

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 19.01.2022 18:25:44

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d088

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)**

Кафедра механики, мехатроники и робототехники



УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ И РОБОТАМИ

**Методические рекомендации по выполнению самостоятельной
работы по дисциплине**

**«Управление мехатронными системами и роботами»
по направлению 15.04.06 - «Мехатроника и робототехника»**

Курск 2016

УДК 681.5.01

Составители: С.Ф. Яцун, П.А. Безмен

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры механики,
мехатроники и робототехники

Е.Н. Политов

Управление мехатронными системами и роботами: методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Управление мехатронными системами и роботами» по направлению 15.04.06 - «Мехатроника и робототехника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: С.Ф. Яцун, П.А. Безмен; Курск, 2016. 94 с.: ил. 19, табл. 1. Библиогр.: с. 91.

Содержат сведения по вопросам синтеза систем автоматического управления для мехатронных систем и роботов. Рассмотрены законы управления электроприводами постоянного и переменного тока, а также робототехническими системами. Приведены математические модели пространственного движения мобильных мехатронных систем.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утверждённой учебно-методическим объединением (УМО).

Предназначены для студентов направления 15.04.06 - «Мехатроника и робототехника» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Введение	4
Тема 1. Управление электроприводами постоянного тока.....	6
1.1. Математическая модель электропривода постоянного тока..	8
1.2. Особенности процедуры синтеза законов управления ЭПТ	11
1.3. Синтез законов управления ЭПТ	14
1.4. Энергосберегающее управление ЭПТ	20
Тема 2. Управление электроприводами переменного тока	26
2.1. Частотно-регулируемый ЭП с управлением по вектору потокосцепления ротора	27
2.2. Синтез законов управления электроприводом с АД	36
Тема 3. Управление робототехническими системами	39
3.1. Задача синтеза иерархических систем управления	40
3.2. Системы управления мобильными роботами.....	44
3.3. Математическое описание поведения мобильного колесного робота.....	54
Тема 4. Управление пространственным движением.....	61
4.1. Математическое описание пространственного движения твердого тела	63
4.2. Иерархическая структура математических моделей движения	72
4.3. Математическая модель пространственного движения воздушного летательного аппарата	77
4.4. Математическая модель движения космического летательного аппарата	85
4.5. Математическая модель пространственного движения автономного подводного аппарата	87
Список литературы	91

Введение

Механические и электромеханические системы играют ключевую роль в различных областях современной техники, являясь исполнительным ядром подавляющего большинства промышленных и транспортных установок, агрегатов, бытовых и сервисных устройств.

Основным приоритетом развития таких систем является автоматизация, т.е. снижение степени непосредственного участия человека в их работе и передача типовых функций управления автоматическим регуляторам. Введение в общую структуру этих систем автоматических регуляторов с соответствующими информационными компонентами (датчиками, вычислительными средствами) приводит к естественной «интеллектуализации» силового оборудования. Кроме того, в последнее время наметилась явная тенденция к интеграции электромеханических, электронных и информационных элементов в единые мехатронные модули. Это позволяет минимизировать число функциональных и силовых промежуточных преобразований и заметно улучшить такие показатели систем, как компактность, надежность и стоимость.

В последнее время получил развитие новый подход к проблеме управления, который базируется на принципах направленной самоорганизации и декомпозиции нелинейных динамических систем. На основе указанного подхода осуществлен прорыв в трудной проблеме синтеза систем управления широким классом нелинейных многомерных многосвязных объектов, что позволило на базе концепции инвариантных многообразий впервые разработать общую теорию и методы АКАР – аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Данные методы позволяют аналитически синтезировать эффективные законы управления для нелинейных, многомерных и многосвязных динамических систем различной природы [1].

Повышение эффективности современного технологического оборудования напрямую связано с совершенствованием процессов

автоматического управления входящими в его состав электроприводов (ЭП).

При проведении различного рода однотипных операций или работ в среде, оказывающей нежелательное воздействие на человека и тем самым полностью исключаяющим его присутствие, все большее применение получают робототехнические системы (РТС). В промышленной сфере основное внимание уделяется автоматизации и комплексной механизации многих технологических процессов производства на основе РТС. При этом все увеличивающийся спектр задач требует разработки систем автоматического управления, сочетающих в себе возможность самостоятельного принятия решений при изменении параметров среды и отвечающих требованиям быстрого и многократного изменения технологических заданий. Создание нового поколения РТС, надежно функционирующих в максимально возможной области режимов работы, обладающих высокой маневренностью и интеллектуальными свойствами продолжает оставаться одним из приоритетных направлений развития современной техники. Проблема построения нового поколения высокоэффективных РТС приводит к необходимости решения целого комплекса разнообразных задач, к которым в частности относятся: совершенствование кинематических схем; обработка сенсорной и навигационной информации от бортовых датчиков и приборов; учет динамических свойств среды и др. Особую значимость приобретает задача разработки новых законов управления, которые не только гарантируют требуемое движение РТС при выполнении своей технологической миссии в условиях неформализованной внешней среды, но и обеспечивают максимально эффективное использование конструктивных особенностей РТС [1].

Тема 1. Управление электроприводами постоянного тока

Электрические приводы постоянного тока (ЭПТ) являются ключевым элементом большого числа современных производственных и транспортных систем. Несмотря на известные недостатки коллекторных машин и наметившуюся тенденцию к использованию более дешевых и надежных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, нетрудно предположить, что в ближайшем будущем ЭПТ будут модернизироваться и эксплуатироваться в широких масштабах и, следовательно, сохранят свою значимость. В связи с этим проблема проектирования наиболее эффективных систем управления ЭПТ остается достаточно актуальной. Заметим также, что исторически первый управляемый электропривод был построен именно на основе ЭПТ.

Среди систем автоматического управления ЭПТ наибольшее распространение получили системы подчиненного и модального регулирования [2-5], при этом в процедуре синтеза автоматических регуляторов используются линеаризованные математические модели ЭПТ, а управление осуществляется по одному каналу или иногда по двум каналам попеременно (системы двухзонного регулирования). В наибольшей степени процедуры синтеза линейных регуляторов формализованы для электропривода с двигателем постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения при управлении по каналу цепи якоря. Это неудивительно, т.к. в этом случае (при постоянном потоке возбуждения) математическая модель ЭПТ линеаризуется «естественным» образом, и появляется возможность достаточно успешно применять стандартные методики каскадной настройки контуров регулирования. Однако и здесь зачастую возникают определенные трудности, связанные с компенсацией естественной обратной связи по ЭДС двигателя, которая при синтезе контуров регулирования фактически игнорируется. При синтезе регуляторов для второй зоны, когда управление двигателем производится путем изменения магнитного потока при постоянстве напряжения якоря, используют модели ЭПТ, линеаризованные в малой окрестности

определенного стационарного режима, что, очевидно, ограничивает диапазон эффективного регулирования.

Использование наиболее адекватных нелинейных математических моделей в процедурах синтеза регуляторов и векторный (многоканальный) принцип управления не только позволяют естественным образом преодолеть указанные выше трудности, но и предоставляют новые возможности для повышения энергетической эффективности процессов в электроприводе и организации разнообразных вариантов механического движения [1].

1.1. Математическая модель электропривода постоянного тока

Силовой канал электропривода в общем случае включает в себя электрический, электромеханический и механический преобразователи энергии [2-5]. Современный ЭПТ, как правило, строится по принципу «управляемый выпрямитель напряжения – двигатель», когда электрическая энергия подается на обмотки двигателя через управляемые преобразователи, позволяющие в широком диапазоне изменять напряжение на обмотке якоря или обмотке возбуждения двигателя. Учитывая высокую скорость протекания электрических процессов в преобразователях по сравнению с остальными частями электропривода (ЭП), в дальнейшем будем считать их безынерционными элементами.

Механическая часть ЭП представляет собой совокупность различных передаточных и трансмиссионных механизмов, которые предназначены для количественного и качественного преобразования вращательного движения вала двигателя в соответствии с задачами, решаемыми ЭП в конкретном технологическом процессе. В общем случае механическую часть ЭП можно представить как набор вращающихся масс, соединенных упругими связями. В тех распространенных на практике случаях, когда упругостью механических связей можно пренебречь, влияние механической части и обслуживаемой технологической машины допустимо представить в виде суммарного момента сопротивления нагрузки M_{Σ} , приведенного к валу двигателя. В дальнейшем будем считать, что M_{Σ} складывается из момента, являющегося известной функцией угловой скорости вала двигателя $M_c(\omega)$ (например, момент трения, «вентиляторный» момент и т.д.) и неизвестного возмущающего момента $M_f(t)$.

На основании принятых выше допущений можно записать систему дифференциальных уравнений, описывающую динамику электромеханических процессов в ЭПТ:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}(t) &= \omega \\
 J \dot{\omega}(t) &= c\Phi i_{\text{я}} - M_c(\omega) - M_f(t) \\
 u_{\text{я}} &= i_{\text{я}} r_{\text{я}} + L_{\text{я}} \dot{i}_{\text{я}}(t) + c\omega\Phi \\
 u_{\text{в}} &= f_1(\Phi) r_{\text{в}} + 2pw_{\text{в}} \dot{\Phi}(t)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

где:

θ и ω - угол поворота и угловая скорость привода;

$i_{\text{я}}$ - ток в обмотке якоря;

Φ - магнитный поток одного полюса;

$u_{\text{я}}$ и $u_{\text{в}}$ - напряжения на обмотках якоря и возбуждения соответственно;

$f_1(\Phi)$ - функция, характеризующая процесс насыщения магнитной системы двигателя и обратная известной функции намагничивания;

$r_{\text{я}}$ и $r_{\text{в}}$ - активные сопротивления цепей якоря и возбуждения;

$L_{\text{я}}$ - индуктивность цепи якоря;

J - приведенный момент инерции электропривода;

$w_{\text{в}}$ - число витков на полюс обмотки возбуждения;

c и p - конструктивная постоянная и число пар полюсов двигателя соответственно.

