонастройки длительности идентификации: ε_α, ε_β, p_{10} и $p_{\max}$, которые уточняются (по сравнению с заданными по умолчанию) на этапе планирования эксперимента.

2.2.6 Директива D111sad: Частотная идентификация с самонастройкой длительности фильтрации и амплитуд испытательного сигнала

Значительные интервалы разброса коэффициентов объекта (81) второго уровня неопределённости не позволяют найти априори амплитуды испытательного сигнала так, чтобы выполнялись ограничения (82) выхода объекта, и поэтому необходима самонастройка амплитуд испытательных гармоник в процессе идентификации. Она выполняется модулем `TunAmp` следующим образом.

Амплитуда ρ сигнала (93) находится путём уменьшения его значения, начиная с $\rho = u_-$. Если при этом значении амплитуды не выполняется требование (82) к выходу объекта, длительность интервалов испытаний равна τ_1, которое находится из (92) (при выполнении требования (82) искомое $\rho = u_-$).

По окончании процесса настройки амплитуд, когда найдена искомая амплитуда ρ^*, модуль `TunAmp` вычисляет показатель интенсивности испытательного сигнала

$$æ = \frac{|y_{\max} - \bar{y}_{\max}|}{|y_{\max}|},$$

где

$$y_{\max} = \max_{t_F+\tau/2 \le t \le t_F+\tau} |y(t)|, \quad \bar{y}_{\max} = \max_{t_F+\tau/2 \le t \le t_F+\tau} |\bar{y}(t)|, \quad \tau = T_b.$$

Если $æ < 0.1$, то на экран выводится сообщение.

Для определения испытательных частот используются априорные оценки $\hat{\omega}_l$ и $\hat{\omega}_u$ нижней и верхней границ собственных частот объекта. Эти оценки нетрудно получить, используя (85). Используя их, испытательные частоты определяются модулем `TestOm` как

$$\omega_1 = \hat{\omega}_l, \quad \log \omega_k = \log \hat{\omega}_l + (k-1)\frac{\log \hat{\omega}_u - \log \hat{\omega}_l}{n} \quad k = \overline{2, n}.$$

Так как структурный параметр γ уравнения (81) неизвестен, то идентификация осуществляется при $\gamma = n - 1$. Это порождает дополнительные корни числителя передаточной функции объекта, если истинное значение $\gamma < n - 1$. Эти дополнительные корни по модулю, как правило, существенно больше модулей корней знаменателя передаточной функции, и поэтому с помощью модуля `Decren` постоянные времени, соответствующие дополнительным корням, опускаются (обнуляются).

Директива `D111sad` имеет следующую структуру:

<D111sad>=<интерфейс><Df111sad><протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные>

<преобразование исходных данных>,

<исходные данные>=<коэффициенты уравнения (81)><параметры par внешнего возмущения><интервал дискретности h><граница выхода – y_- и входа – u_-><оценки границ ω_l и ω_u собственных частот объекта>.

Расчётная часть директивы – `Df111sad` имеет структуру:

`<Df111sad>=<Cauchy><TestOm><TunAmp><TunFour><FrId><Decren>`.

2.2.7 Директивы D111sfload и D111sefad: Частотная идентификация с самонастройкой длительности фильтрации, амплитуд и частот испытательного сигнала

Неопределённые интервалы разброса коэффициентов объекта (81) третьего 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 модулем `TunFlo` следующим образом. Задаваясь достаточно малым числом ω_0 (которое называется начальным значением оценки нижней границы ω_l и является параметром алгоритма оценивания нижней границы), возбуждаем объект (81) гармоникой (93) при $\omega = \omega_0$ и амплитудой, определяемой с помощью модуля `TunAmp`, и вычисляем оценку:

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

где длительность τ находится модулем `TunFour`. Затем изложенное повторяется для $\omega = \omega_0/2$, и находится новая оценка $\hat{\omega}_l^{(2)}$ и т.д., до тех пор, пока не выполнится условие

$$\frac{\left|\hat{\omega}_l^{(i)} - \hat{\omega}_l^{(i-1)}\right|}{\left|\hat{\omega}_l^{(i-1)}\right|} \leq \varepsilon_{\text{flo}}, \quad i = 2, 3, \ldots, p_{\max}, \tag{94}$$

где ε_{flo} – заданное число (параметр алгоритма оценивания нижней границы).

Параметрами алгоритма оценки нижней границы собственных частот являются числа ω_0 и p_{flomax} – максимальное число интервалов, используемых в выражении (94). Эти параметры дополняются параметрами алгоритма настройки длительности, реализуемого модулем `TunFour`, так как последние могут не совпадать с одноимёнными параметрами модуля `TunFour`, используемой при идентификации. Оценка верхней границы $\hat{\omega}_u$ собственных частот объекта может быть получена косвенным либо прямым способом. В директиве `D111sfload` используется косвенный способ, который предполагает, что известна оценка $\hat{M}$ диапазона собственных частот объекта:

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

и тогда искомая граница

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

где $\hat{M}$ – параметр алгоритма оценки нижней границы (по умолчанию $\hat{M} = 100$). В директиве `D111sefad` оценка $\hat{\omega}_l$ находится прямым способом, аналогичным нахождению оценки нижней границы ω_l. Этот способ реализуется модулем `TunAmp`, структура которой совпадает со структурой модуля `TunFlo`. Параметры этого модуля ω_0, ε_{fup}, p_{fupmax}. Но теперь параметр ω_0 – достаточно большое число, которое удваивается до тех пор, пока не выполнится неравенство (94).

Модуль `TunFup` имеет следующую структуру:

<TunFup>=<TunAmp><TunFour>.

Расчётная часть директив `D111sfload` и `D111sefad` содержит модули расчетной части директивы `Df111sad`, так как после определения нижней и верхней границ собственных частот задача идентификации сводится к задаче, решаемой директивой `D111sad`. Итак,

<D111sfload>=<интерфейс><Df111sfload><протокол>,

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

<исходные данные>=<коэффициенты уравнения (81)><параметры par внешнего возмущения><интервал дискретности h><граница выхода – y_- и входа – u_->.

Расчётная часть директивы:

<Df111sfload>=<Cauchy><TunFlo><Df111sad>.

Директива `D111sefad` имеет следующую структуру:

<D111sefad>=<интерфейс><Df111sefad><протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные>

<преобразование исходных данных>,

<исходные данные>=<коэффициенты уравнения (81)><параметры par внешнего возмущения><интервал дискретности h><граница выхода – y_- и входа – u_->.

Расчётная часть директивы:

<Df111sefad>=<Cauchy><TunFup><Df111sad>.

2.3 АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

2.3.1 Постановка задачи

Адаптивное управление для объекта (81) формируется регулятором с кусочно-постоянными коэффициентами

$$\begin{gathered} g_{n-1}^{[i]} u^{(n-1)} + \cdots + g_1^{[i]} \dot{u} + g_0^{[i]} u = \\ = r_{n-1}^{[i]} (y^{(n-1)} + v_{[i]}^{(n-1)}) + \cdots + r_1^{[i]} (\dot{y} + \dot{v}_{[i]}) + r_0^{[i]} (y + v_{[i]}), \\ t_{i-1} \le t \le t_i \quad i = \overline{1, N}, \end{gathered} \tag{95}$$

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

По окончании адаптации регулятор имеет вид

$$g_{n-1} u^{(n-1)} + \cdots + g_1 \dot{u} + g_0 u = r_{n-1} y^{(n-1)} + \cdots + r_1 \dot{y} + r_0 y, \quad t \ge t_N > t_0 \tag{96}$$

и обеспечивает выполнение требования к точности регулирования

$$|y(t)| \le y^*, \quad t \ge t_N, \tag{97}$$

где y^* – заданное число. В процессе адаптации учитываются ограничения (97).

2.3.2 Общая структура директив

Интервалы адаптации регулятора (95) к регулятору (96) состоят из групп интервалов. Во время первой группы интервалов $(i = 1, N)$ объект (81) идентифицируется с помощью модулей идентификации, в зависимости от уровня неопределённости его коэффициентов. Затем с помощью модуля `AKOP` находится (по идентифицированным коэффициентам объекта) регулятор (95), при $i = N+1$ объект замыкается этим регулятором, и начинается вторая группа интервалов адаптации, в течении которой система, состоящая из объекта замкнутого регулятором, идентифицируется с помощью директив идентификации.

Используя результат идентификации системы и коэффициенты регулятора, с помощью модуля `ReCalcul` вычисляются уточнённые оценки частотных параметров объекта. Они позволяют найти новые значения оценок коэффициентов объекта, используя которые, находятся с помощью модуля `AKOP` новые значения коэффициентов регулятора и т.д., до тех пор, пока не выполнятся требования к точности (97).

При достаточно большой длительности идентификации объекта в течении первой группы интервалов можно достичь низкого уровня неопределённости замкнутой системы. Однако это означает, что в течении достаточно большого времени будет нарушаться требование (97) к точности. Чтобы сократить это время, длительность идентификации объекта уменьшается, и замкнутая система может иметь средний и высокий уровень неопределённости. Это приводит к использованию для идентификации замкнутой системы директив идентификации со средним и высоким уровнем неопределённости.

