

УДК 519.7:62.506

Никифоров В.О., Слита О.В., Ушаков А.В. Интеллектуальное управление в условиях неопределенности: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 232 с. : ил. 33.

В учебном пособии освещены проблемы управления в условиях неопределенности непрерывными динамическими объектами. Материал пособия опирается на инструментарий теории чувствительности, интервальных модельных представлений, обобщенного модального управления, метода функций Ляпунова и адаптивного управления. При конструировании законов управления, доставляющих системам робастность в смысле основных показателей качества их функционирования, используются возможности как неадаптивных, так и адаптивных методов управления.

Учебное пособие написано для библиографического обеспечения дисциплины «Интеллектуальное управление в условиях неопределенности», предусмотренной Государственным образовательным стандартом магистерского образования. Оно также будет полезно аспирантам и специалистам, обучающимся и работающим в области теории и практики робастного и адаптивного управления.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета КТУ, протокол № 3 от 10.11.09.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2011

© В.О. Никифоров, О.В. Слита, А.В. Ушаков, 2011

Содержание

Предисловие.....	5
Список сокращений и обозначений	7
1. ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМАТИКУ	8
1.1. Понятие неопределенного объекта. Классификация неопределенностей.....	8
1.2. Проблемы управления в условиях неопределенности.....	13
1.3. Основные методы управления неопределенными объектами.....	14
2. АНАЛИЗ СИСТЕМ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ.....	21
2.1. Грубость свойств систем управления	21
2.1.1. Постановка задачи. Понятия грубости и робастности.....	21
2.1.2. Грубость свойств устойчивости по отношению к параметрическим возмущениям.....	22
2.1.3. Грубость свойств устойчивости по отношению к структурным возмущениям	27
2.1.4. Практические выводы.....	31
2.2. Методы теории чувствительности	32
2.2.1. Аппарат функций траекторной чувствительности.....	32
2.2.2. Функции чувствительности алгебраических и геометрических спектров матриц	49
2.2.3. Оценка чувствительности с помощью чисел обусловленности матриц.....	66
2.2.4. Сведение задачи чувствительности к задаче анализа системных свойств – управляемости, наблюдаемости и инвариантности.....	76
2.3. Системы с интервальными параметрами. Метод В.Л. Харитонова	85
3. НЕАДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ.....	96
3.1. Основные положения обобщенного модального управления...	96
3.2. Модальноробастное управление многомерными объектами..	100
3.3. Синтез параметрически инвариантных систем.....	109
3.4 Алгебраические проблемы параметрической инвариантности: аналитические возможности аппарата траекторной чувствительности.	121
3.5. Робастное интервальное управление	134
4. АДАПТИВНОЕ И РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ.....	147
4.1. Пример управления объектом первого порядка	147
4.1.1. Постановка задачи	147
4.1.2. Неадаптивное управление.....	147
4.1.3. Адаптивное управление	149

4.1.4. Нелинейное робастное управление	153
4.2. Принципы построения адаптивного управления.....	156
4.2.1. Этапы синтеза адаптивных систем.....	156
4.2.2. Базовые структуры алгоритмов адаптации	157
4.3. Адаптивное управление многомерным объектом	163
4.3.1. Постановка задачи	163
4.3.2. Синтез регулятора	164
4.3.3. Свойства замкнутой системы	165
4.4. Нелинейное робастное управление многомерным объектом.....	169
4.4.1. Постановка задачи	169
4.4.2. Синтез регулятора	169
4.4.3. Свойства замкнутой системы	170
4.5. Адаптивная компенсация возмущений.....	172
4.5.1. Постановка задачи	172
4.5.2. Синтез регулятора	173
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Векторы и матрицы	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Определения устойчивости и метод функций Ляпунова	189
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Сингулярное разложение матриц	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Доказательства утверждений	198
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Элементы интервальных вычислений.....	211
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Свойство строгой положительной вещественности	218
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Свойства многомерных адаптивных систем управления	220
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Варианты заданий	222
ЛИТЕРАТУРА	226

Светлой памяти Ильи Васильевича
Мирошника – учителя и ученика
авторов посвящается книга

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные технологические процессы по организации и обработке материальных, энергетических и информационных потоков предъявляют высокие требования к надежности и показателям качества систем управления, встраиваемых в техническую среду этих технологических процессов. Отсутствие гарантий стабильности показателей качества функционирования систем управления в составе обслуживаемых технологических процессов может приводить к ухудшению потребительских свойств выходной продукции процесса, а также его производительности, что является неоправданной технической, экономической, экологической, а, возможно, и гуманитарной роскошью.

Проблема обеспечения стабильности показателей качества управляемых процессов в условиях неопределенности различной природы технической среды их протекания, подобно проблеме обеспечения их устойчивости, становится одной из "вечных" в теории и практике управления. Эта проблема имеет несколько общесистемных постановочных версий, формулируемых как проблема обеспечения малой параметрической чувствительности к параметрической неопределенности, как проблема достижения грубости или робастности по совокупности неопределенных факторов, а также обеспечения гарантированного качества управляемых процессов при неопределенности параметров функциональных компонентов системы управления, задаваемой интервальным или нечетким образом.

Решению перечисленных проблем управления в условиях неопределенности посвящается предлагаемая вниманию читателей книга. Проблемы концептуально разбиты на задачи анализа объектов и систем с неопределенностями сигнальной, параметрической и структурной природы и задачи синтеза законов управления, гарантирующих робастность свойств проектируемых систем в условиях перечисленных неопределенностей.

При освещении проблем, связанных с вопросами анализа объектов и систем с неопределенностями, авторы сосредоточили внимание на вопросах исследования возможностей метода функций Ляпунова, аппарата теории чувствительности в траекторной и критериальных

областях, а также интервального модельного представления в рамках метода Харитонова.