Система (1.1) записана относительно четырех независимых переменных: θ , ω , $i_{\text{я}}$ и Φ , динамика которых, в свою очередь, зависит от внешних воздействий: управляющих - $u_{\text{я}}$, $u_{\text{в}}$ и возмущающего - $M_f(t)$. Значение $M_f(t)$ в любой момент времени априори неизвестно и его игнорирование может привести к ухудшению качества регулирования в динамических и стационарных режимах функционирования электропривода. Таким образом, эффективное управление электроприводом должно отвечать требованиям инвариантности, т.е. система должна обладать способностью прогнозировать возможные возмущения и компенсировать их нежелательное действие. В синергетической теории управления [6, 7] для решения задач инвариантности и

адаптации применяются подходы, основанные на построении динамических наблюдателей переменных, параметров, возмущений или использовании принципов астатического регулирования, когда в структуру закона управления вводятся дополнительные динамические составляющие. При этом в процедуре синтеза используется модель расширенной системы - «модель синергетического синтеза», которая описывает не только динамику управляемого объекта, но и предполагаемый класс возмущений, параметров, задающих воздействий и т.д.

В рассматриваемом случае в модель ЭПТТ (1.1) вместо возмущающего воздействия $M_f(t)$ вводится переменная $z_1(t)$, и на основании априорных качественных знаний о возможном характере изменения неизмеряемого возмущения во времени и конкретных целей управления записываются дополнительные дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= h_1(\theta, \omega, i_{я}, \Phi, z_1, \dots, z_r) \\ &\dots \\ \dot{z}_r(t) &= h_r(\theta, \omega, i_{я}, \Phi, z_1, \dots, z_r) \end{aligned} \tag{1.2}$$

Здесь z_1, \dots, z_r - координаты информационной модели возмущающих воздействий. Аналогичным образом поступают при необходимости учитывать флуктуацию параметров, изменение во времени задающих воздействий, отсутствие средств измерения некоторых переменных и другие особенности, возникающие в реальных условиях эксплуатации электропривода [4].

1.2. Особенности процедуры синтеза законов управления ЭПТ

В общем случае задача синтеза законов управления сводится к поиску аналитической зависимости управляющих воздействий от координат состояния объекта, т.е. совокупности соответствующих обратных связей, которые обеспечивают перевод объекта из произвольного начального состояния (в некоторой допустимой области) в желаемое конечное состояние.

В соответствии с числом независимых каналов управления для ЭПТ может быть назначено два инварианта (свойства), при этом один из них, как правило, технологический (например, стабилизация угловой скорости, позиционирование в заданное положение и т.д.). Этот инвариант отражает определенную задачу по организации желаемого механического движения, решаемую приводом в составе конкретной технологической установки. Второй инвариант – энергетический или электромагнитный формируется, исходя из дополнительных требований, связанных со спецификой процессов электромеханического преобразования энергии в данной электрической машине. В нашем случае задание дополнительного инварианта соответствует необходимости гибкого и целенаправленного управления магнитным потоком двигателя.

Анализируя математическую модель ЭПТ (1.1), можно заметить, что управляющие воздействия u_a и u_b входят в дифференциальные уравнения, отражающие динамику изменения тока якоря и магнитного потока. Поэтому целесообразно выбрать параллельную совокупность инвариантных многообразий (ИМ) следующего общего вида:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= i_a - \varphi_1(\theta, \omega, z_1) = 0 \\ \psi_2 &= \Phi - \varphi_2(\theta, \omega, z_1) = 0\end{aligned}\tag{1.3}$$

Таким образом, функции $\varphi_1(\theta, \omega, z_1)$ и $\varphi_2(\theta, \omega, z_1)$ будут соответственно определять характер изменения тока якоря и магнитного потока на пересечении ИМ $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$.

Решив систему функциональных уравнений метода АКАР:

$$\begin{aligned} T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 &= 0 \\ T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1.4)$$

В силу модели синтеза (1.1), (1.2), можно найти обобщенный закон управления ЭПТ:

$$\begin{aligned} u_{я} &= a_3 i_{я} + a_1 \omega \Phi + \frac{1}{T_1 a_4} (\varphi_1 - i_{я}) + \frac{1}{a_4} \left[\frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} \omega + \frac{\partial \varphi_1}{\partial \omega} (a_1 i_{я} \Phi - M_c - z_1) a_2 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_1} h_1 \right] \\ u_6 &= a_5 f_1(\Phi) + \frac{1}{T_2 a_6} (\varphi_2 - \Phi) + \frac{1}{a_6} \left[\frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} \omega + \frac{\partial \varphi_2}{\partial \omega} (a_1 i_{я} \Phi - M_c - z_1) a_2 + \frac{\partial \varphi_2}{\partial z_1} h_1 \right] \end{aligned} \quad (1.5)$$

Этот закон при $T_1 > 0$ и $T_2 > 0$ обеспечивает асимптотически устойчивое изменение состояния замкнутой системы из произвольных начальных условий (в некоторой допустимой области) к пересечению ИМ $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$. Здесь и далее: $a_1 = c$, $a_2 = 1 / J$, $a_3 = r_{я}$, $a_4 = 1 / L_{я}$, $a_5 = r_{в}$, $a_6 = 1 / (2p w_{в})$.

Динамика замкнутой системы (1.1), (1.2), (1.5) на пересечении ИМ будет описываться декомпозированной моделью:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}(t) &= \omega \\ \dot{\omega}(t) &= (a_1 \varphi_1 \varphi_2 - M_c(\omega) - z_1) a_2 \\ \dot{z}_1(t) &= f_1(\theta, \omega, \varphi_1, \varphi_2, z_1, \dots, z_r) \\ &\dots \\ \dot{z}_r(t) &= f_r(\theta, \omega, \varphi_1, \varphi_2, z_1, \dots, z_r) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Первые два уравнения системы (1.6) фактически характеризуют изменение механических переменных ЭПТ во времени. Следовательно, определив должным образом функции $\varphi_1(\theta, \omega, z_1)$ и $\varphi_2(\theta, \omega, z_1)$, можно организовать необходимые режимы механического движения электропривода. Как правило, функция $\varphi_2(\theta, \omega, z_1)$ задается в (1.3) явным образом, тогда многообразие $\psi_2 = 0$ будет тождественно выбранному электромагнитному или энергетическому инварианту. Например, если $\varphi_2(\theta, \omega, z_1) = \Phi^*$ и ψ_2

$= \Phi - \Phi^*$, то электромагнитным инвариантом управляемой системы является стабилизация магнитного потока двигателя в значении Φ^* . Функция $\varphi_1(\theta, \omega, z_1)$ формируется в ходе анализа декомпозированной системы (1.6) в соответствии с решаемой задачей управляемого механического движения электропривода и отражает тот или иной технологический инвариант. Доопределив функции $\varphi_1(\theta, \omega, z_1)$ и $\varphi_2(\theta, \omega, z_1)$, можно придать закону управления ЭПТТ (1.5) конкретный вид и, следовательно, решить поставленную задачу синтеза.

1.3. Синтез законов управления ЭПТТ

Задача управления угловой скоростью, к которой относятся такие типовые режимы работы, как разгон, торможение, реверс, выход на новое установившееся значение скорости, является наиболее характерной задачей управления электроприводом. В этом случае первое уравнение системы (1.2) несущественно, а технологическим инвариантом синтезируемой системы является соотношение

$\omega = \omega^* = \text{const}$. Будем считать, что возмущающее воздействие имеет кусочно-постоянный характер изменения во времени: $M_f(t) = \text{const}$. Тогда в процедуре синергетического синтеза целесообразно использовать следующую модель расширенной системы:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}(t) &= (a_1 i_{я} \Phi - M_c(\omega) - z_1) a_2 \\ \dot{i}_{я}(t) &= (u_{я} - a_1 \Phi \omega - a_3 i_{я}) a_4 \\ \dot{\Phi}(t) &= (u_{\Phi} - a_5 f_1(\Phi)) a_6 \\ \dot{z}_1(t) &= \beta(\omega - \omega^*)\end{aligned}\tag{1.7}$$

где: $z_1 = \hat{M}_f(t)$ - оценка возмущающего воздействия, β - некоторая величина.

Поставим задачу синтезировать закон управления $u_{я}(\omega, i_{я}, \Phi, z_1)$ и $u_{\Phi}(\omega, i_{я}, \Phi, z_1)$, обеспечивающий стабилизацию угловой скорости $\omega = \omega^*$ и магнитного потока двигателя $\Phi = \Phi^*$ и обладающий свойством инвариантности к действию неизвестного кусочно-постоянного возмущающего момента. В соответствии с изложенной методикой и заданными инвариантами системы, введем следующую совокупность ИМ:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= i_{я} - \varphi_1(\omega, z_1) = 0 \\ \psi_2 &= \Phi - \Phi^* = 0\end{aligned}\tag{1.8}$$

Динамика замкнутой системы на пересечении этих многообразий описывается декомпозированной моделью:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}(t) &= (a_1\varphi_1(\omega, z_1)\Phi^* - M_c(\omega) - z_1)a_2 \\ \dot{z}_1(t) &= \beta(\omega - \omega^*)\end{aligned}\quad (1.9)$$

Определим вид функции $\varphi_1(\omega, z_1)$ в соответствии с технологическим инвариантом. Очевидно, что при

$$\varphi_1(\omega, z_1) = \frac{1}{a_1\Phi^*} \left(M_c(\omega) + z_1 - \frac{b_1}{a_2}(\omega - \omega^*) \right) \quad (1.10)$$

первое уравнение (1.9) преобразуется в уравнение

$$\dot{\omega}(t) = -b_1(\omega - \omega^*)$$

обладающего при $b_1 > 0$ свойством асимптотической устойчивости относительно заданного стационарного состояния $\omega = \omega^*$. Эти рассуждения справедливы для модели синтеза (1.7), которая отлична от реальной модели (1.1) введением координаты z_1 вместо возмущающего момента $M_f(t)$. Согласно методу АКАР, поставленная задача стабилизации угловой скорости решается и для реальной модели, что можно показать, анализируя динамику замкнутой системы на пересечении ИМ. Действительно, при $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$ величина тока якоря определяется из выражения (1.10), а магнитный поток стабилизирован в заданном значении, т.е.