2.3.3 Модуль AKOP

Он предназначен для синтеза регуляторов путём решения задачи о минимуме функционала

$$J = \int\limits_0^\infty \left\{ qy^2 + u^2 + \varepsilon_1^2 \dot{u}^2 + \cdots + \varepsilon_\psi^2 \left[u^{(\psi)} \right]^2 \right\} dt, \tag{98}$$

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

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

Характеристический полином уравнения для экстремалей функционала (98) на связях (81) имеет вид

$$\Delta(s) = d(-s)d(s)e(-s)e(s) + qk(-s)k(s), \tag{99}$$

где $e(s)$ – заданный полином, степени $\deg e(s) = n-1$, называемый далее *полиномом реализуемости*.

С помощью модуля `Dec` находится гурвицев полином $\psi(s)$, такой, что

$$\Delta(s) = \psi(-s)\psi(s).$$

Используя модуль `Bezout`, решается тождество Безу

$$d(s)g(s) - k(s)r(s) = \psi(s), \tag{100}$$

которое даёт полиномы $g(s)$ и $r(s)$ регулятора (96).

Полином $e(s)$ служит для обеспечения условия реализуемости регулятора, получаемого из тождества Безу. Из этого условия

$$\deg g(s) \geq \deg r(s),$$

и условия $\deg r(s) = n-1$ разрешимости тождества Безу, следует, что полином $\psi(s)$ должен иметь степень

$$\deg \psi(s) \geq 2n-1,$$

и поэтому

$$\deg e(s) \geq n-1.$$

Полином $e(s)$ формируется как

$$e(s) = k_2(s)e_1(s),$$

где $k_2(s)$ – гурвицев полином, такой, что

$$k(s) = k_1(s)k_2(s),$$

где $k_1(s)$ – полином, корни которого имеют неотрицательные вещественные части.

Полином $e_1(s)$ построен следующим образом. Он является гурвицевым полиномом, определяемым с помощью модуля `Decr`, из тождества

$$e_1(-s)e_1(s) = \varepsilon_1(s^2),$$

в котором полином $\varepsilon_1(s^2) = 1 - \varepsilon_1^2 s^2 + \cdots + (-1)^{\psi_1}\varepsilon_{\psi_1}^2 s^{2\psi_1}$, $\psi_1 = n-1-\deg k_2(s)$, с помощью модуля `FormEps`, как

$$\varepsilon_i^2 = \frac{C_n^i}{\alpha^{2i}\omega^{2i}} \quad i = \overline{1,\psi_1},$$

где C_n^i – число сочетаний из n элементов по i, α – заданное число (параметр алгоритма синтеза, по умолчанию $\alpha = 10$), ω – частота среза системы (81), (96). Эта частота находится из равенства

$$\left| \frac{k(j\omega)}{d(j\omega)} \cdot \frac{\bar{d}(j\omega)}{\bar{g}(j\omega)} \right| = 1, \tag{101}$$

в котором $\bar{g}(s)$ и $\bar{r}(s)$ находятся из тождества (100), где полином $\psi(s)$ находится модулем `Srez` из тождества (99) при $e(s) = k_2(s)$ (т.е. $e_1(s) = 1$). При $k_2(s) = 1$ степени полиномов $k(s)\bar{r}(s)$ и $d(s)\bar{g}(s)$ равны и поэтому может случиться так, что не существует ω, удовлетворяющего равенству (101). Поэтому при $k_2(s) = 1$ степень полинома $\bar{r}(s)$ уменьшается путём деления этого полинома на его наибольший по модулю корень (или пару наибольших корней, если они комплексно-сопряжены). Такое уменьшение степени полинома $\bar{r}(s)$ осуществляется модулем `Decr`.

После вычисления полиномов $g(s)$ и $r(s)$ регулятора с помощью модуля `Radi` проверяется радиус r запасов устойчивости

$$r^2 = \max_{0 \le \omega \le \infty} \frac{\psi(-s)\psi(s)}{d(-s)d(s)g(-s)g(s)}.$$

Если величина $r < 0.7$, то уменьшается величина q (т.е. требуемая точность регулирования не достижима), проверяется изложенное, и так до тех пор, пока не будет найдено значение q, при котором $r \ge 0.7$.

Таким образом

`<AKOP>=<Dec><Bezout><Decr><Srez><Dec2><FormEps><Radi>`.

2.3.4 Модуль `FormTu`

Он формирует уравнение системы (81), (96) на основе уравнений объекта

$$\dot{\boldsymbol{x}} = A\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b}_1 u + \boldsymbol{b}_2 f, \quad y = \boldsymbol{c}\boldsymbol{x}, \tag{102}$$

и регулятора

$$\dot{\boldsymbol{x}}_c = A_c\boldsymbol{x}_c + \boldsymbol{b}_c(y - v), \quad u = \boldsymbol{c}_c\boldsymbol{x}_c + d_c(y - v). \tag{103}$$

Уравнение системы имеет вид

$$\dot{\boldsymbol{x}}_s = A_s\boldsymbol{x}_s + \boldsymbol{b}_{s1}v + \boldsymbol{b}_{s2}f, \qquad \begin{aligned} y_{s1} &= y = \boldsymbol{c}_{s1}\boldsymbol{x}_s + d_{s11}v + d_{s12}f, \\ y_{s2} &= u = \boldsymbol{c}_{s2}\boldsymbol{x}_s + d_{s21}v + d_{s22}f, \end{aligned} \tag{104}$$

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

Уравнения (104) решаются с помощью модуля `AnSys`.

2.3.5 Модуль ReCalcul

Позволяет найти частотные параметры объекта (81) по частотным параметрам системы (81), (96), когда регулятор (96) известен. Для этого используется очевидная связь передаточной функции $w(s) = k(s)/d(s)$ объекта с передаточной функцией $w_s(s) = \dfrac{w_c(s)w(s)}{1 + w_c(s)w(s)}$ замкнутой системы, где $w_c(s) = r(s)/g(s)$ – передаточная функция регулятора:

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

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

2.3.6 Директива D311: Частотное адаптивное управление

Она предназначена для диагностики режима работы объекта и перестройки регулятора при переходах с одного режима на другой, если режим работы объекта изменяется, когда объект замкнут регулятором.

Директива имеет структуру:

<D311>=<интерфейс><Df311><протокол>,

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

<исходные данные>=<исходные данные директивы D111><интервал дискретности замкнутой системы – h_s><амплитуды ρ_{si} и частоты ω_{si} $\left(i = \overline{1, n_s}\right)$ испытательного сигнала замкнутой системы><длительность идентификации замкнутой системы – $\tau_s + t_{sF}$><момент начала фильтрации – t_{sF}>.

Расчётная часть директивы имеет вид:

<Df311>=<Df111><AKOP><ReCalcul><FrId><AnSys>.

2.3.7 Директива D311sd: Частотное адаптивное управление с самонастройкой длительности идентификации объекта

Директива служит для более точной идентификации режима работы объекта и перестройки регулятора.

Её структура:

<D311sd>=<интерфейс><Df311sd><протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные>

<преобразование исходных данных>,

<исходные данные>=<исходные данные директивы D111sd><интервал дискретности замкнутой системы – h_s><амплитуды ρ_{si} и частоты ω_{si} $\left(i = \overline{1, n_s}\right)$ испытательного сигнала замкнутой системы>.

Расчётная часть директивы имеет вид:

<Df311sd>=<Df111sd><AKOP><ReCalcul><FrId><AnSys>.

2.3.8 Директива D311sad: Частотное адаптивное управление с самонастройкой длительности идентификации объекта и амплитуд испытательного сигнала

Директива предназначена для адаптивного управления объектом второго уровня неопределённости.

Она имеет структуру:

<D311sad>=<интерфейс><Df311sad><протокол>,

<интерфейс>=<исходные данные>

<преобразование исходных данных>,

<исходные данные>=<исходные данные директивы D111sad> <интервал дискретности замкнутой системы – h_s><оценки границ ω_{sl} и ω_{su} собственных частот замкнутой системы>.

Расчётная часть директивы имеет вид:

<Df311sad>=<Df111sad><AKOP><ReCalcul><FrId><AnSys>.

2.4 ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОСНОВНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ МОДУЛИ СИСТЕМЫ ГАММА-2PC

Модули анализа и синтеза

M080a Приведение уравнений, заданных в форме Лагранжа (11), к форме Коши (1).

M080b Приведение уравнений, заданных в форме вход-выход (2), к форме Коши (1).

M017a Анализ управляемости объекта.

M017b Анализ управляемости объекта по возмущающим воздействиям.

M017c Анализ наблюдаемости объекта по измеряемым переменным.

M017d Анализ наблюдаемости объекта по регулируемым переменным.

M028 Приведение уравнений к форме вход-выход.

M035 Анализ устойчивости объекта по управлению.

M038 Формирование условных возмущений (53).

M034 Определение параметров функционала оптимизации по значениям допустимых установившихся ошибок по формулам (38), (46).

M030 Формирование канонической модели объекта (49).

M020 Вычисление прогнозируемой обобщенной частоты среза (107).

M022 Вычисление постоянных времени дополнительных инерционных звеньев (118).

M023 Формирование объекта управления и функционала с учетом дополнительных инерционных звеньев (119).

M010a Преобразование функционала оптимизации из форму по регулируемым переменным в форму по переменным состояния (19).

M010b Формирование правой части в уравнении Риккати (31).

M010c Формирование правой части в уравнении Риккати (32).

M010e Формирование правой части в уравнении Риккати (67).