При разработке проблем, связанных с вопросами синтеза законов управления, доставляющих проектируемым системам робастность в смысле основных показателей качества их функционирования, авторы использовали возможности как неадаптивных, так и адаптивных методов управления. В классе неадаптивных методов управления в основном использованы возможности обобщенного модального управления, в алгоритмическую среду которого погружены задачи синтеза робастного модального управления и робастного интервального управления. К задаче обобщенного модального управления авторам удалось свести задачи управления при параметрической неопределенности, сформулированной как обеспечение модальной робастности, параметрической инвариантности и требуемых значений оценок относительной интервальности матричных компонентов модельного представления и показателей качества системы. В классе адаптивных методов управления основное внимание сосредоточено на использовании при синтезе алгоритмов адаптивного и нелинейного робастного управления возможностей метода функций Ляпунова общей теории устойчивости.

При написании учебного пособия авторы полагали, что читатель обладает знаниями операторного метода, элементами векторно-матричного формализма метода пространства состояния, умением решать матричных уравнений Сильвестра и Ляпунова, необходимых для построения основных модельных представлений и синтеза алгоритмов управления.

Концепцию пособия в целом авторы формировали вместе, разделы 1 и 4, а также параграф 2.1, приложения 2, 6 и 7 написаны В.О. Никифоровым. Разделы 2 (за исключением п. 2.1) и 3, а также приложения 3, 4 и 5, 8 написаны совместно О.В. Слитой и А.В. Ушаковым, остальной текст монографии написан авторами совместно.

Авторы считают своим приятным долгом выразить особую благодарность за доброжелательность, филологический мониторинг, окончательное конфигурирование пособия Н.Ф. Гусаровой.

Конструктивную критику по существу содержания учебного пособия следует направлять авторам по почтовому адресу: 197101, Кронверский пр., 49, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; по телефону 595-41-28 и электронной почте nikiforov@mail.ifmo.ru, oslita@yandex.ru и ushakov-AVG@yandex.ru.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

$R(C)$	– поле действительных (комплексных) чисел;
$R^n(C^n)$	– линейное действительное(комплексное) n -мерное пространство;
$\text{row}\{(*)_i\}$	– строка (матрица-строка) из элементов $(*)_i$;
$\text{col}\{(\#)_j\}$	– столбец (матрица-столбец) из элементов $(\#)_j$;
$A; A^i; A_j$	– матрица; i -й столбец и j -я строка этой матрицы соответственно;
$\Lambda = \text{diag}\{\lambda_i\}$	– диагональная матрица с элементами λ_i на главной диагонали;
$\dim\{(*)\}$	– размерность элемента $(*)$;
$\text{rang}(A)$	– ранг матрицы A ;
$\det(A)$	– детерминант матрицы A ;
$\ (*)\ _p$	– p -ичная норма элемента $(*)$;
$C\{A\}$	– число обусловленности матрицы A ;
$A^{-1}; A^+$	– матрицы обратная и псевдообратная матрице A ;
$\sigma\{A\}; \sigma_\alpha\{A\}$	– алгебраические спектры собственных значений (мод) и сингулярных чисел соответственно матрицы A ;
$[A]$	– интервальная матрица, составленная из интервальных скалярных элементов $[A_{ij}]$;
$V(x)$	– функция Ляпунова векторного аргумента x ;
$\arg\{\psi[(*)]\}$	– аргумент выполнения условия $\psi[(*)]$;
$\text{contr}\{A, B\}$	– предикат наличия полной управляемости пары матриц $\{A, B\}$;
$\text{observ}\{A, C\}$	– предикат наличия полной наблюдаемости пары матриц $\{A, C\}$;
$p=d/dt; s$	– оператор дифференцирования по времени и комплексная переменная преобразования Лапласа соответственно;
SVD	– процедура сингулярного разложения матриц;
OU	– объект управления;
ЗУ	– закон управления;
ОС, ПС	– обратная связь, прямая связь;
ЭМ; ММ	– эталонная модель; модальная модель;
МВВ	– модель внешнего воздействия;
АУ; РУ	– адаптивное управление; робастное управление;
МУ	– модальное управление;
ОМУ (РМУ)	– обобщенное (робастное) модальное управление;
ОИУ	– обобщенное изодромное управление;
МТЧ	– модель траекторной чувствительности;
ФЧ; МФЧ	– функция чувствительности; матрица функций чувствительности.

1. ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМАТИКУ

1.1. Понятие неопределенного объекта. Классификация неопределенностей

Традиционные методы анализа и синтеза систем управления основаны на предположении, что математическая модель объекта является известной и абсолютно точно описывает его поведение. Обычно методы, основанные на этом предположении, объединяют под общим названием *классической теории управления*. Однако для современных подходов к постановке и решению задач управления характерен более критический взгляд на точность математических моделей, имеющих в распоряжении разработчика. Дело в том, что практически любая модель представляет собой идеализированное (т.е. упрощенное) описание реального объекта. Кроме того, некоторые характеристики объекта могут быть заранее неизвестными или значительно изменяться в процессе его функционирования. При этом говорят о *неопределенности математической модели объекта* (или просто – о *неопределенном объекте*, понимая под этим неопределенность его математической модели). Математическую модель, положенную в основу синтеза алгоритма управления, называют *номинальной*.

В условиях существенной неопределенности классические методы теории управления оказываются неприменимыми или дают плохие результаты. В этих случаях необходимо применение специальных методов анализа и синтеза систем управления объектами с неопределенными (т.е. с неточно известными) математическими моделями.

Выделяют следующие основные типы неопределенностей математических моделей.

Параметрическая неопределенность означает, что неизвестными являются постоянные параметры математической модели. Значения параметров, использованные при синтезе алгоритма управления, называют *номинальными*. Во многих практических случаях *реальные* значения параметров могут существенно отличаться от принятых *номинальных*.