$$i_{я} = \frac{1}{a_1\Phi^*} \left(M_c(\omega) + z_1 - \frac{b_1}{a_2}(\omega - \omega^*) \right)$$

и $\Phi = \Phi^*$. Здесь z_1 - внутренняя переменная регулятора, вычисляемая как интеграл отклонения скорости от своего заданного значения:

$$z_1 = \beta \int (\omega - \omega^*) dt$$

С учетом сказанного, второе дифференциальное уравнение системы (1.1), описывающее динамику изменения скорости ЭПТ на пересечении ИМ, принимает следующий вид:

$$\dot{\omega}(t) = -b_1(\omega - \omega^*) + a_2\beta \int (\omega - \omega^*)dt - a_2M_f(t)$$

Продифференцировав это уравнение по времени, получим:

$$\ddot{\omega}(t) = -b_1\dot{\omega}(t) + a_2\beta\omega(t) - a_2\beta\omega^* - a_2\dot{M}_f(t) \quad (1.11)$$

Из (1.11) следует, что замкнутая система будет инвариантна к различным видам возмущений. Так, например, $\dot{M}_f(t) = 0$ при $M_f(t) = \text{const}$. В этом случае при $b_1 > 0$ и $\beta < 0$, $\omega \rightarrow \omega^*$, т.е. декомпозированная система обладает свойством асимптотической устойчивости относительно заданного стационарного состояния. Аналогично можно обеспечить условия инвариантности и для других классов внешних возмущений $M_f(t)$.

Искомый базовый закон векторного управления ЭПТ находится из обобщенного закона (1.5) при $\varphi_1(\omega, z_1)$, определяемой выражением (1.10),

$$\begin{aligned} \varphi_2(\omega, z_1) &= \Phi^* \\ h_1(\theta, \omega, i_r, \Phi, z_1, \dots, z_r) &= \beta(\omega - \omega^*) \end{aligned}$$

и для системы стабилизации угловой скорости принимает вид:

$$\begin{aligned} u_r &= a_3 i_r + \frac{1}{T_1 a_4} \left[\frac{1}{a_1 \Phi^*} (M_c - \frac{b_1}{a_2} (\omega - \omega^*)) - i_r \right] - \frac{1}{a_1 a_4 \Phi^*} \left[(b_1 - a_2 \frac{\partial M_c}{\partial \omega}) \times (a_1 i_r \Phi - M_c) - \beta (\omega - \omega^*) \right] + \\ &+ \frac{\beta}{a_1 a_4 \Phi^*} \left[\frac{1}{T_1} + b_1 - a_2 \frac{\partial M_c}{\partial \omega} \right] \int (\omega - \omega^*) dt + a_1 \omega \Phi \\ u_g &= a_5 f_1(\Phi) - \frac{1}{T_2 a_6} (\Phi - \Phi^*) \end{aligned} \quad (1.12)$$

Следует заметить, что присутствие в законе управления ЭПТ (1.12) интегральной составляющей позволяет не только

компенсировать статическую ошибку по скорости при действии кусочно-постоянного возмущения, но и придает замкнутой системе свойство параметрической робастности, т.е. малой чувствительности к возможному изменению параметров во время эксплуатации электропривода.

Помимо решения основных задач обеспечения целенаправленного электромеханического преобразования энергии, на системы управления современным ЭПТТ возлагается ряд дополнительных функций, прежде всего, вызванных желанием исключить аварийные режимы работы силового оборудования и создать благоприятные условия для выработки им своего технологического ресурса. Здесь, в первую очередь, следует выделить необходимость ограничения физических переменных по уровню, т.е. учета допустимого диапазона их изменения в реальных условиях эксплуатации. В ЭПТТ к таким переменным, безусловно, следует отнести токи в обмотках якоря и возбуждения.

Другой распространенной задачей управления ЭП является позиционирование, т.е. отработка заданного углового положения исполнительного органа ЭП $\theta = \theta^* = \text{const}$. Поставим задачу синтеза закона управления, обеспечивающего позиционирование ЭПТТ (технологический инвариант $\theta = \theta^*$) и стабилизацию магнитного потока двигателя (электромагнитный инвариант $\Phi = \Phi^*$). Как и в предыдущих случаях, будем считать, что на электропривод со стороны нагрузки действует неизвестное кусочно-постоянное возмущающее воздействие: $M_f(t) = \text{const}$. Тогда в процедуре синтеза используется следующая модель расширенной системы:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}(t) &= \omega \\
 \dot{\omega}(t) &= (a_1 i_{\text{я}} \Phi - M_c(\omega) - z_1) a_2 \\
 \dot{i}_{\text{я}}(t) &= (u_{\text{я}} - a_1 \Phi \omega - a_3 i_{\text{я}}) a_4 \\
 \dot{\Phi}(t) &= (u_{\text{в}} - a_5 f_1(\Phi)) a_6 \\
 \dot{z}_1(t) &= \beta(\theta - \theta^*)
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

В соответствии с изложенной методикой и выбранным электромагнитным инвариантом введем совокупность ИМ:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= i_{\gamma} - \varphi_1(\theta, \omega, z_1) = 0 \\ \psi_2 &= \Phi - \Phi^* = 0\end{aligned}\tag{1.14}$$

Закон векторного управления ЭПТ, найденный как решение системы функциональных уравнений (1.4) в силу (1.13), обеспечивает асимптотическое притягивание траекторий замкнутой систем к пересечению ИМ (1.14).

На этом пересечении наблюдается эффект динамической декомпозиции исходной системы, а её дальнейшее движение описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}(t) &= \omega \\ \dot{\omega}(t) &= (a_1\varphi_1(\theta, \omega, z_1)\Phi^* - M_c(\omega) - z_1)a_2 \\ \dot{z}_1(t) &= \beta(\theta - \theta^*)\end{aligned}\tag{1.15}$$

Функцию $\varphi_1(\theta, \omega, z_1)$ в декомпозированной системе (1.15) можно рассматривать как «внутреннее» управление и, согласно идее поэтапной декомпозиции, вновь поставить задачу синтеза. «Внутреннее» ИМ формируется в соответствии с заданным технологическим инвариантом следующим образом:

$$\psi_3 = \omega + b_1(\theta - \theta^*) = 0$$

Тогда при ψ_3 происходит дальнейшая редукция степеней свободы управляемой системы, а её поведение на финишном этапе движения описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}(t) &= -b_1(\theta - \theta^*) \\ \dot{z}_1(t) &= \beta(\theta - \theta^*)\end{aligned}\tag{1.16}$$

очевидно, что при $b_1 > 0$, $\theta \rightarrow \theta^*$ и $\dot{z}_1(t) \rightarrow 0$. Таким образом, все траектории замкнутой системы со временем «стягиваются» к

аттрактору, расположенному на пересечении введенных ИМ $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$, $\psi_3 = 0$ и соответствующему заданному стационарному режиму при $\theta = \theta^*$ и $\Phi = \Phi^*$.

«Внутреннее» управление

$$\varphi_1(\theta, \omega, z_1) = \frac{1}{a_1 \Phi^*} \left(M_c(\omega) + z_1 - \frac{1}{a_2 T_3} ((T_3 b_1 + 1)\omega + b_1(\theta - \theta^*)) \right) \quad (1.17)$$

найденное из функционального уравнения

$$T_3 \dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0$$

позволяет доопределить структуру ИМ $\psi_1 = 0$ и конкретизировать искомый закон управления ЭПТ для задачи позиционирования:

$$\begin{aligned} u_{\gamma} &= a_3 i_{\gamma} + \frac{1}{T_1 a_4} \left[\frac{1}{a_1 \Phi^*} \left(M_c - \frac{1}{a_2 T_3} ((T_3 b_1 + 1)\omega + b_1(\theta - \theta^*)) \right) - i_{\gamma} \right] - \\ &- \frac{1}{a_1 a_4 \Phi^*} \left[\frac{b_1}{a_2 T_3} \omega - \left(a_2 \frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{T_3 b_1 + 1}{T_3} \right) \times (a_1 i_{\gamma} \Phi - M_c) - \beta(\theta - \theta^*) \right] + \\ &+ \frac{\beta}{a_1 a_4 \Phi^* T_1} \left[1 + T_1 \left(a_2 \frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{T_3 b_1 + 1}{T_3} \right) \right] \int (\theta - \theta^*) dt + a_1 \omega \Phi \\ u_{\delta} &= a_5 f_1(\Phi) - \frac{1}{T_2 a_6} (\Phi - \Phi^*) \end{aligned} \quad (1.18)$$

Подставив синтезированное «внутреннее» управление (1.17) в уравнения декомпозированной системы (1.15), осуществив замену $z_1 \leftrightarrow M_f(t)$, после некоторых преобразований получим дифференциальное уравнение третьего порядка, описывающее динамику углового положения ЭПТ:

$$\ddot{\ddot{\theta}}(t) + \left(b_1 + \frac{1}{T_3} \right) \ddot{\theta}(t) + \frac{1}{T_3} \dot{\theta}(t) - a_2 \beta \theta + a_2 \dot{M}_f(t) = -a_2 \beta \theta^*$$

Это уравнение обладает свойством асимптотической устойчивости относительно стационарного состояния $\theta = \theta^*$ при $M_f(t) = \text{const}$, $b_1 + (1 / T_3) > 0$ и $\beta < 0$.