M010d Формирование правой части в уравнении Риккати (45), (66), (71), (77).

M010e Формирование правой части в уравнении Риккати (78).

M047 Определение параметров функционала оптимизации из условия реализуемости регулятора (109).

M025 Формирование матриц расширенной модели объекта и канонической формы функционала (110).

M0211a Построение матрицы Гамильтониана для задачи АКоР (уравнения Риккати (16).

M0211b Построение матрицы Гамильтониана (35) для задачи H_∞–субоптимального управления (уравнения Риккати (31).

M0211c Построение матрицы Гамильтониана (36) для задачи H_∞–субоптимального управления (уравнения Риккати (32).

M0211d Построение матрицы Гамильтониана (36) для вычисления наблюдателя К-Д (66).

M0211e Построение матрицы Гамильтониана для вычисления наблюдателя К-Д (67).

M0211f Построение матрицы Гамильтониана (77).

M0211g Построение матрицы Гамильтониана (78).

M0212 Решение уравнения Риккати методом диагонализации.

M058u Формирование матриц модели регулятора в форме вход–выход (115), (116), (117).

M058tu Формирование матриц модели регулятора в форме вход–выход с учетом дополнительных инерционных звеньев (127), (128).

M105 Моделирование системы объект-регулятор.

M33 Определение начального значения для коэффициента γ.

M36 Проверка выполнения условия $|\lambda_i[PR]| < \gamma^2$.

M039a Построение матриц К-Д регулятора (64).

M039b Построение матриц H_∞ регулятора (23).

M040 Построение матриц регулятора в форме Коши.

Masp Моделирование замкнутой системы.

Модули идентификации и адаптивного управления

Cauchy1 – построение матриц объекта в форме Коши по коэффициентам формы (81) «вход-выход».

Синтаксис:

```
Cauchy1 [d, k, m][A, B, C, D].
```

Результаты вычислений:

`A, B=[B1 B2], C, D=[D1 D2]` – матрицы объекта в форме Коши: $\dot{\boldsymbol{x}} = \mathtt{A}\cdot\boldsymbol{x} + \mathtt{B1}\cdot\boldsymbol{u} + \mathtt{B2}\cdot\boldsymbol{f}$, $\boldsymbol{y} = \mathtt{C}\cdot\boldsymbol{x} + \mathtt{D1}\cdot\boldsymbol{u} + \mathtt{D2}\cdot\boldsymbol{\eta}$.

Omm – доопределение испытательных частот так, чтобы они были кратными интервалу дискретности h.

Синтаксис:

```
omm [om, h][omh].
```

Omm1 – доопределение кратных испытательных частот так, чтобы они были кратными интервалу дискретности h.

Синтаксис:

```
omm1 [om, h][om].
```

Analysis – моделирование процессов в объекте.

Синтаксис:

```
Analysis [A, B, C, D, uf, t, x, flag][[y, x]].
```

Исходные данные:

`uf` – матрица входных воздействий [$u(t)$ и $f(t)$],

`t` – вектор времени моделирования.

Результаты вычислений:

`y` – вектор выходных переменных.

FourSu – Фурье-фильтрация (вычисления частотных параметров объекта (81).

Синтаксис:

```
FourSu [y, om, np, rho, h, pad][vvalf,vvbet].
```

Результаты вычислений:

`vvalf,vvbet` – векторы оценок частотных параметров объекта.

FrId1 – решение частотных уравнений идентификации.

Синтаксис:

`FrId1 [np, gamp, im*om, alf+im*bet][d, k].`

Исходные данные:

`alf,bet` – вектора оценок частотных параметров объекта,

`im` – мнимая единица (`im=sqrt(-1)`).

VibF – определение испытательных частот по корням знаменателя передаточной функции.

Синтаксис:

`VibF [d, h][om].`

VibAmp – определение амплитуд испытательного сигнала, удовлетворяющих ограничениям на вход и выход объекта.

Синтаксис:

`VibAmp [k, v, om, y_, u_][rho].`

Исходные данные:

`y_` – граница модуля выхода объекта,

`u_` – граница модуля входа объекта.

TunFour – Фурье-фильтрация с самонастройкой длительности идентификации.

Синтаксис:

```
TunFour [A, B, C, D, par, h, omega, rho, pa, Tbegin,x,flag]
[valf, vbet, Dfa, Dfb, Tend, x].
```

Результаты вычислений:

`Dfa`, `Dfb` – текущие значения коэффициентов K_α и K_β динамической корреляции.

TunAmp – самонастройка амплитуд испытательного сигнала.

Синтаксис:

`TunAmp [A, B, C, D,par, h, y_, u_, omega, rho, pa, Tbegin, x, flag].`

`[rho, Tend,x]`

TestOm – формирование испытательных частот.

Синтаксис:

`TestOm [np, oml, omu, h][om].`

Decren – деление (понижение порядка) полинома на его корни, превышающее заданное число " mden".

Синтаксис:

`Decren [vk, mden][vkd].`

Исходные данные:

`vk` – вектор коэффициентов полинома,

`mden` – заданное положительное число.

Результаты вычислений:

`vkd` – полином, модули корней которого меньше числа `mden`.

TunFlo – определение оценки нижней границы собственных частот объекта.

Синтаксис:

`TunFlo[A, B, C, D, par, y_, u_, h, plo, Tbegin, x, flag].`

`[omlo, Tend, x]`

Результаты вычислений:

`omlo` – оценка нижней границы собственных частот объекта.

TunFup – определение оценки верхней границы собственных частот объекта.

Синтаксис:

`TunFup [A, B, C, D, par, y_, u_, h, pup, Tbegin, x, flag]`

`[omup, Tend, x].`

Результаты вычислений:

`omup` – оценка верхней границы собственных частот объекта.

AKOP – синтез регуляторов.

Синтаксис:

`AKOP [d, k, q][g, r, ra].`

Исходные данные:

`q` – $q = f^*/y^*$.

Результаты вычислений:

`ra` – радиус запасов устойчивости системы.

dec – декомпозиция полинома.

Синтаксис:

`dec [d, k, e, q][psi].`

Исходные данные:

`e` – вектор коэффициентов полинома реализуемости.

Результаты вычислений:

`psi` – вектор коэффициентов гурвицева полинома.

Bezout – решение тождества Безу.

Синтаксис:

`Bezout [d, k, psi][g, r].`

Srez – определение частоты среза системы.

Синтаксис:

`Srez [d, k, g, r, omin, omax, flag][omega].`

Исходные данные:

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

Результаты вычислений:

`omega` – частота среза системы.

FormEps – определение коэффициентов самосопряжённого полинома реализуемости.

Синтаксис:

`FormEps [psi, alpha, omega][eps].`

Исходные данные:

`alpha` – заданное число (параметр алгоритма синтеза, `alpha` $= 10$ – по умолчанию).

Результаты вычислений:

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

Radi – вычисление радиуса запасов устойчивости.

Синтаксис:

`Radi [a, b, om][ra].`

Исходные данные:

`a` – вектор коэффициентов полинома $a(s) = d(s)g(s)$,

`b` – вектор коэффициентов полинома $b(s) = k(s)r(s)$,

`om` – вектор частот, для которых вычисляется радиус запасов устойчивости.

Результаты вычислений:

`ra` – радиус запасов устойчивости.

ReCalcul – вычисление частотных параметров объекта по частотным параметрам замкнутой системы.

Синтаксис:

`ReCalcul [vk, vd, r, g, om][alf1, bet1].`

Исходные данные:

`om` – вектор испытательных частот объекта.

Результаты вычислений:

`alf1, bet1` – векторы частотных параметров объекта.

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

Синтаксис:

`FormTu [A,B,C,D, Ac,Bc,Cc,Dc][As,Bs,Cs,Ds].`

Исходные данные:

`A, B, C, D` – матрицы объекта (102) с " B=[B1 B2]",

`Ac, Bc, Cc, Dc` – матрицы регулятора (103).

Результаты вычислений:

`As, Bs, Cs, Ds` – матрицы замкнутой системы (104) с

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

AnSys – моделирование (решение) уравнений системы.

Синтаксис:

```
ansys [A, B, C, D,par, pads, oms, Ac, Bc, Cc, Dc, hs,
x,Tbegin, flag][ym, um, Tend, x].
```

3 СИСТЕМА ГАММА-2РС ДЛЯ ИНЖЕНЕРА-ИССЛЕДОВАТЕЛЯ (РАЗРАБОТЧИКА ДИРЕКТИВ)

3.1 СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

3.1.1 Основные компоненты системы

Структурно система ГАММА-2РС состоит из следующих взаимосвязанных компонентов:

1. Библиотека модулей;
2. Графический редактор;
3. Текстовый редактор;
4. Редактор типов данных;
5. Windows-Диалог;
6. Интерпретатор структурных схем;
7. Интерпретатор языка ГАММА-1.

Библиотека модулей предназначена для хранения информации о подключенных к системе модулях. Обеспечивает возможность добавления новых модулей, модификации и удаления существующих, автономного исполнения модулей. *Графический редактор* предназначен для составления структурных схем директив из модулей, содержащихся в библиотеке, путем перетаскивания их на рабочее поле и соединения соответствующих входов и выходов. *Текстовый редактор* предназначен для ввода текста директив на проблемно-ориентированном языке ГАММА-1. *Редактор типов данных* обеспечивает возможность добавления новых типов данных и модификации и удаления существующих. *Программа Windows-Диалог* предназначена для ввода, сохранения и загрузки исходных данных директивы и для трансляции введенных данных из естественного вида во внутренний формат системы. *Интрепретатор структурных схем* обеспечивает выполнение директивы в соответствии со структурной схемой и автоматически создает протокол работы директивы. *Интерпретатор языка ГАММА-1* обеспечивает выполнение плана директивы, написанного на языке ГАММА-1.