Пример 1.1. Типичным примером параметрически неопределенного объекта является безредукторный электропривод, где выходной вал двигателя непосредственно соединен с нагрузкой (см. рис. 1.1, б). Такая схема, например, используется в мехатронных поворотных столах (см. рис. 1.2), что позволяет существенно упростить конструкцию привода, исключить из нее изнашивающиеся и деформирующиеся детали и, как следствие, повысить жесткость всей электромеханической системы.

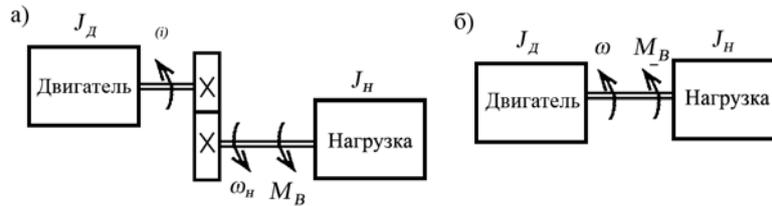


Рис. 1.1. Схемы электроприводов: а – редукторная, б – безредукторная

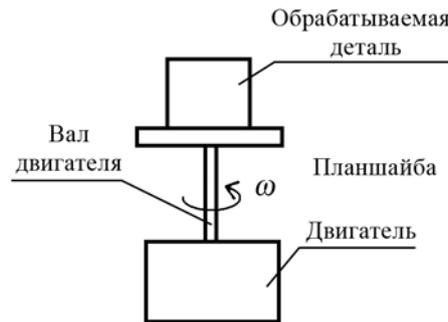


Рис. 1.2. Конструкция мехатронного поворотного стола

При наличии редуктора (рис. 1.1, а) уравнения вращающихся масс (без учета внешнего момента M_B) имеют вид

$$\ddot{\varphi} = \omega, \quad \left(J_D + \frac{J_H}{j^2} \right) \ddot{\varphi} + k_c \omega = M_D. \quad (1.1)$$

В выражении (1.1) и на рис. 1.1 φ, ω – угол поворота и скорость вращения выходного вала двигателя; J_D – момент инерции ротора электродвигателя, J_H – момент инерции нагрузки, k_c – коэффициент вязкого трения, ω – передаточное число редуктора, M_D – вращающий момент, ω_H – скорость вращения нагрузки, $\omega_H = \omega/j$. Так как в большинстве технических систем используются высокоскоростные низкомоментные двигатели, то $j \gg 1$. Поэтому влияние момента инерции нагрузки в редукторных системах ослабляется в (j^2) раз, что позволяет пренебречь членом J_H/j^2 .

При отсутствии редуктора (рис. 1.1, б) уравнения вращающихся масс принимают вид

$$\ddot{\varphi} = \omega, \quad (J_D + J_H) \ddot{\varphi} + k_c \omega = M_D. \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.2) видно, что в безредукторном приводе момент инерции нагрузки непосредственно (т.е. без какого-либо ослабления) влияет на параметры привода. При этом, как правило, $J_H > J_D$. Более

того, во многих практических случаях момент инерции нагрузки заранее точно неизвестен и может изменяться в процессе эксплуатации электропривода. Обычно известен только диапазон $J_{\min} \leq J_H \leq J_{\max}$ возможных значений, так что J_H оказывается *интервальной величиной*. Если данный диапазон оказывается достаточно широким, то модель (1.2) должна рассматриваться в качестве *параметрически неопределенной* с параметрической неопределенностью *интервального типа*. \square

Пример 1.2. Дополним уравнения вращающихся масс (1.2) уравнением электрической цепи якоря электродвигателя постоянного тока в форме

$$\dot{I} = -\frac{R}{L}I - \frac{c_E}{L}\omega + \frac{1}{L}U, \quad (1.3)$$

где I – ток якоря, R и L – активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря, c_E – постоянная противо-эдс, U – входное напряжение. Связь уравнений (1.2) и (1.3) определяется через вращающий момент в соответствии с выражением $M_d = c_M I$, где c_M – коэффициент передачи по моменту. В ходе работы двигатель нагревается, происходит разогрев обмотки якоря, что влечет за собой изменение его активного сопротивления. Если изменение является существенным, то активное сопротивление уже не может больше рассматриваться в качестве известного и постоянного параметра, оно должно быть представлено функцией времени $R(t)$. При этом модель (1.3) принимает вид

$$\dot{I}(t) = -\frac{R(t)}{L}I(t) - \frac{c_E}{L}\omega(t) + \frac{1}{L}U(t), \quad (1.3a)$$

где $R(t)$ несет *параметрическую неопределенность, параметризованную* временем.

Неконтролируемый дрейф активного сопротивления существенно сказывается, например, в двух двигательных приводах (рис. 1.3), вызывая разбаланс якорных токов в двигателях, приводящий к появлению скручивающего момента и преждевременному разрушению рабочего вала электропривода. \square

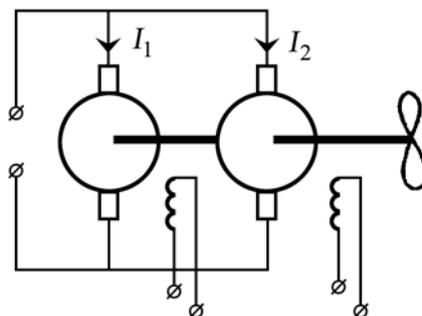


Рис. 1.3. Двухдвигательный электропривод гребной установки судна

Сигнальная неопределенность означает, что на объект управления действует неизмеримый сигнал или сигнал с априори неизвестными параметрами (амплитуда, частота и т.д.) внешнего (экзогенного) или внутреннего (эндогенного) происхождения, такие сигналы, отклоняющие процесс управления от желаемого его хода, принято называть *возмущениями*. □

Функциональная неопределенность означает, что математическая модель объекта содержит *неизвестные* функциональные зависимости координат состояния, регулируемых переменных или сигналов управления.