1.4. Энергосберегающее управление ЭПТ

В последнее время значительная часть усилий научно-технической общественности – ученых, конструкторов и разработчиков технических систем направлена на поиск путей экономии энергии и развитие энергосберегающих технологий. При этом энергосберегающие решения предлагаются на стадии конструирования технических объектов (использование менее энергоемких материалов, совершенствование конструкции и т.д.), на стадии проектирования технических систем (например, выбор оптимальной с энергетической точки зрения структуры системы) и на стадии эксплуатации (адекватная загрузка технологического оборудования, рациональная организация технологического процесса и использование энергосберегающих способов и алгоритмов управления).

Самым универсальным видом энергии является электрическая энергия, что связано с существованием достаточно эффективных и технологически отработанных способов ее получения, передачи на большие расстояния и преобразования в другие виды энергии. Основная доля электрической энергии (около 60%) преобразуется в механическое движение посредством ЭП. В силу указанных причин проблема максимально эффективного электромеханического преобразования энергии актуальна и имеет несомненную практическую значимость. Поиск путей энергосбережения в ЭП ведется уже давно, и определенные успехи достигнуты за счет совершенствования конструкции силовых элементов ЭП – электронных преобразователей и электрических машин, а также в результате использования преимуществ автоматически управляемых систем. Бесспорной тенденцией развития различных технических систем (в том числе и электромеханических) является автоматизация и кибернетизация, т.е. снижение степени непосредственного участия человека в её работе и передача типовых функций управления автоматическим регуляторам. Применение принципов автоматического управления позволяет более гибко и рационально организовать процессы в ЭП и, следовательно, приводит к определенному энергетическому

выигрышу. Однако здесь источник энергосбережения далеко не исчерпан. Мало просто использовать законы (алгоритмы) автоматического управления ЭП. Резервы повышения эффективности электромеханического преобразования энергии следует искать в совершенствовании самих законов управления.

Большинство традиционных систем автоматического управления представляют собой системы стабилизации, работающие по принципу компенсации отклонения управляемой переменной от требуемого значения за счет соответствующей обратной связи. В случае ЭП единственными управляемыми переменными являются выходные механические переменные – скорость, момент, положение, что вполне резонно с точки зрения конкретной технологической задачи. Однако с другой стороны, внутренние электромагнитные переменные фактически остаются как бы «вне компетенции» системы управления, т.е. игнорируются естественные свойства самой управляемой системы, её физическая сущность.

Любым реальным процессам и явлениям характерна диссипация энергии. В технических системах диссипируемая энергия эквивалентна энергетическим потерям, поскольку целенаправленно не используется. Уровень диссипации зависит от «внутренних» свойств самой системы. Тогда очевидно, что для оптимизации энергетических процессов в ЭП, помимо управления выходными (технологическими) переменными, необходимо соответствующим образом воздействовать и на «внутренние» электромагнитные переменные.

При поиске законов энергосберегающего управления ЭП в виде определенного аналитического выражения необходимо оперировать с нелинейными моделями, а само управление должно быть многоканальным.

Методы синергетического синтеза позволяют получать в аналитическом виде законы управления как совокупность обратных связей, которые обеспечивают выполнение заданных инвариантов, т.е. задач управления. Инварианты, в той или иной степени связанные с оптимизацией энергетических режимов, принято называть энергетическими [1].

Наиболее эффективным с энергетической точки зрения является режим работы ЭП, при котором потери энергии в его силовых каналах минимальны. Поэтому в дальнейшем под энергетическими инвариантами ЭП будем подразумевать некоторые соотношения, определенным образом связывающие физические переменные системы и характеризующие режим минимальных потерь энергии. При формировании энергетических инвариантов необходимо оперировать с переменными той математической модели, которая будет в дальнейшем использоваться при синтезе регулятора.

Энергия, подводимая к ЭП от источника и используемая, в конечном счете, для выполнения некоторой механической работы, проходит в его силовом канале стадии электрического, электромеханического и механического преобразования. При этом часть этой энергии неизбежно теряется, выделяясь в виде теплоты. Если потери в преобразователях электрической энергии (выпрямителях, конверторах, инверторах и т.д.) и механических преобразователях определяются, прежде всего, их конструктивными особенностями, то в электромеханических преобразователях – электродвигателях существует возможность изменять в определенных пределах уровень мощности потерь, не меняя ни их конструкцию, ни режим работы. Потенциальная возможность оптимизации энергетических режимов ЭП выявлена в [8] на основе анализа изменения составляющих потерь в зависимости от режима работы, где получены соотношения, которые можно отнести к энергетическим инвариантам ЭП.

Методика получения энергетических инвариантов заключается в следующем. Записывается выражение для суммарных потерь в двигателе как функция электромагнитных и механических переменных. Затем ищется экстремум этой функции по какой-либо из переменных $\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial x} = 0$. В результате получается выражение, характеризующее оптимальное с точки зрения минимума потерь энергии значение выбранной переменной.

Электромагнитные и механические переменные двигателя согласно известным физическим законам находятся в процессе динамического взаимодействия, которое отражено в

соответствующей математической модели. Часть из этих переменных являются управляемыми, т.е. они должны изменяться заданным образом, исходя из целей функционирования всей системы. ЭП предназначены для генерации требуемого механического движения. Следовательно, одна из управляемых переменных всегда будет величиной, характеризующей это движение – положение, скорость, момент. Управление механической переменной с точки зрения принятой терминологии происходит в соответствии с необходимостью обеспечения определенного технологического инварианта. Тогда понятно, что оптимизируемую переменную нужно выбирать из числа электромагнитных переменных. Также очевидно, что должна существовать возможность воздействовать на уровень этой переменной, т.е. должен быть предусмотрен независимый канал управления. Из приведенных рассуждений следует важный вывод: энергосберегающее управление ЭП должно быть как минимум двухканальным. По одному из каналов обеспечивается реализация требуемой технологической задачи, а по другому осуществляется минимизация потерь энергии.

Суммарные потери энергии в любой электрической машине складываются из потерь в стали сердечников, потерь в меди обмоток, механических потерь и дополнительных потерь. Согласно принятому выше принципу выбора оптимизируемых переменных, энергосберегающее управление заключается в целенаправленном изменении электромагнитных переменных. Тогда механические и дополнительные потери не будут учитываться в ходе дальнейших рассуждений.

Запишем выражение для суммарных потерь в электрических и магнитных цепях двигателя постоянного тока (ДПТ)

$$\Delta P_{ЭМ} = \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{ст} = i_{я}^2 r_{я} + i_{г}^2 r_{г} + \Delta P_{ст.н} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2 \quad (1.19)$$

где:

$\Delta P_{ст.н}$, Φ_n - значения потерь в стали и потока в номинальном режиме работы двигателя;

f - частота перемагничивания магнитной системы;

β - коэффициент, зависящий от марки стали.

Сделаем выбор оптимизируемой электромагнитной переменной. Значение тока якоря ДПТ пропорционально величине электромагнитного момента, который в свою очередь зависит от характеристик приводимого механизма, т.е. от некоторых внешних факторов. Таким образом, в нашем распоряжении остаются ток возбуждения и магнитный поток одного полюса. Эти величины в ДПТ являются взаимозависимыми. Эта зависимость зачастую считается статической и выражается характеристикой намагничивания $\Phi(i_b)$. Поэтому в моделях ДПТ в качестве переменной состояния выступает либо ток возбуждения, либо магнитный поток. Заметим, что в ДПТ предусмотрена возможность автономного управления величиной тока возбуждения и, следовательно, магнитного потока путем изменения напряжения на обмотке возбуждения. Приведенные рассуждения позволяют сделать вывод, что в качестве оптимизируемой переменной может выступать ток возбуждения или магнитный поток. Выбор зависит от того, какая из этих переменных присутствует в используемой модели двигателя. Пусть этой переменной будет магнитный поток. Представим выражение (1.19) как функцию оптимизируемой переменной. При этом будем считать, что магнитная система не насыщена и $i_b = k_\Phi \Phi$. Частота перемагничивания сердечников ДПТ пропорциональна скорости вращения ротора, а ток якоря можно выразить через момент сопротивления и магнитный поток: $i_\alpha = M_\Sigma / (c\Phi)$. Тогда

$$\Delta P_{ЭМ}(\Phi) = \frac{M_\Sigma^2 r_\alpha}{c^2 \Phi^2} + k_\Phi^2 \Phi^2 r_e + \Delta P_{см.н} \left(\frac{\omega}{314} \right)^\beta \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2$$

Найдем экстремум этой функции:

$$\frac{\partial \Delta P_{ЭМ}}{\partial \Phi} = 0 \Leftrightarrow -\frac{M_\Sigma^2 r_\alpha}{c^2 \Phi^3} + k_\Phi^2 \Phi r_e + \frac{\Delta P_{см.н} \omega^\beta}{314^\beta \Phi_n^2} \Phi = 0$$

После математических преобразований получим выражение, определяющее оптимальное с точки зрения минимума потерь энергии значение магнитного потока:

$$\Phi_{opt} = M_{\Sigma}^{1/2} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^{\beta}} \right)^{1/4} \quad (1.20)$$

Значения коэффициентов в выражении (1.20) зависят от номинальных данных двигателя и характеристик его электромагнитных цепей:

$$k_1 = \frac{r_{я}}{c^2}; k_2 = k_{\Phi}^2 r_{\sigma}; k_3 = \frac{\Delta P_{cm.н}}{314^{\beta} \Phi_n^2} \quad (1.21)$$

Энергетический инвариант (1.20) представляет собой статическое соотношение между магнитным потоком, частотой вращения ротора и моментом на валу двигателя. Момент и частота вращения являются величинами технологически задаваемыми двигателю и зависят от решаемой задачи механического движения и характеристик обслуживаемого технологического процесса. Тогда энергосберегающее управление ЭПТТ будет фактически заключаться в целенаправленном изменении магнитного потока, исходя из текущих значений момента и частоты вращения двигателя, в соответствии с выражением (1.20).