3.1.2 Форматы хранения данных в системе

Типы данных делятся на базовые, производные и составные. Каждый тип данных определяется идентификатором типа и имеет следующие свойства:

- формат хранения данных этого типа при передаче между модулями;
- расширение файла для сохранения данных в пользовательском формате;
- название типа;
- обработчик типа.

Базовые типы данных В системе используются 5 предопределенных базовых типов данных:

- логический (log);
- число (val);
- вектор (vec);
- матрица (matr);
- полиномиальная матрица (polmatr);

Для каждого базового типа данных определен свой формат хранения при передаче данных между модулями:

логический – соответствует формату используемому для записи логической переменной в языке Фортран: T – истина, F – ложь;

число (числа) записывается в виде последовательности целых или вещественных чисел, разделенных символом переноса строки или пробелом. Пример записи чисел: 1 1.2 3.e+5;

вектор записывается в следующем формате: в первой строке количество элементов, начиная со второй строки элементы вектора – последовательность целых или вещественных чисел, разделенных символом пробела или символом переноса строки. Пример записи вектора:

3

1.2 4 5.34;

матрица – в первой строке размерности (2 целых числа, разделенных пробелом), коэффициенты по столбцам, начиная со второй строки. Пример записи матрицы:

2 2

1.2 4.5 7.3 5.01e+2.

Эта запись соотвествует матрице:

$$\begin{matrix} 1.2 & 7.3 \\ 4.5 & 5.01e+2 \end{matrix} \tag{105}$$

полиномиальная матрица – в первой строке размерности (3 целых числа, разделенных пробелом), начиная со второй строки коэффициенты по столбцам (последним меняется индекс степени). Пример записи полиномиальной матрицы:

2 2 2

1.1 5 0 5 4.4 1.0e+4 8 9

Эта запись соответствует полиномиальной матрице:

$$\begin{matrix} 4.4s+1.1 & 8s \\ 1.0e+4s+5 & 9s+5 \end{matrix} \tag{106}$$

Производные типы данных. Производный тип данных по формату хранения принадлежит к одному из базовых, но для него могут быть переопределены следующие свойства базового типа: название типа, обработчик данных и расширение файла для сохранения данных в пользовательском формате. Если какие-то из свойств для производного типа не определяются, то они наследуются из базового типа.

Составные типы данных. Составной тип данных представляет собой набор переменных базового типа, объединенных общим именем. В системе определены следующие составные типы:

- ldeqp – Дифференциальные уравнения объекта управления в форме Лагранжа. Транслируется в 3 переменные типа polmatr.
- ldeqc – Дифференциальные уравнения регулятора в форме Лагранжа. Транслируется в 3 переменные типа polmatr.
- lmvp – Уравнения измеряемых переменных объекта управления в форме Лагранжа. Транслируется в 2 переменные типа matr.

- lmv – Уравнения измеряемых переменных объекта управления в форме Лагранжа. Транслируется в 1 переменную типа matr.

- lcv – Уравнения регулируемых переменных объекта управления в форме Лагранжа. Транслируется в 1 переменную типа matr.

- lu – Уравнения управлений регулятора в форме Лагранжа. Транслируется в 3 переменные типа matr.

- cdeqp – Дифференциальные уравнения объекта управления в форме Коши. Транслируется в 3 переменные типа matr.

- cdeqc – Дифференциальные уравнения регулятора в форме Коши. Транслируется в 3 переменные типа matr.

- cmvr – Уравнения измеряемых переменных объекта управления в форме Коши. Транслируется в 3 переменные типа matr.

- ccvr – Уравнения регулируемых переменных объекта управления в форме Коши. Транслируется в 3 переменные типа matr.

- cmv – Уравнения изм. переменных объекта управления в форме Коши. Транслируется в 1 переменную типа matr.

- ccv – Уравнения регулируемых переменных объекта управления в форме Коши. Транслируется в 1 переменную типа matr.

- cu – Уравнения управлений регулятора в форме Коши. Транслируется в 3 переменные типа matr.

- vv – Дифференциальные уравнения объекта в форме "вход-выход". Транслируется в 3 переменные типа polmatr.

Передача данных между модулями. Передача данных между модулями системы осуществляется через файлы. Каждая переменная базового или производного типа во время работы системы связывается с файлом, имя которого генерируется системой. Переменная составного типа данных связывается с несколькими файлами. Имена файлов с исходными данными передаются модулю в файле input.tmp следующего формата: в первой строке указывается количество файлов с данными, далее идут имена файлов.

Пример файла input.tmp:

```
3
d.tmp
k.tmp
h.tmp
```

Имена файлов для размещения результатов работы модуля передаются в файле output.tmp. Формат файла такой же, как и input.tmp. Если модуль имеет возможность автономной работы, то в файле result.tmp ему передается имя файла для вывода протокола работы (в виде, удобном пользователю). Если модуль использует ключи, они передаются в файле key.tmp.

В процессе работы модуль должен создать файл с именем 2.gma и записать в него следующий код: 0 – успешное завершение работы, 1 – выход по ошибке.

Если такой файл не был создан, система считает, что модуль выполнялся с ошибкой.

Формат модулей системы ГАММА-2PC. Модули могут быть написаны на любом языке программирования высокого уровня и хранятся в виде исполняемых файлов. Структура модуля обычно такова:

- чтение имен файлов с входными данными из файла input.tmp;
- чтение входных данных из файлов;
- вызов подпрограммы, осуществляющей вычисления;
- чтение имен файлов с выходными данными из файла input.tmp;
- запись выходных данных в файлы;
- запись кода завершения в файл 2.gma.

Файлы настройки системы. Основной файл настроек называется newgamma.ini и находится в каталоге с системой. В нем могут быть заданы следующие параметры:

```
GAMMA = путь к каталогу системы ГАММА1-PC
DATA = путь к каталогу с данными библиотеки модулей ГАММА-2PC
DLIST = путь к каталогу с файлами-списками директив
DIR = путь к каталогу со схемами директив
PAGEWIDTH = ширина файла протокола в символах (по умолчанию - 78)
TIMEOUT = время ожидания исполнения модуля в минутах
DEBUG = режим отладки: 1 - включить, 0 - выключить.
```

Дополнительный файл настроек называется gamma.ini и находится в каталоге системы ГАММА1-PC. Он предназначен для создания файла gamma.cfg, небходимого для работы модулей из системы ГАММА1-PC. Могут быть заданы следующие параметры: EXEMOD = путь к каталогу с исполняемыми файлами модулей; SAVEDATA = путь к каталогу для сохранения и загрузки данных; TMPDATA = путь к каталогу для размещения временных файлов.

3.2 ЯЗЫКИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИРЕКТИВ СИСТЕМЫ ГАММА-2PC

Под *планом директивы* будем понимать программу действий (порядок выполнения модулей), позволяющую по известным исходным данным получить требуемый результат решения задачи. Представление планов директив в системе ГАММА-2PC возможно 1) в виде структурных схем; 2) в виде последовательности команд на специальном проблемно-ориентированном языке ГАММА-1.

3.2.1 Язык структурных схем

Структурная схема директивы содержит:

- изображение исходных данных, или интерфейсный модуль, с помощью которого формируется интерфейс директивы (окно ввода исходных данных);
- изображения модулей ЭПО;
- изображения операций вывода результатов работы модулей в протокол выполнения директивы;

Структурная схема директивы формируется исследователем в *редакторе структурных схем*. Для этого изображения необходимых модулей переносятся из окна библиотеки модулей в окно графического редактора, входы и выходы модулей соединяются в соответствии с порядком передачи данных между модулями. Порядок выполнения модулей указывается путем соединения специальных входов и выходов.

Система позволяет формировать структурные схемы директив как линейной структуры, так и содержащих логические переходы.

Между сеансами работы описание структурной схемы директивы сохраняется в текстовом файле в специальном формате.

В состав системы входит интерпретатор структурных схем. Он предназначен для выполнения заданного структурной схемой плана директивы. Выполнение плана осуществляется следующим образом:

1. по структурной схеме директивы генерируется файл, который содержит описания, имена и тип исходных данных директивы, номера исполняемых модулей, описания, имена и тип входных и выходных данных каждого модуля, указания на необходимость вывода данных в протокол;

2. по описанию исходных данных формируется форма для ввода исходных данных директивы, далее по номерам модулей в библиотеке модулей ищутся соответствующие exe-файлы и запускаются на исполнение.

3.2.2 Язык ГАММА-1

Язык ГАММА-1 содержит средства для построения интерфейсной и расчетной части директивы.

Программа на языке ГАММА-1 представляет собой последовательность предложений языка, оканчивающихся символом ";". В начале программы находятся разделы описания переменных и меток, далее – создание диалога ввода исходных данных, вызов расчетных модулей и вывод результатов расчетов.