Пример 1.3. Перепишем уравнение вращающихся масс электропривода (1.2) с учетом приложения внешнего момента M_B в форме

$$\dot{\omega} = \omega, \quad (J_D + J_H)\dot{\omega} + k_c \omega = M_D + M_B. \quad (1.4)$$

Пусть уравнение (1.4) описывает электропривод гребной установки судна. Тогда внешний момент M_B , являющийся в данном случае моментом сопротивления воды, будет представлять достаточно сложную функцию скорости вращения выходного вала, записываемую в форме $M_B = M_B(\omega)$. При этом модель (1.4) примет вид

$$\dot{\omega} = \omega, \quad (J_D + J_H)\dot{\omega} + k_c \omega = M_D + M_B(\omega). \quad (1.4a)$$

В первом приближении функция $M_B = M_B(\omega)$ может быть представлена в виде квадратичной зависимости $M_B(\omega) = -\gamma \text{sign}(\omega)\omega^2$, коэффициент γ которой зависит от многих априори неизвестных факторов (плотности и температуры воды, наличия или отсутствия ледовой крошки и т.п.). В связи с этим модель (1.4a) является *функционально неопределенной*. □

Структурная неопределенность означает, что структура математической модели является неточно известной. Как правило, структурная неопределенность выражается в том, что динамический порядок реального объекта оказывается выше порядка его математической модели. При этом говорят о наличии у объекта *немоделируемой (паразитной) динамики*.

Пример 1.4. Рассмотрим в совокупности электропривод постоянного тока, состоящий из усилителя мощности (см. рис. 1.4, а). Часто при решении задач синтеза замкнутых систем пренебрегают динамикой усилителя мощности. При этом модель усилителя представляют статической зависимостью $U = k_u u$, где u – сигнал управления, k_u – коэффициент усиления усилителя. Объединяя уравнения (1.3) и

(1.4), получим систему соотношений, описывающих модель электропривода постоянного тока (см. рис. 1.4, б):

$$\varphi = \frac{1}{s} \omega; \quad (1.5)$$

$$\omega = \frac{k_\omega}{T_\omega s + 1} (c_M I + M_B); \quad (1.6)$$

$$I = \frac{k_I}{T_I s + 1} (k_u u - c_E \omega); \quad (1.7)$$

где $T_\omega = \frac{J_d + J_H}{k_c}$, $k_\omega = \frac{1}{k_c}$, $T_I = \frac{L}{R}$, $k_I = \frac{1}{L}$.

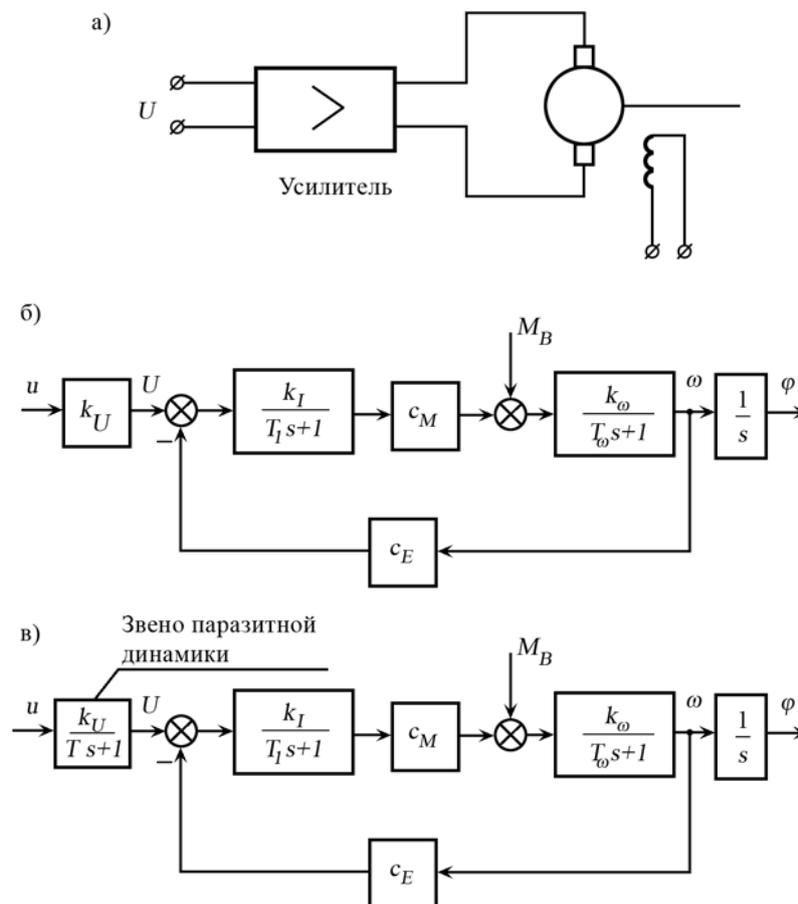


Рис. 1.4. Электропривод постоянного тока

Однако усилитель является инерционным устройством, для его описания наиболее часто используют его представление апериодическим звеном первого порядка. С учетом динамики усилителя мощности математическая модель электропривода (см. рис. 1.4, в) получает аналитическое представление в виде системы соотношений

$$\varphi = \frac{1}{s} \omega; \quad (1.8)$$

$$\omega = \frac{k_\omega}{T_\omega s + 1} (c_M I + M_B); \quad (1.9)$$

$$I = \frac{k_I}{T_I s + 1} (k_u u - c_E \omega); \quad (1.10)$$

$$U = \frac{k_u}{T_U s + 1} u, \quad (1.11)$$

где T_U – малая постоянная времени усилителя мощности. Полная модель (1.8)–(1.11) отличается от упрощенной (1.5)–(1.7) на единицу большей размерностью, что порождено дополнительным уравнением (1.11), представляющим собой *паразитную динамику*.