Тема 2. Управление электроприводами переменного тока

Перспективным направлением при создании современных управляемых электромеханических систем (ЭМС) является применение асинхронных двигателей (АД). Такие двигатели переменного тока являются одними из самых простых, надежных и экономичных, они получили широкое распространение во всех ЭМС, где не требуется регулирование частоты вращения и угла поворота в значительном диапазоне. Однако, попытки использования указанных замечательных возможностей АД в управляемых ЭМС натолкнулись на значительные трудности принципиального и общенаучного характера. Это связано с тем обстоятельством, что указанные двигатели с точки зрения проблемы управления относятся к одним из самых сложных электромеханических высокодинамичных объектов. Дело в том, что исключительная сложность задачи управления двигателями переменного тока определяется существенной нелинейностью и высокой размерностью дифференциальных уравнений их математических моделей в разных режимах движения. Для эффективного функционирования АД необходимо одновременно управлять несколькими взаимосвязанными координатами – частотой вращения, угловым положением, моментом, магнитным потоком, током и т.д.

Наибольшее распространение в теории и практике управления получили законы регулирования, основанные на принципах одноканального управления, когда один из каналов управления, например, амплитуда напряжения статора (по сути, независимый канал), ставится в зависимость от другого – частоты питающего напряжения [2, 4, 5, 9-12]. При этом синтез законов управления осуществляется, как правило, на основе упрощенных линеаризованных моделей. Естественно, что такой подход накладывает существенные ограничения на реализацию таких важнейших качественных характеристик ЭП, как область устойчивости, диапазон регулирования, жесткость механической характеристики и т.д. В конечном итоге это приводит к неэффективному использованию широких технологических возможностей ЭП.

2.1. Частотно-регулируемый ЭП с управлением по вектору потокосцепления ротора

Заметным продвижением в решении задачи регулирования ЭП стало развитие метода векторного управления [2, 4, 9-11, 13]. Наибольшее распространение получили системы управления, использующие в качестве опорного вектора вектор потокосцепления ротора. В этом случае математическая модель АД описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 J \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{m}{2} p k_r \psi_r i_{sy} - M_c \\
 \frac{d\psi_r}{dt} &= r_r k_r i_{sx} - \frac{1}{T_r} \psi_r \\
 \frac{di_{sy}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sy} - \omega_\psi i_{sx} - \frac{k_r}{L_s^*} \omega_r \psi_r + \frac{1}{L_s^*} u_{sy} \\
 \frac{di_{sx}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sx} + \omega_\psi i_{sy} + \frac{k_r}{T_r L_s^*} \psi_r + \frac{1}{L_s^*} u_{sx}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где:

u_{sx}, u_{sy} - проекции напряжения статора на оси x и y вращающейся системы координат соответственно;

i_{sx}, i_{sy} - проекции тока статора на оси координат x и y соответственно;

ψ_r - модуль результирующего вектора потокосцепления ротора;

ω_r - угловая электрическая скорость ротора;

ω_ψ - частота вращения поля ротора;

$k_r = \frac{L_m}{L_r}$ - коэффициент электромагнитной связи ротора;

r_s, r_r - активные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно;

L_s, L_r - полные индуктивности обмоток статора и ротора соответственно;

L_m - взаимная индуктивность между статором и ротором;

$L_s^* = L_s - L_m k_r$, $r_s^* = r_s + r_r k_r^2$ - преобразованные индуктивность и сопротивление статора;

$T_r = \frac{L_r}{r_r}$, $T_s^* = \frac{L_s^*}{r_s^*}$ - постоянные времени ротора и статора;

p - число пар полюсов;

J - приведенный момент инерции;

m - число фаз двигателя;

M_c - момент сопротивления нагрузки на валу ЭП.

Предполагается, что переменные, относящиеся к обмотке ротора (напряжения источников питания, токи и потокосцепления), а также параметры обмотки ротора приведены к числу витков обмотки статора. При этом математическая модель (2.1) дополняется уравнением:

$$\psi_r (\omega_\psi - \omega_r) = k_r r_r i_{sy} \quad (2.2)$$

Математическая модель (2.1), (2.2) рассматривается при следующих общепринятых физических допущениях:

- параметры обмоток фаз статора и ротора соответственно одинаковы, а система напряжений фаз симметрична;

- магнитопроводы ненасыщены;

- воздушный зазор между взаимно перемещающимися частями равномерен;

- магнитодвижущая сила в воздушном зазоре синусоидальна;

- влияние потерь в стали и эффекта вытеснения тока и потока на характеристике АД не учитывается;

- обе части АД имеют однотипные распределенные обмотки.

В частности, на данной модели АД базируется созданная фирмой «Сименс» система двухканального регулирования «Трансвектор» (рис. 2.1). Для измерения текущих значений переменных в системе используются датчики тока статора, датчики потока и датчик скорости (ДС).

В блоке функционального преобразования (БФП2) выполняется перевод мгновенных значений фазных токов статора в проекции неподвижной системы координат статора (α, β) [4, 9]:

$$i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) \quad (2.3)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc})$$

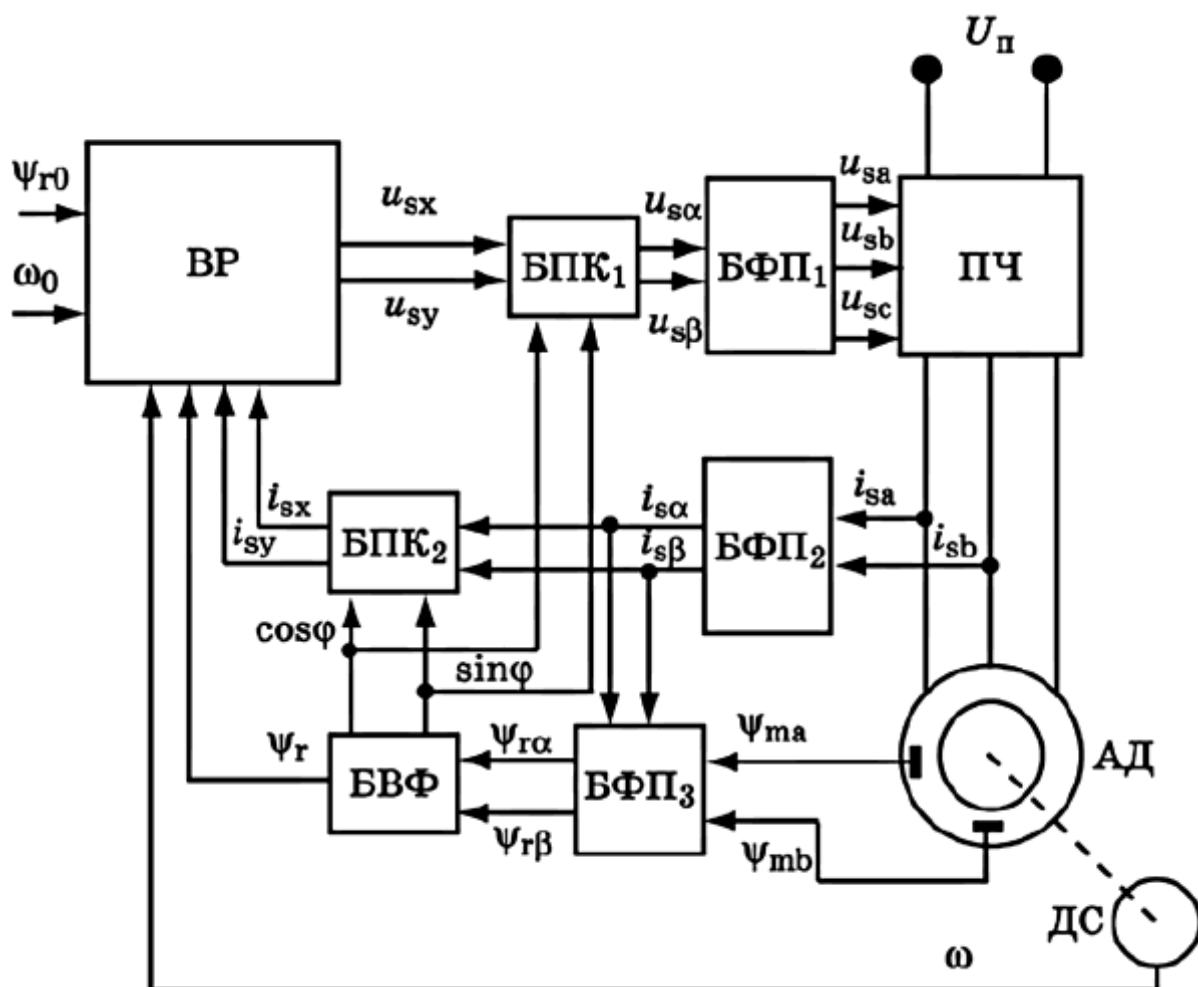


Рис. 2.1. Структурная схема системы «Трансвектор»

Преобразование (2.3) можно упростить, если предположить, что фазные значения тока статора подчиняются условию

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2.4)$$

С учетом (2.4) преобразование (2.3) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sa} \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sa} + 2i_{sb}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Таким образом, для измерения потребуется установка датчиков тока только по двум фазам.

Измеренные с помощью датчиков Холла трехфазные мгновенные значения потока в воздушном зазоре Ψ_{ma} и Ψ_{mb} поступают в блок БФП1, где осуществляется вначале их преобразование в неподвижную систему координат статора (α, β)

$$\begin{aligned} \Psi_{m\alpha} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_{ma} \\ \Psi_{m\beta} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_{ma} + 2\Psi_{mb}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

а затем с использованием вычисленных в блоке БФП2 проекций тока статора на оси α, β неподвижной системы координат рассчитываются составляющие потокосцепления ротора:

$$\begin{aligned} \Psi_{r\alpha} &= \frac{L_r}{L_m} \Psi_{m\alpha} - (L_r - L_m) \cdot i_{s\alpha} \\ \Psi_{r\beta} &= \frac{L_r}{L_m} \Psi_{m\beta} - (L_r - L_m) \cdot i_{s\beta} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Блок векторного фильтра (БВФ) определяет мгновенное значение пространственного угла поворота φ вектора потокосцепления ротора Ψ_r . Он включает в себя вычислитель модуля вектора потокосцепления ротора и тригонометрического анализатора, определяющего функции $\sin(\varphi)$ и $\cos(\varphi)$ [2, 4, 9, 13].