Предложения языка ГАММА-1 имеют следующую структуру:

- **Описание меток**

```
label: имя_метки1, имя_метки2, ... ;
```

- **Описание переменных**

  ```
  var: имя_переменной1, имя_переменной2,... : тип_переменной1, ...;
  ```

- **Выполнение ЭПО**

  ```
  имя_модуля[имя_переменной1, ...][имя_переменной1, ... ];
  ```

  При исполнении предложения формируются файлы с именами входных и выходных данных, ключами, запускается на выполнение указанный модуль, проверяется нормальное завершение работы модуля.

- **Ввод исходных данных**

  ```
  loadvars[ ]['текст_запроса1', имя_переменной1 , 'текст_запроса2',
  имя_переменной2, ...];
  ```

  При исполнении предложения создается форма для ввода исходных данных директивы, содержащая поля для ввода указанных переменных. Вид поля для ввода переменной (редактор матриц, редактор дифференциальных уравнений и т.д.) определяется типом переменной. Введенные пользователем данные преобразуются во внутренний формат.

- **Вывод результатов в протокол**

  ```
  print['имя_таблицы', 'заголовок1',  имя_переменной1, 'заголовок2',
  имя_переменной2, ... ][ ];
  ```

  При исполнении предложения в протокол результатов выводятся значения указанных переменных. Формат вывода переменной в протокол (матрица, вектор, передаточная функция и т.д.) определяется ее типом.

- **Вывод сообщения на экран или в протокол**

  ```
  message['текст_сообщения', номер_устройства];
  ```

- **Безусловный переход**

```
goto имя_метки;
```

- **Условный переход**

```
ifgoto[имя_логич_переменной,имя_метки1,имя_метки2];
```

При запуске директивы на исполнение текст на языке ГАММА-1 преобразуется во внутреннее представление, каждое предложение плана распознается и исполняется.

3.3 РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ

3.3.1 Добавление новых модулей в библиотеку

Библиотека модулей системы ГАММА-2PC разбита на группы в соответствии с классификацией решаемых задач. Существует возможность добавления и изменения группы. Для этого в меню "Группы" необходимо выбрать соответствующую команду. Удалить непустую группу нельзя. Включение модулей в библиотеку ГАММА-2PC осуществляется в пределах конкретной группы выбором в меню "Модули" команды "Добавить". При выполнении этой команды на экране появляется окно описания модуля.

Рис. 3.1. Окно описания модуля.

Включение модуля подразумевает заполнение окон:

- Имя модуля – имя, которым идентифицируется модуль в окне группы. Длинное имя разделяют двойным слешем (//), в этом случае оно переносится на следующую строку.

- Номер – номер модуля в классификационном списке.

- Название – название модуля в классификационном списке.

- Ключи – ключи, если они необходимы для работы программы.

- Программа – имя exe-файла (без расширения), запуск которого осуществляет выполнение программы. Саму исполняемую программу следует поместить в каталог, заданный в файле gamma.ini параметром EXEMOD. Обычно это каталог GAMMA/MODULES/.

- Справка – имя файла справки (в формате doc или rtf) с расширением. Если файл находится не в главном каталоге программы, то указывается путь, например DOC/m010.doc. Вызов справки осуществляется выбором в меню "Модули" команды "Справка".

- Тип модуля – устанавливается мышью на соответствующее окно.

- Входы – в этом окне пишут число входов модуля, например 3, затем нажимают кнопку "Описание", после чего отображается окно описания входов.

Рис. 3.2. Окно описания входов.

Здесь: название - обозначение входа, которое будет идентифицировать вход модуля на графическом изображении. Не рекомендуется использовать более трех символов; описание - смысловое описание входа (например, "коэффициенты полинома при регулируемой переменной"); тип – обозначение типа входа, устанавливается нажатием мышью стрелки "вниз" и выбором обозначения типа. Выходы – окно описания выходов заполняется аналогично окну входов. Возможность автономной работы – устанавливается нажатием кнопки мыши. Показывает, возможен ли автономный (не в составе директивы) запуск модуля. Чтобы запустить модуль автономно, нужно в меню "Модули" выбрать команду "Выполнить".

Модули могут переноситься в другие группы. Для этого нужно нажать мышью на стрелку "вниз" у окна "Группа" и выбрать в списке групп ту, в которую должен быть перенесен модуль. Включенный модуль будет иметь свое графическое изображение.

Рис. 3.3. Пример графического изображения модуля.

3.3.2 Создание новых директив в редакторе структурных схем

Создание директивы начинается с создания входного (интерфейсного) модуля, осуществляющего ввод исходных данных в директиву. Такой модуль создается, как было описано выше, переключатель типа модуля (см. рис. 3.1) ставится в положение "входной", и описываются только выходы модуля. Директива может иметь только один входной модуль. Ввод директивы заключается в наборе структурной схемы в окне ГАММА-2PC. Структурная схема набирается из включенных ранее модулей путем соединения их выходов и входов. Набор структурной схемы осуществляется следующим образом. Модуль мышью переносится из группы, в состав которой он входит, в графический редактор системы. Далее его необходимо соединить с вынесенными ранее модулями. Нажатием кнопки мыши отмечают соединяемые вход и выход двух модулей. На экране связь отображается в виде прямой линии черного цвета. Одновременно на экране отображаются только те линии, которые связаны с выбранным в данный момент модулем, остальные линии скрываются. Выход модуля может иметь несколько связей, а вход – только одну. Допускается не задействовать выходы модулей, входы должны быть заданы все. Если вход еще не задан, он отмечен красным цветом. Входы типа "text" не должны быть соединены с другими выходами, данные для них задаются напрямую при создании директивы с помощью двойного щелчка мышью на модуле и заполнения появившегося окна. Последовательность выполнение модулей задается соединением специальных входов и выходов, обозначенных ромбиками. Такие соединительные линии имеют зеленый цвет и постоянно находятся на экране. Возможно многократное разветвление структуры директивы с помощью модуля "Условие". Входом такого модуля является переменная логического типа (log). Если ее значение является истиной (true), то выполнение директивы продолжается по ветви от выхода, обозначенного "1", если ложь (false) – то по ветви, обозначенной "0".

Рис. 3.4. Модуль разветвления структуры директивы.

Для автоматического ведения протокола директивы необходимо указать, какие входы и выходы нуждаются в протоколировании, и задать необходимые текстовые пояснения. Для этого надо щелкнуть мышью на модуле и в открывшемся окне:

- поставить галочку у пункта "Добавлять входы и выходы в файл протокола";
- поставить галочки слева от тех входов/выходов, которые нужно добавлять в протокол;
- задать необходимые пояснения в текстовых полях справа от обозначения входов/выходов. В пояснениях можно использовать следующие символы: // (двойной слэш) – перенос на следующую строку; ~ – разделительная линия.

Рис. 3.5. Пример окна ввода комментариев.

Также для ведения протокола можно использовать специальные модули "Протокол" с различным числом входов.

Для вывода на экран графиков используется модули "График" с различным числом входов. Текстовые пояснения к графикам задаются аналогично протоколу.

Для остановки выполнения директивы используется модуль "Останов". В качестве тектового пояснения к его единственному входу задается сообщение, которое при выполнении этого модуля выводится на экран.

Таким образом набирается вся структурная схема (примеры схем см. далее на рис. 4.1). Далее структурную схему можно сохранить, выбрав в меню "Директивы" соответствующую команду. Для запуска директивы следует выбрать команду "Выполнить". После этого на экране появится окно ввода исходных данных. Заполнив это окно и нажав кнопку "Выполнить", можно запустить директиву на выполнение. Для работы с включенной ранее директивой необходимо в меню "Директивы" выбрать команду "Открыть"(структурные схемы хранятся на диске в виде файлов с расширением shm). Директива открывается по имени введенной ранее структурной схемы.

3.3.3 Расширение меню пользователя

Меню пользователя (открывающееся при нажатии кнопки "Пользователь" при запуске системы) организовано в виде lst-файлов, хранящихся в каталоге, заданном параметром DLIST в файле newgamma.ini. Каждый lst-файл представляет собой список пунктов меню, каждому из которых может быть поставлено в соответственно некоторое действие. Формат файла таков: `ПУНКТ МЕНЮ [ = ИМЯ ФАЙЛА]`

Если ИМЯ ФАЙЛА имеет расширение .lst, то при выборе этого пункта открывается новое меню, описанное в указанном файле. Если ИМЯ ФАЙЛА имеет расширение "shm", то при выборе этого пункта открывается соответствующая директива и вызывается окно ввода исходных данных. Если ИМЯ ФАЙЛА не указано, то перед пунктом меню автоматически ставится символ "[-]"и нажатие на него не дает никакого эффекта. Первым всегда открывается файл start.lst. Русские буквы в lst-файлах должны быть в кодировке Windows.

Пример lst-файла:

```
401 Построение непрерывной модели (111.3) = d401.shm
402 Построение непрерывной модели с её подтверждением (112.1)
404 Директива 401 с парными испытаниями (118.1) = d404.shm
405 Оценка верхней границы собственных частот объекта (119.1)
406 Построение дискретной модели (121.2)
407 Идентификация с параллельной фильтрацией (131.1)
408 Идентификация с последовательной фильтрацией (131.2)
409 Построение дискретной модели (211.3) = d409.shm
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДИРЕКТИВЫ = identd.lst
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ДИРЕКТИВЫ = identv.lst
```

4 ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

4.1 СРЕДА ИССЛЕДОВАТЕЛЯ

Опишем процесс разработки директивы D442 "Точное управление объектом второго вида" в среде исследователя системы ГАММА-2PC.