Наконец, отметим, что на этапе синтеза управления *неопределенности* делятся на *априорные и текущие вариации* параметров математической модели. Априорная неопределенность существует уже на этапе синтеза системы. Она может быть обусловлена отсутствием информации о свойствах объекта управления и условиях его функционирования, отсутствием точного математического описания объекта, технологическим разбросом параметров элементов системы управления, вносимого при их производстве и т.д. Текущие вариации параметров математической модели объекта представляют собой нежелательные их изменения в ходе его рабочей эксплуатации. Причинами таких вариаций могут быть: изменение свойств нагрузки (например, момента инерции нагрузки), нагрев обмоток двигателя, приводящий к изменению их активного сопротивления, уменьшение массы топлива в баках ракеты или самолета, приводящее к изменению массы, изменение режима работы объекта и свойств внешней среды.

Строго говоря, большинство реальных объектов, с точки зрения точности их математических моделей, являются в той или иной степени *неопределенными*.

1.2. Проблемы управления в условиях неопределенности

При синтезе систем управления неопределенными объектами необходимо ответить на следующие два вопроса.

Вопрос № 1. *Можно ли использовать методы классической теории управления неопределенными объектами и, если можно, то как оценить влияние на качество замкнутой системы возможных отклонений свойств реального объекта от свойств принятой номинальной модели?*

Единой теории, дающей ответ на поставленный вопрос, в настоящее время не предложено. Более того, возможны различные вари-

анты его формальной (более конкретизированной) постановки. Поэтому укажем несколько альтернативных подходов, позволяющих ответить на поставленный вопрос в его различных постановках или для ряда важных частных случаев:

1) *теория грубости свойств* систем управления позволяет определить условия, при которых сохраняется то или иное желаемое свойство замкнутой системы при изменениях ее математической модели.

2) *теория чувствительности* использует гипотезу малости вариаций (неопределенности) параметров относительно их номинальных значений и с помощью функций чувствительности позволяет оценивать влияние параметрической неопределенности на траектории системы и показатели их качества

3) *теория интервальных систем* допускает гипотезу произвольной неопределенности параметров, принадлежащих прямоугольному параллелепипеду в пространстве параметров, и решает задачу поиска условий гурвицевой устойчивости для значений вектора параметров, соответствующих угловым точкам параллелепипеда;

4) *теория сингулярно возмущенных систем* позволяет исследовать свойства замкнутых систем управления с паразитной динамикой.

Вопрос № 2. *Если нельзя использовать методы классической теории, то как управлять неопределенными объектами?*

Ответ на этот вопрос дает теория *адаптивных и робастных систем*. Таким образом, теория адаптивных и робастных систем изучает методы управления неопределенными объектами, для которых являются неприменимыми методы классической теории управления.

1.3. Основные методы управления неопределенными объектами

Классификация основных методов управления неопределенными объектами приведена на рис. 1.5.

Робастные {грубые} системы – это системы управления, обеспечивающие приемлемое (в смысле некоторого критерия) качество при наличии параметрических, сигнальных, функциональных или структурных неопределенностей объекта управления. При этом, как правило, в ходе рабочего *функционирования системы коэффициенты регулятора не подстраиваются*, а малая чувствительность (т.е. грубость или робастность) к различного рода вариациям математической модели объекта достигается за счет специальным образом выбранной структуры регулятора (алгоритма управления).

Таким образом, робастные системы относятся к классу *ненастраиваемых* систем управления, а их *малая чувствительность* к различного рода вариациям математической модели объекта обеспечивается на этапе синтеза алгоритма управления.

Адаптивные (самонастраивающиеся) системы – это системы управления, обеспечивающие компенсацию параметрических, сигнальных, функциональных или структурных неопределенностей объекта управления за счет автоматической подстройки регулятора в ходе рабочего функционирования системы. Другими словами, адаптивные системы восполняют нехватку априорной информации об объекте управления в ходе рабочего функционирования. В этом смысле они могут также называться *самообучающимися системами*.