Блок координатного преобразования (БКП2) осуществляет преобразование проекций вектора тока статора из системы координат (α, β) в (x, y)

$$\begin{aligned}i_{sx} &= i_{s\alpha} \cos \varphi + i_{s\beta} \sin \varphi \\i_{sy} &= -i_{s\alpha} \sin \varphi + i_{s\beta} \cos \varphi\end{aligned}$$

Блок БКП1 выполняет обратное преобразование управляющих воздействий из системы координат (x, y) в (α, β)

$$\begin{aligned}u_{s\alpha} &= u_{sx} \cos \varphi - u_{sy} \sin \varphi \\u_{s\beta} &= u_{sx} \sin \varphi + u_{sy} \cos \varphi\end{aligned}$$

а блок БФП1 – переход от проекций в системе координат (α, β) к трехфазным управляющим воздействиям, поступающим на преобразователь частоты (ПЧ),

$$\begin{aligned}u_{sa} &= \sqrt{\frac{2}{3}} u_{s\alpha} \\u_{sb} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} u_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} u_{s\beta} \right) \\u_{sc} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} u_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{s\beta} \right)\end{aligned}$$

Традиционным подходом к синтезу систем векторного управления ЭП является применение метода подчиненного регулирования [2, 4, 9-11, 13, 14]. Основными регулируемыми величинами являются потокосцепление ротора ψ_r и частота вращения вала ЭП $\omega = \omega_r / p$. Для применения метода подчиненного регулирования необходимо выполнить «развязку» каналов управления. В системе «Трансвектор» реализуется прямая компенсация перекрестных обратных связей [2, 4, 9, 10] $\omega_\psi i_{sy}, \omega_\psi i_{sx}, ((k_r \cdot r_r) / (L_s^* \cdot L_r)) \cdot \psi_r$.

Тогда, если пренебречь обратной связью по ЭДС двигателя $(k_r / L_s^*) \cdot \omega_r \cdot \psi_r$ и учесть динамические свойства ПЧ, получим математическую модель контура регулирования потокосцепления ротора

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_r}{dt} &= r_r k_r i_{sx} - \frac{1}{T_r} \psi_r \\ \frac{di_{sx}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sx} + \frac{1}{L_s^*} u_1 \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{1}{T_{np}} (k_{np} \bar{u}_{sx} - u_1) \end{aligned} \quad (2.8)$$

и контура регулирования частоты вращения

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{m}{2} p k_r \psi_r i_{sy} - M_c \\ \frac{di_{sy}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sy} + \frac{1}{L_s^*} u_2 \\ \frac{du_2}{dt} &= \frac{1}{T_{np}} (k_{np} \bar{u}_{sy} - u_2) \end{aligned} \quad (2.9)$$

где:

$\bar{u}_{sx}, \bar{u}_{sy}$ - скомпенсированные каналы управления;

u_1, u_2 - проекции напряжения статора на выходе ПЧ.

Для данного способа сепарирования каналов управления реализация блока векторного регулятора (ВР) изображена на рис. 2.2.

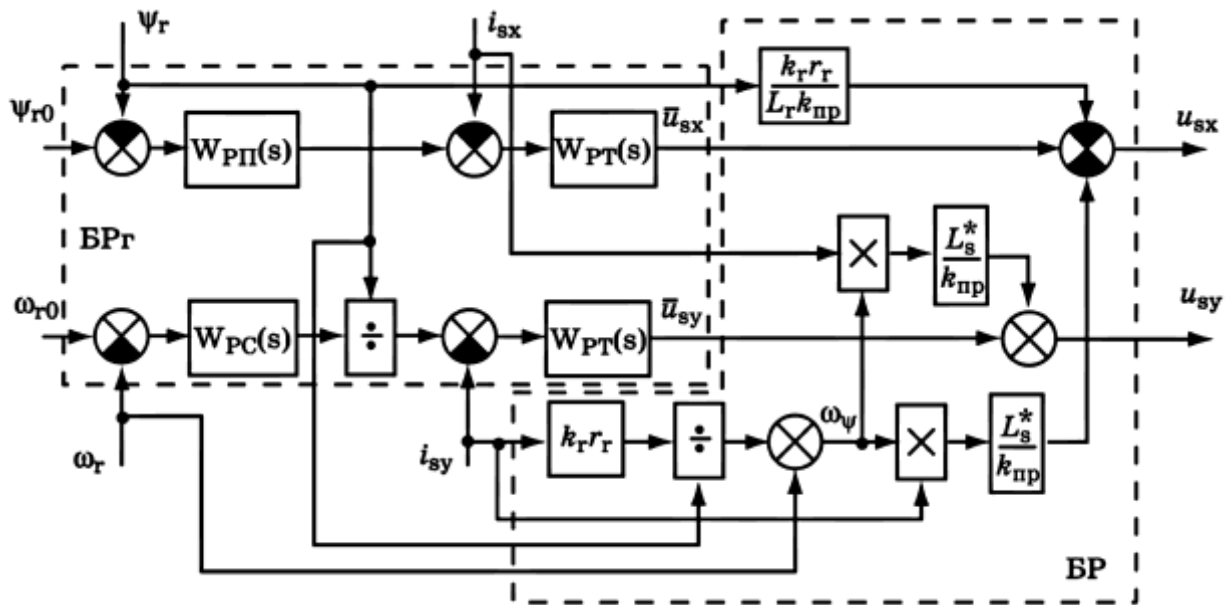


Рис. 2.2. Структурная схема блока векторного регулятора системы «Трансвектор»

В блоке развязки (БР), согласно (2.2), вычисляется частота вращения поля ротора ω_ψ . На практике оценка ω_ψ является приближенной, поэтому полагают, что $\omega_\psi \approx \omega_r$ [2, 13]. Далее строятся стандартные схемы подчиненного регулирования по каждому из каналов. Для расчета регуляторов используется линеаризованная структура системы управления ЭП (рис. 2.3).

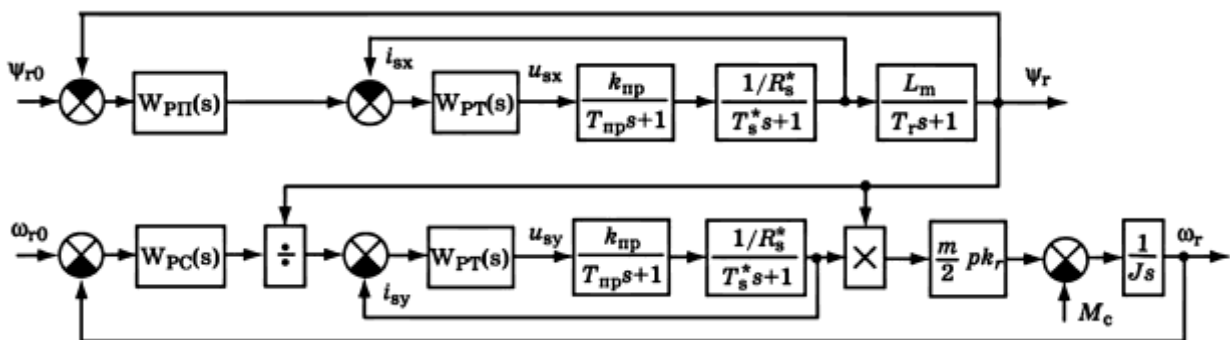


Рис. 2.3. Структурная схема линеаризованной системы управления ЭП

Из приведенной на рис. 2.3 схемы видно, что по обоим каналам регулирования строятся двухконтурные регуляторы с подчиненными контурами по соответствующим проекциям тока статора. Все регуляторы в системе выбираются пропорционально-

интегральными. Регуляторы контуров регулирования проекций токов i_{sx} и i_{sy} являются одинаковыми

$$W_{PT}(s) = K_I \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (2.10)$$

Параметры регуляторов (2.10) при настройке на симметричный оптимум задаются следующим образом [2, 14]:

$$K_I = \frac{L_s^*}{2T_{пр}k_{пр}}; \quad T_I = 4T_s^*.$$

Параметры настройки ПИ-регулятора потокосцепления ротора

$$W_{PI}(s) = K_\psi \left(1 + \frac{1}{T_\psi s} \right) \quad (2.11)$$

выбираются как

$$K_\psi = \frac{T_r}{4T_{пр}L_m},$$

а постоянная интегрирования $T_\psi = 4 \cdot T_r$ [2, 14].

В контуре регулирования скорости параметры ПИ-регулятора

$$W_{PC}(s) = K_\omega \left(1 + \frac{1}{T_\omega s} \right) \quad (2.12)$$

настраиваются следующим образом

- коэффициент передачи $K_\omega = J / (2 \cdot m \cdot p \cdot T_{пр})$;
- постоянная интегрирования $T_\omega = 8 \cdot T_{пр}$.

Применение методов теории оптимального управления для решения задачи векторного управления ЭП наталкивается на целый ряд трудностей, связанных с существенной нелинейностью математической модели и с проблемой формирования критериев качества. Эта теория при определенных допущениях, связанных с упрощением модели ЭП, позволяет в ряде случаев формально осуществить процедуру проектирования субоптимальных

регуляторов [12, 15, 16], при этом, как правило, применяются процедуры численного решения задачи синтеза регуляторов.

2.2. Синтез законов управления электроприводом с АД

Повышение требований к режимам функционирования электромеханических систем и расширению динамических диапазонов регулирования выходных координат электроприводов обуславливает необходимость разработки прикладных методов синтеза систем векторного управления ЭП с использованием их полных нелинейных моделей движения.