Исходными данными для этой директивы служат:

1. Модель объекта управления, описываемая уравнением (11).

2. Модель измерительного устройства и регулируемых переменных (12).

3. Компоненты вектора допустимых установившихся ошибок (8).

4. Вектор границ внешних возмущений (7).

Результатом работы директивы являются матрицы регулятора (5).

4.1.1 Этапы директивы D442

1. Приведение моделей объекта управления и измерительного устройства к форме Коши (1).

2. Анализ наблюдаемости модели объекта управления. (Если объект не полностью наблюдаем, то вычисления останавливаются).

3. Анализ управляемости модели объекта управления. (Если объект не полностью управляем, то вычисления останавливаются).

4. Приведение модели объекта управления к форме "вход-выход" (2).

5. Анализ корней λ_i полинома $\det T_2(s)$. Если все корни имеют отрицательные вещественные части, то идти к п. 9. Иначе "останов".

6. Формирование модели объекта управления с "условными" управляющими и возмущающими воздействиями по формулам (47), (53).

7. Формирование коэффициентов функционала оптимизации на основе "условных" возмущающих воздействий.

$$J_1 = \int_0^\infty (y^T Q_0 y + u^{*T} M_0^T M_0 u^*)dt, Q_0 = diag[q_{ii}], q_{ii} \le \sum_{k=1}^{\mu} \frac{{w_k^*}^2}{{z_\cdot^*}^2},$$
$$M_0 = I_m, \quad (i = 1, \ldots, m)$$

8. Приведение модели объекта управления в форме "вход-выход" с "условными" управляющими и возмущающими воздействиями к канонической форме Коши (49).

9. Определение прогнозируемой обобщенной частоты среза $w_\cdot$ из неравенства

$$\det[I_m + T_{20}^T(-j\omega_{\cdot\cdot}) \cdot T_1^T(-j\omega_{\cdot\cdot}) \cdot Q_0 \cdot T_1^T(-j\omega_{\cdot\cdot}) \cdot \\ \cdot T_{20}^T(-j\omega_{\cdot\cdot})] \le 2 \quad (107)$$

10. Анализ выполнения условия структурной грубости. Если оно не выполняется ($w_\cdot^* < w_\cdot$),то идти к п. 19

11. Преобразование функционала оптимизации в форме по регулируемым переменным в форму по переменным состояния объекта управления:

$$J_2 = \int_0^\infty (\check{x}^T \check{Q}_0 \check{x} + u^{*T} M_0^T M_0 u^*) dt, \tag{108}$$

где $\check{Q} = C_1^T Q_{0!}$.

12. Формирование функционала оптимизации из условия реализуемости регулятора

$$J_3 = \int_0^\infty (\check{x}^T \check{Q}_0 \check{x} + \sum_{i=0}^{\psi} u^{*(i)^T} M_i^T M_i u^{*(i)}) dt, \tag{109}$$

где $\psi = [T_1(s)] - [T_2(s)]$.

13. Формирование модели объекта управления в расширенной форме Коши и преобразование функционала оптимизации:

$$\dot{\tilde{\check{x}}} = \tilde{\check{A}} \cdot \tilde{\check{x}} + \tilde{\check{B}} \cdot \tilde{\check{u}}, \quad J_1 = \int_0^\infty (\tilde{\check{x}}^T \tilde{\check{Q}}_0 \tilde{\check{x}} + \tilde{\check{u}}^{*^T} \tilde{\check{u}}^*) dt,$$

где

$$\tilde{\check{A}} = \begin{bmatrix} A & B & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I_m & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_m & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \tilde{\check{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ M_\psi^{-1} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\check{Q}} = \begin{bmatrix} \check{Q} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_0^T M_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & M_1^T M_1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{\psi-2}^T M_{\psi-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & M_{\psi-1}^T M_{\psi-1} \end{bmatrix} \tag{110}$$

$$M_i^T M_i = I_m \bar{m}_i \tag{111}$$

$$\bar{m}_i = \frac{c\psi^i}{psi^i} q^{2i}, \quad (i = 1, \dots, \psi), \quad q = \frac{\sqrt{\psi}}{(5 \cdots 10) w_{..}^*} \tag{112}$$

c_ψ^i — число сочетаний из ψ элементов по i.

14. Решение уравнения Риккати

$$\tilde{\bar{P}}\tilde{\bar{A}} + \tilde{\bar{A}}^T\tilde{\bar{P}} - \tilde{\bar{P}}\tilde{\bar{B}}\tilde{\bar{B}}^T\tilde{\bar{P}} + \tilde{\bar{Q}} = 0 \tag{113}$$

и формирование

$$\tilde{\bar{C}}^T = -\tilde{\bar{B}}^T\tilde{\bar{P}} \tag{114}$$

15. Формирование уравнений регулятора в форме "вход-выход" с учетом "условных" управляющих воздействий и канонических переменных объекта управления.

$$T_u(s)u = T_y(s)y, \tag{115}$$

где

$$T_u(s) = G(s) \cdot T_{20}^{-1} \cdot T_2(s), \quad T_y(s) = C^T(s), \tag{116}$$

$$G(s) = \sum_{i=0}^{\psi-1} C_i^T + M_\psi s^\psi, \tilde{\bar{C}}^T = [C^T, -C_0^T, -C_1^T, \cdots, -C_{\psi-1}^T] \tag{117}$$

Идти к п. 22.

16. Вычисление постоянной времени t_1 дополнительных инерционных звеньев из неравенства:

$$\begin{gathered}\det[E_m + \tfrac{1}{t_1^2\omega_{..}+1} \cdot T_{20}^T(-j\omega_{..}) \cdot T_1^T(-j\omega_{..}) \cdot Q_0 \cdot T_1^T(-j\omega_{..}) \cdot \\ \cdot T_{20}^T(-j\omega_{..})] \leq 2\end{gathered} \tag{118}$$

17. Формирование модели объекта управления, измерительного устройства и функционала оптимизации с учетом дополнительных инерционных звеньев:

$$\dot{\tilde{x}} = -t_1^{-1}\tilde{x} + t_1^{-1}y, \quad \bar{x}^T = [\check{x}^T, \tilde{x}^T], \quad y = \bar{N} \cdot \bar{x} \tag{119}$$

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + Bu^*, \quad J_1 = \int_0^\infty (\bar{x}^T\bar{Q}\bar{x} + u^{*T}M_0^TM_0u^*)dt, \tag{120}$$

где

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_0 \end{bmatrix} \tag{121}$$

18. Формирование функционала оптимизации из условия реализуемости регулятора

$$J_3 = \int_0^\infty (\bar{x}^T\bar{Q}\bar{x} + \sum_{i=0}^{\psi} {u^{*(i)}}^T M_i^T M_i u^{*(i)})dt, \tag{122}$$

$$\psi = [\quad T_1(s)] - [\quad T_2(s)] \tag{123}$$

19. Формирование модели объекта управления в расширенной форме Коши и преобразование функционала оптимизации:

$$\dot{\tilde{\tilde{\bar{x}}}} = \tilde{\tilde{\bar{A}}} \cdot \tilde{\tilde{\bar{x}}} + \tilde{\tilde{\bar{B}}}\tilde{\tilde{\bar{u}}}, \quad J_1 = \int_0^\infty (\tilde{\tilde{\bar{x}}}^T \tilde{\tilde{\bar{Q}}}\tilde{\tilde{\bar{x}}} + \tilde{\tilde{\bar{u}}}^{*T} \tilde{\tilde{\bar{u}}}^*)dt \tag{124}$$

20. Решение уравнения Риккати

$$\tilde{\tilde{\bar{P}}}\tilde{\tilde{\bar{A}}} + \tilde{\tilde{\bar{A}}}^T \tilde{\tilde{\bar{P}}} - \tilde{\tilde{\bar{P}}}\tilde{\tilde{\bar{B}}}\tilde{\tilde{\bar{B}}}^T \tilde{\tilde{\bar{P}}} + \tilde{\tilde{\bar{Q}}} = 0, \tag{125}$$

и формирование

$$\tilde{\tilde{\bar{C}}}^T = -\tilde{\tilde{\bar{B}}}^T \tilde{\tilde{\bar{P}}} \tag{126}$$

21. Формирование модели управляющего устройства в форме "вход-выход" с учетом "условных" управляющих воздействий и канонических переменных объекта управления:

$$T_u(s)u = T_y(s)y \tag{127}$$

где

$$T_u(s) = (t_1 s + 1) \cdot G(s) \cdot T_{20}^{-1} \cdot T_2(s), \quad T_y(s) = (t_1 s + 1) \cdot C^T + \tilde{C}^T, \tag{128}$$

22. Приведение модели управляющего устройства к форме Коши (5).

23. Анализ динамики САУ.

4.1.2 Структурная схема директивы

Используя модули синтеза и анализа из библиотеки модулей ГАММА-2РС, составим структурную схему директивы в редакторе структурных схем.

Рис.4.1 Структурная схема директивы.