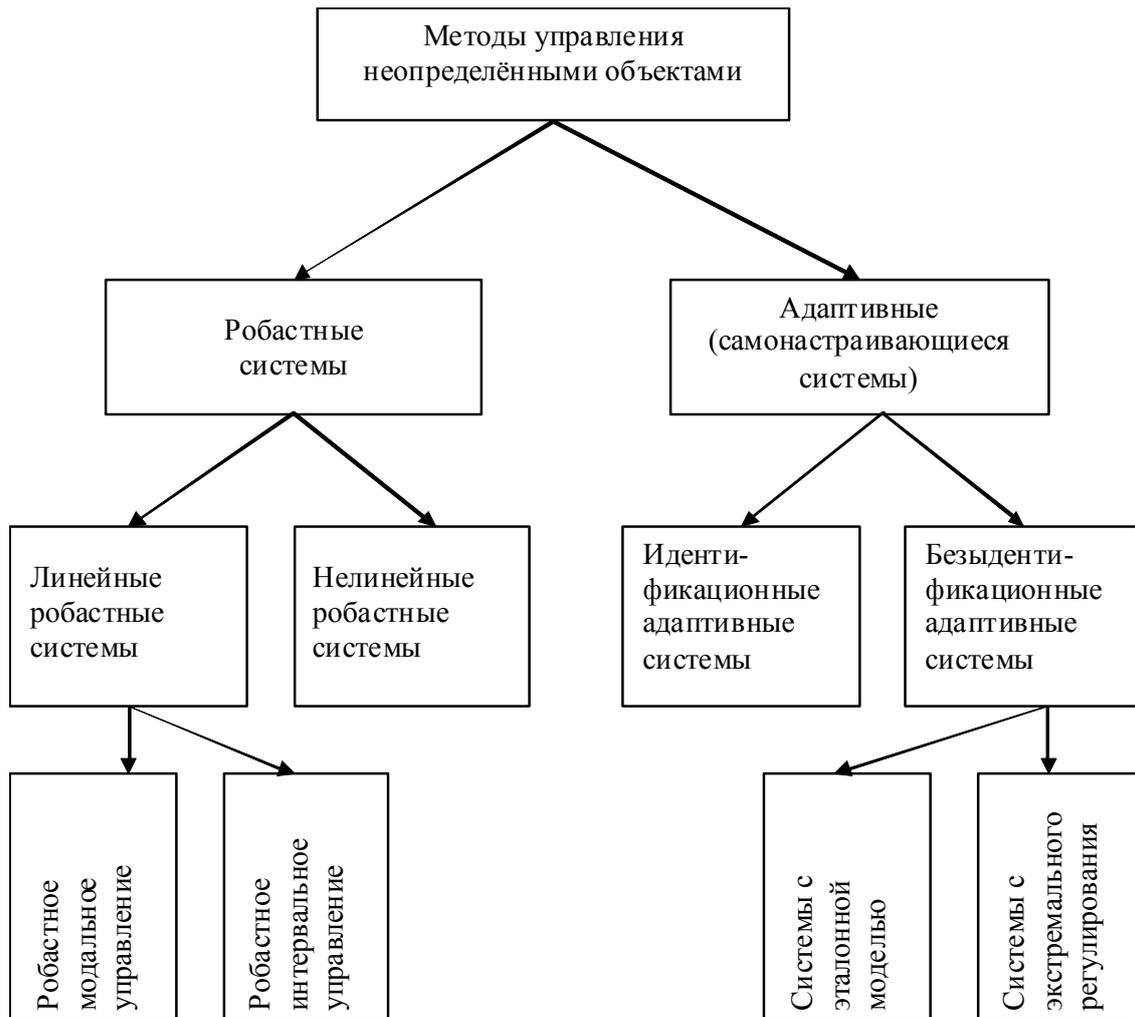


Рис.1.5. Классификация методов управления неопределенными объектами

Линейные робастные системы, использующие для решения задач управления в условиях параметрической неопределенности методы *робастного модального управления*, опираются на возможности *обобщенного модального управления*, которое доставляет матрице состояния проектируемой системы желаемые алгебраический спектр собственных значений и геометрический спектр собственных векторов. Алгоритмы *обобщенного модального управления* в условиях параметрической неопределен-

ности матричных компонентов модельного представления объекта относятся к классу *неадаптивных*. Эти алгоритмы используют такой базис векторно-матричного представления объекта управления, в котором параметрическая неопределенность заключена в неопределенности только его матрицы состояния.

Возможности алгоритмов *обобщенного модального управления* в условиях параметрической неопределенности реализуются в двух версиях: *модально робастного управления* и *управления*, доставляющего проектируемой системе *параметрическую инвариантность* ее выходов относительно параметрического "внешнего" входа. В первой версии *робастного модального управления*, реализуемого в алгоритмической среде *обобщенного модального управления*, требуемые динамические показатели процессов в установившемся и переходном режимах доставляются проектируемой системе назначением желаемого спектра собственных значений (мод) номинальной реализации ее матрицы состояния. Стабильность этих показателей при известной неопределенности матрицы состояния объекта (иными словами, их *робастность*) обеспечивается *модальной робастностью* путем минимизации числа обусловленности матрицы собственных векторов номинальной реализации матрицы состояния системы и контролем нормы матрицы состояния модальной модели, что позволяет гарантировать требуемое значение мажорантной оценки областей локализации мод матрицы состояния спроектированной системы. Во второй версии *робастного модального управления* алгоритмическими возможностями *обобщенного модального управления* номинальной реализации матрицы состояния системы доставляется такой спектр собственных векторов, элементы которого совпадают с матрицами-столбцами входа доминирующих параметрических внешних воздействий, полученных столбцово-строчной факторизацией матричного компонента матрицы состояния объекта, несущего информацию об ее параметрической неопределенности. Если полученную выше неполную управляемость отношения "параметрический вход – состояние системы" дополнить обеспечением принадлежности матриц-столбцов ядру матрицы выхода, то тем самым достигается полная неуправляемость отношения "параметрическое внешнее воздействие – выход системы" или, иначе, *параметрическая инвариантность выхода* проектируемой системы.

Интервальное робастное управление, как и в предыдущем случае, использует векторно-матричное описание объектов, интервальность значений первичных физических параметров которого приводит к интервальному представлению только его матрицы состояния, декомпозируемой на медианную и интервальную составляющие, характеризующуюся тем свойством, что все угловые реализации последней обладают одинаковыми нормами. При реализации *интервального робастно-*

го управления в алгоритмической среде обобщенного модального управления требуемое качество процессов в проектируемой системе обеспечивается назначением желаемой структуры мод медианной составляющей матрицы состояния системы с одновременным контролем значения оценки относительной интервальности этой матрицы путем измерения нормы медианной составляющей матрицы состояния системы при известной априори норме интервальной составляющей матрицы состояния объекта с последующей оценкой *относительной интервальности* показателей качества, понимаемых как *оценки робастности* при использовании интервальных модельных представлений параметрической неопределенности.

В *нелинейных робастных системах* малая чувствительность к различным вариациям математической модели объекта управления обеспечивается за счет дополнительного введения в алгоритм управления специальной статической нелинейной обратной связи (см. рис. 1.6). При этом даже для линейных объектов управления закон управления оказывается нелинейным. Свойство статических нелинейных законов управления улучшать качество замкнутых систем или обеспечивать нулевую чувствительность к параметрическим или сигнальным возмущениям было установлено достаточно давно. В современном виде метод нелинейного робастного управления был сформулирован в последней трети прошлого века и продолжает развиваться и поныне.