Нелинейная математическая модель ЭП с учетом динамики преобразователя частоты описывается системой дифференциальных уравнений (2.13):

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{m}{2} p k_r \psi_r i_{sy} - M_c \\ \frac{d\psi_r}{dt} &= r_r k_r i_{sx} - \frac{1}{T_r} \psi_r \\ \frac{di_{sy}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sy} - \omega_\psi i_{sx} - \frac{k_r}{L_s^*} \omega_r \psi_r + \frac{1}{L_s^*} u_{sy} \\ \frac{di_{sx}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sx} + \omega_\psi i_{sy} + \frac{k_r}{T_r L_s^*} \psi_r + \frac{1}{L_s^*} u_{sx} \\ \frac{du_{sx}}{dt} &= \frac{1}{T_{np}} (k_{np} u_1 - u_{sx}) \\ \frac{du_{sy}}{dt} &= \frac{1}{T_{np}} (k_{np} u_2 - u_{sy}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

где:

k_{np} – коэффициент преобразователя частоты;

T_{np} – постоянная времени преобразователя частоты.

Совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов – аттракторов, которые выступают как цель управления [6]. На них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи и/или поддерживаются желаемые физические (энергетические, механические и др.) инварианты. При этом процедура синтеза сводится к поиску базовых законов управления, при которых указанные инварианты выполняются. Применительно к ЭП

требования к синтезируемым системам определяются совокупностью инвариантов, состоящей из технологического и электромагнитного инвариантов [17, 18].

Применительно к задаче стабилизации скорости вращения вала ЭП запишем технологический инвариант

$$\omega_r = \omega_{r0} \quad (2.14)$$

Из теории частотного управления ЭП [2, 4, 5, 9-13, 16] известно, что механические характеристики АД аналогичны характеристикам компенсированного ДПТ с независимым возбуждением при обеспечении постоянства потокосцепления ротора

$$\Psi_r = \Psi_{r0} \quad (2.15)$$

Таким образом, постановку задачи синтеза регулятора можно сформулировать следующим образом: необходимо синтезировать векторный закон управления, обеспечивающий перевод замкнутой системы из произвольных начальных условий в допустимой области изменения физических координат ЭП в заданное состояние, определяемое введенной совокупностью инвариантов: технологического (2.14) и электромагнитного (2.15). При этом должна обеспечиваться асимптотическая устойчивость, инвариантность к внешним возмущениям и параметрическая робастность синтезируемой системы.

Известно, что ЭП подвержен действию внешних возмущений $M_c(t)$, определяемых соответствующей нагрузкой. Кроме того, параметры АД, например, вследствие изменения температуры или действия других внешних факторов, могут меняться во времени. Поэтому необходимо, чтобы синтезируемый закон управления обеспечивал подавление этих внешних неизмеряемых возмущений. Влияние указанных возмущений можно учесть за счет расширения математической модели исходной системы. Для этого вводятся дополнительные переменные z_1 и z_2 , которые являются оценкой внешних возмущений.

Тогда можно записать математическую модель ЭП (2.13) в расширенном виде:

$$\begin{aligned}
 \frac{dz_1}{dt} &= \eta_1 \Phi_{\text{тех}} \\
 \frac{dz_2}{dt} &= \eta_2 \Phi_{\text{эл}} \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{m}{2J} p k_r \psi_r i_{sy} - z_1 \\
 \frac{d\psi_r}{dt} &= r_r k_r i_{sx} - \frac{1}{T_r} \psi_r - z_2 \\
 \frac{di_{sy}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sy} - \omega_\psi i_{sx} - \frac{k_r}{L_s^*} \omega_r \psi_r + \frac{1}{L_s^*} u_{sy} \\
 \frac{di_{sx}}{dt} &= -\frac{1}{T_s^*} i_{sx} + \omega_\psi i_{sy} + \frac{k_r}{T_r L_s^*} \psi_r + \frac{1}{L_s^*} u_{sx} \\
 \frac{du_{sx}}{dt} &= \frac{1}{T_{\text{np}}} (k_{\text{np}} u_1 - u_{sx}) \\
 \frac{du_{sy}}{dt} &= \frac{1}{T_{\text{np}}} (k_{\text{np}} u_2 - u_{sy})
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

где:

$\Phi_{\text{тех}} = \omega_r - \omega_{r0} = 0$ – технологический инвариант;

$\Phi_{\text{эл}} = \psi_r - \psi_{r0} = 0$ – электромагнитный инвариант.

Тема 3. Управление робототехническими системами

Все возрастающая роль процессов автоматизации во всех сферах человеческой деятельности в значительной мере определяет потребности во внедрении робототехнических систем (РТС) практически во всех отраслях производства (машиностроение, электронная и электротехническая промышленность, приборостроение, энергетика и т.д.). Повышенный интерес к РТС обусловлен их способностью работать в различного рода специфических и экстремальных средах. Причем круг задач, решаемых РТС, непрерывно расширяется, и, соответственно, возрастают требования к их функциональным возможностям.

Очевидно, что РТС являются многосвязными и многомерными нелинейными динамическими объектами, структура системы управления которыми построена по иерархическому принципу. Для построения высокоэффективных систем управления РТС необходимо применять методы синтеза, позволяющие учесть их особенности, а также обеспечить надежное функционирование синтезируемых систем во всей допустимой области изменения координат [1].

3.1. Задача синтеза иерархических систем управления

Под иерархической системой (рис. 3.1) понимается совокупность взаимодействующих подсистем, организующих отдельные иерархические уровни. При этом на каждом иерархическом уровне для подсистемы допускается характерное описание для соответствующего пространства переменных и параметров [19]. В таких системах на каждом уровне на соответствующую подсистему оказывается непосредственное воздействие подсистемы, расположенной на вышестоящем уровне. Однако, хотя данное воздействие является для подсистем нижележащих уровней обязательным и в нем выражается приоритет действия и целей более высоких уровней [20], взаимодействие между вышестоящим элементом и каждым из нижестоящих элементов таково, что успех действия одного из них зависит от действий другого. Таким образом, эффективность действия системы в целом зависит не только от вмешательства, направленного сверху вниз, но и от отклика снизу вверх, т.е. от согласованного поведения всех элементов системы.

В [20] выделены три типа уровней иерархий:

- страты – уровни описания, когда система определяется ансамблем моделей, каждая из которых соответствует определенному представлению поведения системы с точки зрения требуемого уровня абстрагирования;

- слои – уровни сложности принимаемого решения, когда для многоуровневых динамических систем, состоящих из совокупности четко выделенных взаимодействующих подсистем, сложную проблему принятия решения можно представить в виде семейства последовательно расположенных более простых подпроблем, так что решение всех подпроблем обеспечивает решение и исходной проблемы;

- эшелоны – организационные уровни, соответствующие описанию систем, состоящих из множества четко выделенных взаимодействующих компонент, некоторые из которых являются принимающими решения элементами, расположенные

иерархически так, что определенные элементы находятся под их влиянием.

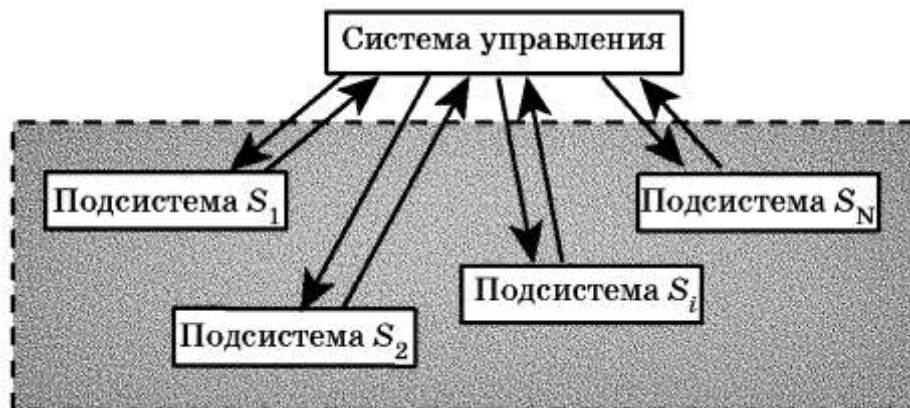


Рис. 3.1. Структура иерархической системы

Если некоторую многосвязную динамическую систему можно представить в виде совокупности взаимодействующих подсистем $S_i, i = \overline{1, N}$ (рис. 3.1), то при разработке стратегий управления ею необходимо сформировать множество целей в виде набора технологических, электромагнитных, энергетических и других инвариантов Φ как для отдельных подсистем, так и для всей системы в целом, выполнение которых должна обеспечивать синтезируемая иерархическая система управления. При этом данное множество можно представить в виде иерархической структуры подчинения целей, т.е. разбить его на некоторое количество подмножеств $\Sigma_j, j = \overline{1, M}$, состоящих из целей для конкретных подсистем либо для группы подсистем $G_i, i = \overline{1, L}$, либо для всей системы в целом, так что

$$\bigcup_{j=1}^M \Sigma_j = \Phi \quad (3.1)$$

Для того чтобы синтезируемая система обеспечивала выполнение целей (3.1), она должна на каждом слое вырабатывать соответствующее множество решений Ξ , которое аналогично (3.1) состоит из подмножеств решений $\Delta_j, j = \overline{1, M}$:

$$\bigcup_{j=1}^M \Delta_j = \Xi \quad (3.2)$$

Таким образом, на каждом иерархическом слое подмножеству целей $\Sigma_j, j = \overline{1, M}$ система управления ставит в соответствие подмножество решений $\Delta_j, j = \overline{1, M}$. Подмножества $\Sigma_j, j = \overline{1, M}$ и $\Delta_j, j = \overline{1, M}$ разделяются на группы $G_j, j = \overline{1, L}$, соответствующие определенному слою сложности принятия решения [20], и как отмечалось выше, сложная проблема принятия решений (3.2) для выполнения множества целей (3.1) разбивается на группы последовательных более простых проблем с соответствующими подмножествами целей Σ_j и решений Δ_j , так что решение более простых задач обеспечивает в совокупности решение исходного множества проблем (3.1). При этом, множество решений, вырабатываемое на верхнем слое (ВС), непосредственно зависит от информации, поступающей от нижестоящих подсистем. Однако, обладая приоритетом действия, вышестоящий уровень обязан вырабатывать такую совокупность решений, чтобы обеспечить выполнение поставленной перед системой в целом задачи функционирования. В то же время проблема выбора принципов взаимодействия между подсистемами верхнего и нижнего слоев заключается в координации действий нижестоящих элементов вышестоящим с учетом того, как элементы нижнего слоя (НС) сообщаются между собой и какие параметры целей НС могут подвергаться изменению для улучшения глобального результата работы системы управления.