4.1.3 Текст директивы

Запишем текст директивы на языке ГАММА-1.

```
% описание переменных;
var LPlant:ldeqp,LCV:matr,CPlant:cdeqp,CMV:cmvr,CCV:ccvr,F:vec,E:vec,
L:log,KY:matr,Ki:vec,Kn:vec,T1:matr,T2:matr,T3:matr,FU:matr,T20:matr,
Q:matr,P1:matr,B1:matr,CV1:matr,Um:matr,W:matr,Qx:matr,Mps:matr,Deg:matr,
P2:matr,B2:matr,CV2:matr,Qx2:matr,Um2:matr,Pc:matr,Bc:matr,Cc:matr,Dc:matr,
Tu:matr,Ty:matr,H:matr,C:matr,X:matr,T2us:matr,T:val,WW:func, 142u, 142y: file,
nl: vec, f1: matr;

% описание меток;
label l1,l2,l3,l4,l5,l6,l7,l8,l9;

%создание диалога ввода исходных данных;
loadvars[]['Диф. уравнения объекта управления в форме Лагранжа',LPlant,
           'Уравнения рег. переменных объекта управления в форме Лагранжа',
            LCV,
           'Амплитуды ступенчатых внешних возмущений',F,
           'Вектор допустимых установившихся ошибок',E];

% расчетная часть;
     m102a[LPlant,LCV,LCV][CPlant,CMV,CCV];
     m211[CPlant.A,CPlant.B2][Ki,KY,L];
     ifgoto[L,l1,l2];
l1:  m221[CPlant.A,CCV.C1][Kn,KY,L];
     ifgoto[L,l3,l4];
l3:  m103[CPlant.A,CPlant.B2,CCV.C1,CPlant.B1,Kn][T1,T2,nl,T3,nl,nl,nl];
     m233[T2][Ki,KY,L];
     ifgoto[L,l5,l6];
```

```
l9:  m038[T2,T3,F][FU,T20];
     m034[FU,E][Q,Um];
     m020[T1,T20,Q][W];
     m030[T1,T20][P1,B1,f1,f1,CV1];
     m010a[CV1,Q][Qx];
     m047[W,Qx,Um,Kn,T2us][Mps,Deg];
     m304h[P1,B1,CV1,Qx,Mps,Deg][P2,B2,CV2,Qx2,Um2];
     m0211g[Qx2,P2,B2,Um2][H];
     m02121,[H,B2][X,C,L];
     ifgoto[L,l7,l8];
l7:  m058[C,T2us,Mps,Kn,Deg,T20][Tu,Ty];
     m080[Tu,Ty][Pc,Bc,f1,f1,f1,f1,Cc,Dc];
     print['Матрицы регулятора', 'Ap', Pc, 'Bp', Bc, 'Cp', Cc,'Dp',Dc];
     time[W][T];
     transfer[F][WW];
     simul142[ ,T, ,CPlant,CMV.C2, , , ,CCV.C1, , , ,WW, ,Pc,Bc, ,Cc,Dc, ,Cc,Dc]
     [142y,142u];
     plot['y', 142y, 'u', 142u][];
     end;
l2:  message['Объект не полностью управляем',1];
     end;
l4:  message['Объект не полностью наблюдаем',1];
     end;
l8:  message['Решение уравнения Риккати не найдено',1];
     end;
l6:  m053d[T2][T2us];
     goto l9;
l5:  copypolm[T2][T2us];
     goto l9;
```

4.2 СРЕДА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

4.2.1 Синтез точного управления гироплатформой

Рассмотрим следующие уравнения двухостной гироскопической платформы с неортогональным расположением гироскопов на площадке:

$$\begin{aligned}
&\ddot{q}_1 + 400\dot{q}_1 + 0.342\dot{q}_3 + 0.94\dot{q}_4 - 940q_3 + 342q_4 = 0\\
&\ddot{q}_2 + 400\dot{q}_2 + 0.866\dot{q}_3 + 0.5\dot{q}_4 - 500q_3 + 866_q4 = 0\\
&\dot{803}q_1 + 154\dot{q}_2 + 100\dot{q}_3 + 754q_3 + 1130q_4 = u_1 + w_1\\
&-718\dot{q}_1 - 1070\dot{q}_2 + 200\dot{q}_4 - 867q_3 - 754q_4 = u_2 + w_2,
\end{aligned} \tag{129}$$

где q_1 и q_2 – измеряемые углы прецессии гироскопов, q_3 и q_4 – проекции абсолютной угловой скорости площадки на ее оси, u_1 и u_2-моменты двигателей стабилизации; w_1 и w_2 – внешние возмущения, которые являются ступенчатыми либо гармоническими функциями.

$$u_i = \begin{cases} 0 & t = t_0 \\ \overline{w}_i = conct & t \le t_0 \end{cases} \quad (i = 1, 2)$$

$$\overline{w}_i = \overline{M}_i \sin \omega_i t,$$

где $\overline{w}_i, \overline{M}_i, \omega_i$ – неизвестные числа. При этом

$$|\overline{w}_i| \le 10^3 \quad \text{либо} \quad |\overline{M}_i| \le 10^3, \quad (i = 1, 2) \tag{130}$$

Задача 4.1. *Найти дифференциальные уравнения регулятора при которых в установившемся режиме ошибки стабилизации удовлетворяют неравенствам*

$$|q_i| \le 5 * 10^{-4} \quad (i = 1, 2), \tag{131}$$

где $q_i = \lim\limits_{t\to\infty} q_i(t), \quad (i = 1, 2)$.

Задача решалась с использованием директивы D442 "Точное управление объектом второго вида". Пользователь ввел уравнения объекта (129), регулируемые переменные $z_1 = q_1$, $z_2 = q_2$ и требования (131) к ним, а также границы внешнего возмущения (130). Ниже приводится фрагмент протокола работы директивы с полученными матрицами регулятора.

ПРОТОКОЛ ДИРЕКТИВЫ D442

31.12.2004 22:31

Диф. уравнения объекта управления в форме Лагранжа:

q1(2)+400q1(1)+0.342q3(1)+0.94q4(1)-940q3+342q4=0;

q2(2)+400q2(1)+0.866q3(1)+0.5q4(1)-500q3+866q4=0;

803q1(1)+154q2(1)+100q3(1)+754q3+1130q4=u1+w1;

-718q1(1)-1070q2(1)+200q4(1)-867q3-754q4=u2+w2

Уравнения рег. переменных объекта управления в форме Лагранжа:

1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	1.00000	0.00000	0.00000

Амплитуды ступенчатых внешних возмущений:

1000; 1000

Вектор допустимых установившихся ошибок:

0.0005; 0.0005

РЕЗУЛЬТАТЫ СЧЕТА

Таблица N10

Матрицы регулятора

Ap

0.00000	-9.27588*10^6	0.00000	2.99255*10^5
1.00000	-5.77571*10^3	0.00000	5.20132*10^1
0.00000	2.95416*10^5	0.00000	-8.59938*10^6
0.00000	5.20134*10^1	1.00000	-5.65737*10^3

Bp

3.62405*10^8	4.96599*10^6
2.09225*10^5	-5.89383*10^3
2.36826*10^8	-5.60629*10^8
1.48173*10^5	-3.38509*10^5

Cp

0.00000	7.40487*10^6	0.00000	-3.62848*10^-10
0.00000	0.00000	0.00000	7.40487*10^6

Dp

-2.98443*10^8	1.12430*10^7
-2.14674*10^8	4.85525*10^8

4.2.2 Идентификация типового объекта

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый уравнением :

$$d_3 \dddot{y} + d_2\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{u} + k_0 u + m_0 f. \tag{132}$$

Граница возмущения:

$$f^* = 10.$$

Задача 4.2. *Найти оценки коэффициентов объекта, такие, чтобы удовлетворялись следующие требования к точности идентификации*

$$|\triangle d_i| \leq 3, \quad |\triangle k_i| \leq 3 \quad i = \overline{0,1} \tag{133}$$

Примечание. Истинные коэффициенты объекта (132)

$$d_0 = 25, \quad d_1 = 131, \quad d_2 = 31, \quad d_3 = 5, \quad k_0 = 25, \quad k_1 = 10, \quad m_0 = 25 \tag{134}$$

возмущение $f(t) = 10\sin 6.1t$.

Объект (132) возбуждался испытательным воздействием

$$u(t) = 0.02(\sin 0.2t + \sin 4t + \sin 6t). \tag{135}$$

Время задержки – 2 периода, время фильтрации – 2 периода, число делений – 100 ($T = \frac{2\pi}{100*6}$).