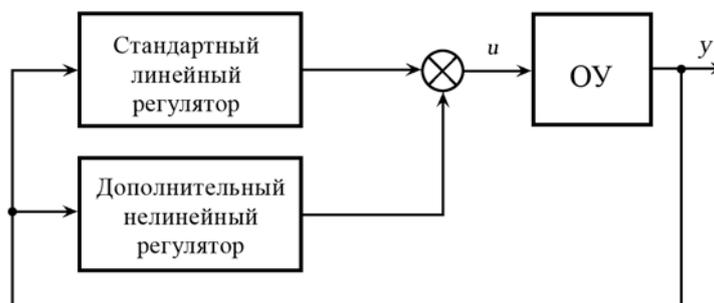


Рис. 1.6. Система нелинейного робастного управления

Принцип построения *идентификационных адаптивных систем* (или систем с *косвенной адаптацией*) основан на использовании процедуры идентификации объекта, т.е. на получении оценок его параметров или динамических характеристик. Полученные оценки используются далее для расчета коэффициентов регулятора. Таким образом, в своей структуре идентификационные адаптивные системы содержат (см. рис. 1.7) блок (алгоритм) идентификации, вырабатывающий оценки \hat{q} неизвестных параметров объекта управления, блок расчета параметров регулятора \hat{k} и собственно настраиваемый регулятор. Очевидно, что при стремлении оценок параметров объекта к истинным свойства замкнутой системы будут приближаться к желаемым.

Несмотря на простоту основной идеи, системы с косвенной адаптацией обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, описанная выше стратегия требует дополнительного времени на изучение объекта, что приводит к задержке при выработке правильного управления. Во-вторых, цели функционирования настраиваемого регулятора и блока оценки параметров оказываются, по существу, различными. Цель функционирования регулятора – обеспечение желаемого поведения регулируемой переменной y , в то время как цель блока идентификации – получение оценок параметров объекта управления. В этом смысле цепь настройки параметров оказывается разомкнутой по главной цели управления со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями. В частности, большая ошибка в управлении регулируемой переменной y *может* никак не сказываться на скорости сходимости по параметрическим оценкам \hat{q} и, в свою очередь, не ускорять процессы настройки регулятора.

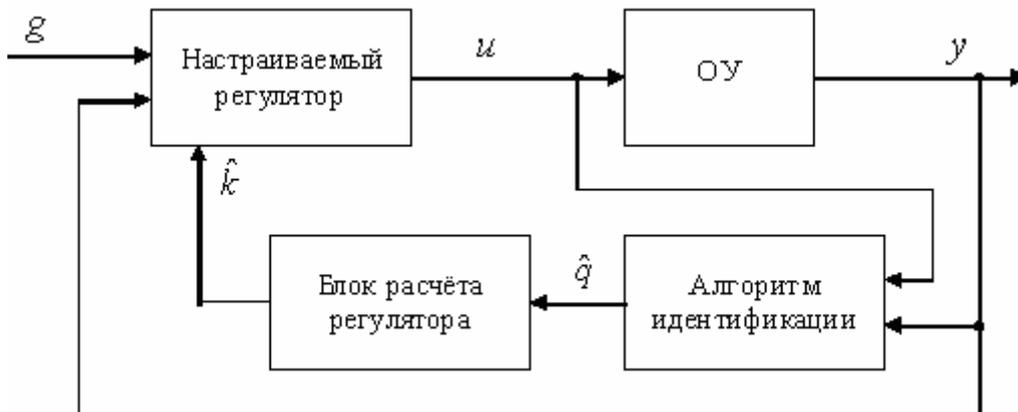


Рис. 1.7. Система идентификационного адаптивного управления

Более совершенной является стратегия, состоящая в настройке параметров регулятора из условия минимизации ошибки управления. При этом и настраиваемый регулятор, и блок (алгоритм) его настройки объединяются единой целью функционирования. На таком принципе основаны *безыдентификационные адаптивные системы* (или *системы с прямой адаптацией*). В таких системах цель управления задается либо с помощью *эталонного (модельного)* значения регулируемой переменной $y_M(t)$, либо с помощью некоторого числового *критерия качества* $Q = Q(y(t))$.

Для выработки эталонного значения регулируемой переменной $y_M(t)$, как правило, используется специальный динамический блок – *эталонная модель* (отсюда второе название эталонной переменной – модельная переменная). Наиболее часто эталонная модель реализуется в виде линейной системы, формирующей желаемый отклик на задающее воздействие (см. рис. 1.8). Настраиваемый регулятор строится таким об-

разом, чтобы при соответствии его коэффициентов параметрам объекта управления замкнутая система вела себя точно так же, как эталонная модель. Тогда информацию о параметрических рассогласованиях в системе будет нести ошибка слежения за эталонной моделью $\varepsilon = y - y_M$. При этом в качестве цели работы *алгоритма адаптации* (или *алгоритма настройки коэффициентов регулятора*) естественно положить минимизацию ошибки $\varepsilon = y - y_M$. Таким образом, происходит объединение самого регулятора и алгоритма его адаптации единой целью – минимизацией ошибки слежения за эталонной моделью. Отметим, что, в отличие от идентификационного подхода, в данном случае не требуется проведения процедуры оценки неизвестных параметров объекта, а коэффициенты регулятора настраиваются непосредственно из условия выполнения главной цели управления.