Ниже приводится фрагмент протокола работы директивы с истинными и идентифицированными параметрами объекта.

```
                         ПРОТОКОЛ ДИРЕКТИВЫ

                          31.12.2004 21:22


Дифференциальное уравнение объекта:

   5y1(3)+31y1(2)+131y1(1)+25y1=-10u1(1)+25u1+25f1;

предполагаемая степень полинома d(s):

   3

предполагаемая степень полинома k(s):

   1

параметры внешнего возмущения:

   10;6.1;0

параметры испытательного воздействия:

   0.02;0.02;0.02;0;0.2;4;6

параметры фильтрации:

   2;2;100


                          РЕЗУЛЬТАТЫ СЧЕТА

                          ----------------

                             Таблица N7

                  Идентифицированный полином Dident

              1.0*s^3+6.07324*s^2+2.54487*10^1*s^1+4.85012


                          Истинный полином D

                    1.0*s^3+6.2*s^2+2.62*10^1*s^1+5.0


                             Таблица N8

                  Идентифицированный полином Kident
```

```
-1.94435*s^1+4.85238


Истинный полином K

-2.0*s^1+5.0


Таблица N9

Идентифицированная передаточная функция WIdent


1.00046*s^0*(-4.007*10^-1*s + 1)
-------------------------------------------------------
(5.00506*s + 1)(4.11944*10^-2*s^2 +2.41952*10^-1*s + 1)


Истинная передаточная функция  W
1.0*s^0*(-4.0*10^-1*s + 1)
-------------------------------------------
(5.0*s + 1)(4.0*10^-2*s^2 +2.4*10^-1*s + 1)
```

4.2.3 Адаптивное управление типовым объектом

Рассмотрим полностью управляемый объект, описываемый уравнением :

$$d_3 \dddot{y} + d_2\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{u} + k_0 u + m_0 f, \tag{136}$$

Граница возмущения:

$$f^* \leq 10. \tag{137}$$

Задача 4.3. *Найти регулятор*

$$g_2\ddot{u} + g_1\dot{u} + g_0 u = r_2\ddot{y} + r_1\dot{y} + r_0 y, \tag{138}$$

такой, чтобы характеристический полином системы (136),(138) и желаемый полином

$$\psi(s) = s^5 + 15 * s^4 + 85 * s^3 + 225 * s^2 + 274 * s + 120 \tag{139}$$

удовлетворяли следующим требованиям

$$|\psi_i - \varphi_i| \leq 0.2\psi_i, \quad i = \overline{1,5} \tag{140}$$

Примечание 4.2. Объект имеет вид (136), где возмущение $f(t) = 10\sin 6.1t$.

Объект (136) возбуждался испытательным воздействием

$$u(t) = 0.1(\sin 0.2t + \sin 4t + \sin 6t). \tag{141}$$

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:

$$\begin{aligned} &d_0 = 4.93, \quad d_1 = 25.79, \quad d_2 = 6.13; \\ &k_0 = 4.92, \quad k_1 = -1.96. \end{aligned} \tag{142}$$

По этим коэффициентам синтезирован регулятор:

$$\begin{aligned} &g_0 = 5.81, \qquad g_1 = 8.86, \qquad g_2 = 1; \\ &r_0 = -18.54, \quad r_1 = -23.73, \quad r_2 = -0.50. \end{aligned} \tag{143}$$

Система (136), (138) возбуждалась испытательным воздействием

$$u(t) = 0.05(\sin 0.2t + \sin 1t + \sin 2t + \sin 4t + \sin 6t). \tag{144}$$

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:

$$\begin{aligned} &g_0 = 5.60, \qquad g_1 = 8.76, \qquad g_2 = 1; \\ &r_0 = -18.40, \quad r_1 = -24.19, \quad r_2 = -0.66. \end{aligned} \tag{145}$$

Ниже приводится фрагмент протокола работы директивы.

```
                    ПРОТОКОЛ ДИРЕКТИВЫ

                    31.12.2004 21:22


Дифференциальное уравнение объекта:

   5y1(3)+31y1(2)+131y1(1)+25y1=-10u1(1)+25u1+25f1

Полином регулятора при возмущения:

   1

Желаемый характеристический полином системы:
```

```
s^5+15*s^4+85*s^3+225*s^2+274*s+120
```

Предполагаемая степень полинома d(s):

```
3
```

Предполагаемая степень полинома k(s):

```
1
```

Параметры гармонического внешнего возмущения:

```
10; 6.1; 0
```

Параметры испытательного воздействия объекта:

```
0.1; 0.1; 0.1;  0;  0.2; 4; 6
```

Параметры испытательного воздействия замкнутой системы:

```
0.05; 0.05; 0.05; 0.05; 0.05;  0;  0.2; 1; 2; 4; 6
```

Параметры фильтрации объекта:

```
1; 2; 200
```

Параметры фильтрации замкнутой системы:

```
1; 2; 200
```

РЕЗУЛЬТАТЫ СЧЕТА

Таблица N8

Идентифицированный полином dident

```
1.0*s^3+6.13762*s^2+2.5798*10^1*s^1+4.93079
```

Истинный полином d

```
1.0*s^3+6.2*s^2+2.62*10^1*s^1+5.0
```

Таблица N9

Идентифицированный полином kident

```
-1.96994*s^1+4.92541
```

Истинный полином k

-2.0*s^1+5.0

Таблица N10

Синтезированный полином регулятора gmod

1.0*s^2+8.86238*s^1+5.81245

Истинный полином регулятора g

1.0*s^2+8.8*s^1+5.56757

Таблица N11

Синтезированный полином регулятора rmod

-5.09842*10^-1*s^2-2.37308*10^1*s^1-1.85447*10^1

Истинный полином регулятора r

-6.63784*10^-1*s^2-2.41989*10^1*s^1-1.84324*10^1

Таблица N20

Идентифицированный полином dident

1.0*s^3+6.23634*s^2+2.61953*10^1*s^1+4.99652

Истинный полином d

1.0*s^3+6.2*s^2+2.62*10^1*s^1+5.0

Таблица N21

Идентифицированный полином kident

-2.00383*s^1+4.99633

Истинный полином k

-2.0*s^1+5.0

Таблица N22

Синтезированный полином регулятора gmod

1.0*s^2+8.76366*s^1+5.6099

Истинный полином регулятора g

1.0*s^2+8.8*s^1+5.56757

Таблица N23

Синтезированный полином регулятора rmod

-7.27806*10^-1*s^2-2.40465*10^1*s^1-1.84075*10^1

Истинный полином регулятора r

-6.63784*10^-1*s^2-2.41989*10^1*s^1-1.84324*10^1

Список литературы

[1] Moler C. MATLAB - user's Guide', Department of Computer Science, University of New Mexico, Alberquerque, USA, 1980.

[2] Schmid Chr., Unbehanen H. KEDDC, a general purpose CAD software system for application in control engineering, Prep. 2nd IFAC/IFIP Symposium on software for computer control (SO COCO), Prag, paper, C-V, 1979.

[3] Floyd M. A., Dawes P. J., Milletti U. X math: a new generation of object-oriented CACSD tools // In Proc. European Control Conference, 1991.

[4] Александров А. Г. Небалуев Н. А., Асмолова Л. Я., Крупенина Л. Я. Математическое обеспечение синтеза и анализа передаточных матриц регуляторов многомерных линейных систем автоматического регулирования. Комплексы программ ГАММА-1, ГАММА-2 для ЭВМ типа М-220. Учебное пособие. – Саратов. политех. институт, 1975.

[5] Марков А. А., Степанов М. Ф. Диалоговый пакет прикладных программ "ГАММА-1М"для синтеза и анализа линейныз многомерных систем управдения по заданной точности и качеству. Межвузовский научный сб. "Аналитические методы синтеза регуляторов'", – Саратов: СПИ, 1982.

[6] Alexandrov A. G., Panin S. Yu., Stepanov M. F. GAMMA-1PC - CAD system to synthesis of Controllers. All-Union Conference on the problems of Multivariable control of thechnological processes. Preprints, Odessa, USSR, 1991.

[7] Александров А. Г. Панин С. Ю. Система ГАММА-1PC. Руководство пользователя. – М: МИСиС, 1997.

[8] Alexandrov A.G., Orlov Yu.F. Training in the identification and adaptive control processes using the package ADAPLAB // Workshop on control education and 1998.technology transfer issues, Preprints, Curitiba, Parana, Brazil, pp. 117-120, 1995.

[9] Александров А. Г., Орлов Ю. Ф. Пакет программ АДАПЛАБ: Новые возможности для идентификации // Труды международной конференции <Идентификация систем и задачи управления>, SICPRO'2000, – М.: ИПУ РАН, 2000, с. 123-131.

[10] Александров А. Г. Частотное адаптивное управление устойчивым объектом при неизвестном ограниченном возмущении // Автоматика и телемеханика, № 4, 2000, с. 106- 116.

[11] Пакет программ АДАПЛАБ. Руководство пользователя. – М.: МИСиС, 1998.

[12] Mikhailova L. S., Isakov R. V., Ryazantchev R. P., Vnukov A. V. Development of Researcher's Enviroment Fragments for CASCD GAMMA-1PC. Preprints of 7th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad). – Saint-Petersburg, 1999.

[13] Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы,– М.: Высшая школа, 1989, с. 106-116.

[14] Александров А. Г. Синтез регуляторов многомерных систем, – М.: Машиностроение, 1986, 272 с.

[15] Александров А. Г., Честнов В. Н. Синтез многомерных систем заданной точности. I. Применение процедур -оптимизации // Автоматика и телемеханика, № 7, 1998, с. 83-95; II. Применение процедур оптимизации // Автоматика и телемеханика, № 8 , 1998, с. 124- 138.

[16] Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. "State–space Solutions of standard H_2 and H_∞ Control Problem" IEEE Trans. on Autom. Control. vol.34., No. 8, 1989.

[17] Doyle J. C., Stein G. "Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis", IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-26, No. 1.

АЛЕКСАНДРОВ Альберт Георгиевич

МИХАЙЛОВА Любовь Сергеевна

ГАММА-2PC. СИСТЕМА ПРОГРАММ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ. РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Рецензент к.ф.-м.н. Ю.Ф. Орлов

Редактор Г.В. Атмашкина

Уч.-изд.л. 2,5 Тираж 150 экз.

Цена "С"

Электростальский политехнический институт (филиал)

Московского государственного института стали и сплавов

(Технологического университета)(ЭПИ МИСиС)

144000, Московская обл., г.Электросталь, ул. Первомайская, д.7