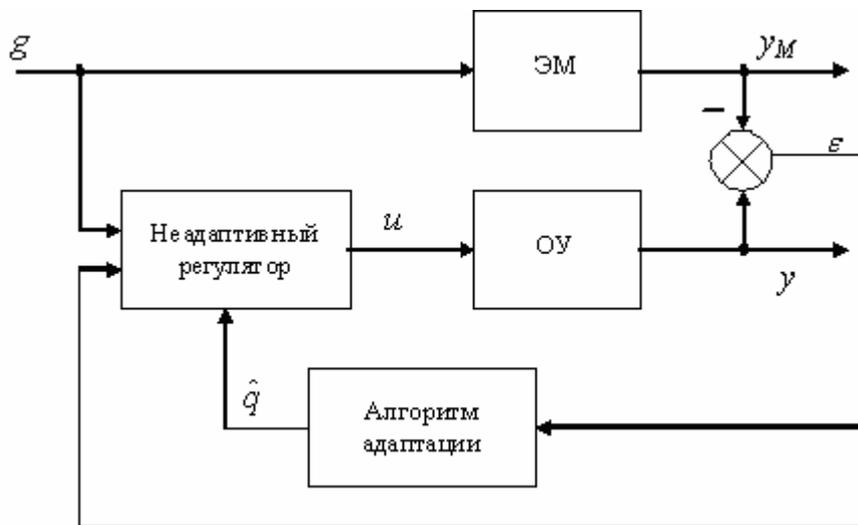


Рис .1.8. Система адаптивного управления с эталонной моделью

Описанные системы получили название *адаптивных систем с эталонной моделью* (рис. 1.8). В настоящее время адаптивные системы с эталонной моделью представляют собой хорошо разработанный класс адаптивных систем, получивших наиболее широкое распространение в практических реализациях и широко представленных в научной литературе.

Альтернативный подход к построению безыдентификационных адаптивных систем – сформировать некоторый критерий качества $Q = Q(y(t))$, значение которого достигает минимума (максимума) при соответствии коэффициентов регулятора параметрам объекта управления. Тогда настройку параметров объекта управления можно вести из условия минимизации (максимизации) критерия качества. Самонастраивающиеся системы, основанные на таком принципе, получили названия *систем экстремального регулирования*. Их структура представлена на рис. 1.9.

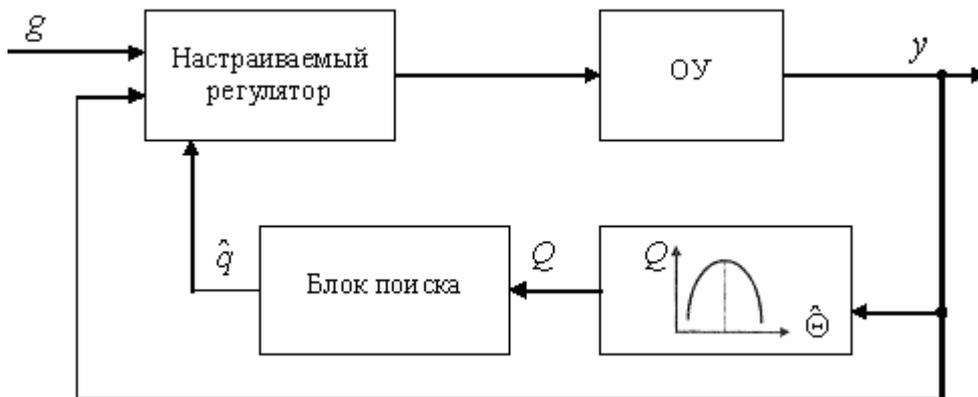
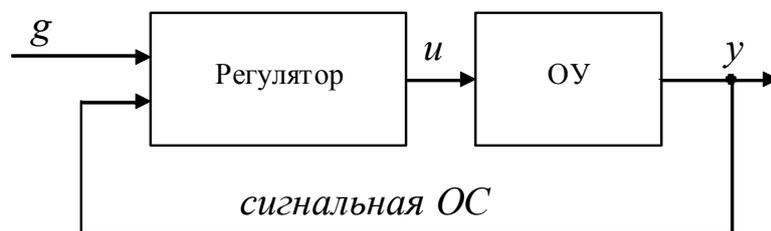


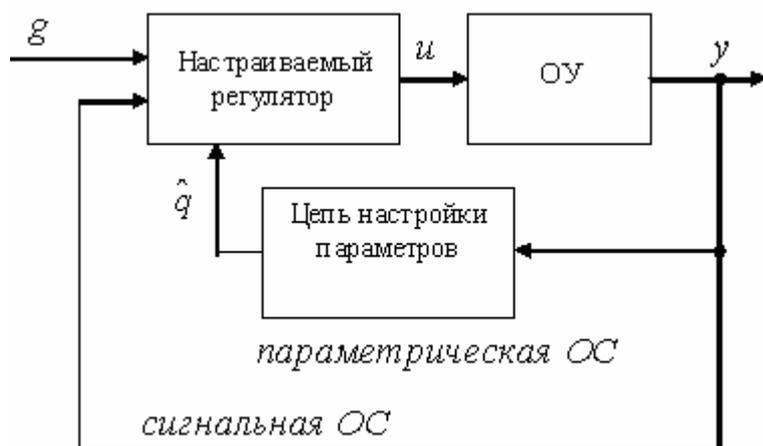
Рис.1.9. Система экстремального регулирования

Сравнивая структурные схемы, представленные на рис. 1.7, 1.8 и 1.9, можно сделать вывод, что основной отличительной чертой адаптивных (самонастраивающихся) систем является наличие дополнительной обратной связи, образованной цепью настройки параметров регулятора. Такая обратная связь получила название *параметрической*, в отличие от *сигнальной* обратной связи, образованной непосредственно регулятором.

Обобщенные структурные схемы систем, *робастность* (малую чувствительность) которых обеспечивается *неадаптивными* и *адаптивными методами управления*, приведены на рис. 10.



а)



б)

Рис.1.10. Обобщенные схемы робастных замкнутых систем:
а – неадаптивная, б – адаптивная