Большинство существующих подвижных РТС способны функционировать только под непосредственным контролем оператора, в строго детерминированной среде и с заранее заданными алгоритмами движения. Однако, все увеличивающийся спектр задач требует разработки систем автоматического управления, сочетающих в себе возможность самостоятельного принятия решений при изменении параметров среды и отвечающих требованиям быстрого и многократного изменения технологических заданий РТС [23-26].

Проблема создания автономных робототехнических систем, способных функционировать в экстремальных условиях или условиях опасных для жизни человека, имеет множество подзадач. В круг этих задач, помимо конструктивного исполнения, входят

задачи обработки сенсорной и навигационной информации от бортовых датчиков и приборов, учета динамических свойств среды, формирования управляющих сигналов на исполнительные устройства робота для отработки заданного движения и др. Ряд технологических задач требует не только организации движения мобильных роботов (МР) вдоль заданных траекторий в пространстве рабочих координат, но и налагает требования на скорость перемещения вдоль этих траекторий, например, постоянство контурной скорости. Важным этапом при проектировании МР является разработка системы управления, обеспечивающей надежное и устойчивое движение по фиксированному пути с заданной скоростью.

3.2. Системы управления мобильными роботами

В ряде случаев мобильный робот (МР), управляемый человеком (оператором) на уровне постановки цели, должен осуществлять движение в недетерминированной среде, характеризующейся заранее неизвестным расположением препятствий и целевых объектов, а также их подвижностью. В таких условиях самостоятельное перемещение МР определяет необходимость динамического анализа ситуации в среде функционирования. На основе результатов анализа сенсорной информации, и целевой установки оператора система управления должна осуществлять навигацию и управление его движением.

Сегодня выделяют три следующих типа архитектур систем управления движением МР:

1. архитектура на основе декомпозиции функций обработки информации в процессе «распознавание - моделирование - планирование - действие» (Sensor - Model - Plan - Act, SMPA);

2. реактивная (рефлексная) архитектура, основанная на стратегии целенаправленного поведения МР, вырабатываемого на базе сенсорной информации (sensor based action);

3. гибридная архитектура на основе комбинирования двух предыдущих типов архитектур.

Типовая структурно-функциональная схема SMPA-системы управления движением МР, представлена на рис. 3.2.

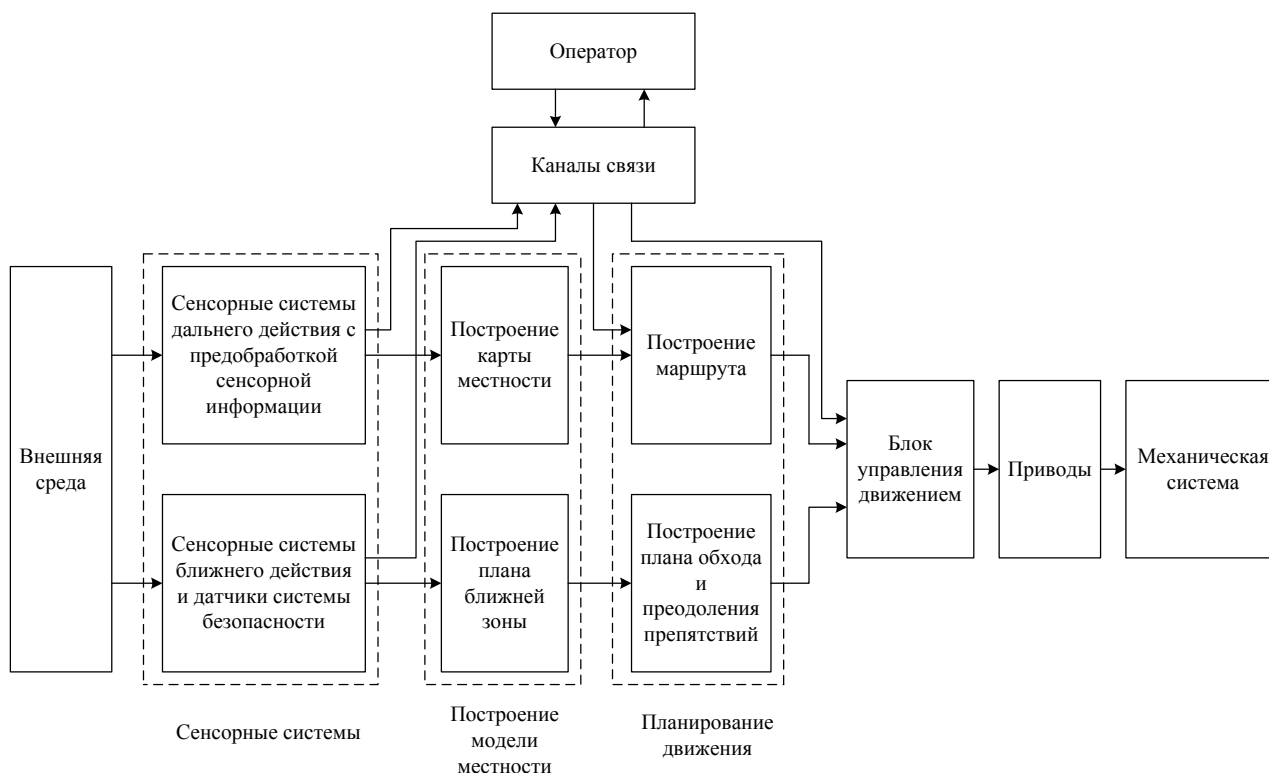


Рис. 3.2. Типовая структурно-функциональная схема SMRA-системы управления движением МР

Такая система осуществляет управление движением МР посредством моделирования окружающей среды, локализации в ней, а также планирования, коррекции и отработки траекторий.

Моделирование окружающей среды осуществляется на базе сенсорной и иной поступающей из различных источников информации.

Модель окружающей среды должна описывать в динамике расположение МР, препятствий и целевых объектов. Выделяют три уровня моделей: верхний (глобальный), средний (локальный, проблемный) и нижний, представляющий текущее сенсорное поле, как правило, в виде клеток-ячеек (cell decomposition model). Используются геометрические и топологические модели. Первые из них описывают характеристики объектов, их позицию, ориентацию, вторые – аспекты положения объекта по отношению к другим объектам. Геометрическую модель формируют подобия объектов, определенных в концепции объектно-ориентированного подхода, например, в программировании. Топологическая модель

обычно представляет собой граф, строящийся на основе геометрической модели, либо непосредственно.

Задача самолокализации (самоопределения положения) мобильного робота тесно связана с задачей моделирования рабочего пространства, так как их решения взаимно зависимы, то есть качество решения одной определяет качество решения другой. Решаться эта задача может с применением методов счисления пути, интегральной и сенсорной локализации. Метод счисления пути предполагает осуществление анализа накопленной ошибки и в большинстве случаев используется совместно с сенсорным методом для ее устранения, а также приведения в соответствие характеристик или ориентиров в рабочей среде.

Метод интегральной навигации предполагает реализацию глобального позиционирования (системы ГЛОНАСС и GPS) и лазерного сканирования среды (LIDAR, Light Identification Detection and Ranging – световое обнаружение и определение дальности). Так же существуют методы локализации на базе вероятностных походок и комплексирования данных, поступающих от разных датчиков.

По аналогии с моделированием рабочего пространства выделяют геометрическую и топологическую локализацию. Геометрическая локализация определяет положение и ориентацию МР, топологическая — его отношение со средой функционирования (например, «напротив окна»).

На сегодняшний день существует три основные стратегии локализационных вычислений:

1. периодическое совмещение локальной модели среды с заданной априори картой;
2. определение позиции на основании априори известных реперов-ориентиров;
3. выделение характеристик среды и оценка их позиций относительно робота с последующим определением его результирующего перемещения.

Планирование траекторий МР может осуществляться на основе следующих подходов:

1. методов на основе карты путей, где применяются графы видимости и диаграммы Вороного;

2. представления карты среды в виде клеточного поля, предполагающего реализацию триангуляции Делоне, а также разбиение на квадратные и шестиугольные сегменты, на которых могут быть реализованы модели вероятностного прохождения, модели с накоплением информации и т. п.;

3. движения в виртуальных информационных полях, предполагающего использование эвристических алгоритмов, а также алгоритмов, основанных на методе потенциалов;

4. методов планирования двигательного поведения, где формируемый план представляет собой последовательность поведенческих актов, переход между которыми осуществляется при наступлении определенных условий.

В общем случае выделяют глобальное и локальное планирование. Глобальное планирование осуществляется на основе карты местности (например, с использованием ГЛОНАСС, сенсорных систем дальнего действия), локальное – на основе сигналов от сенсорных систем ближнего действия и датчиков безопасности, поступающих в реальном масштабе времени.

Коррекция траекторий МР должна осуществляться на базе применения методов, учитывающих наличие неголономных связей в рассматриваемых динамических системах. Планирование движений таких систем сводится к нахождению гладкой траектории, удовлетворяющей начальным и конечным условиям. Методы, основанные на учете неголономных связей, обеспечивают эффективный способ планирования движения МР в реальном масштабе времени.

Отработка скорректированных траекторий МР блоком управления движением может реализовываться на базе их отслеживания с использованием стабилизирующего серворегулятора (следящего регулятора), обеспечивающего приемлемое качество управления движением МР в недетерминированном пространстве.

При реактивном подходе к формированию двигательного

поведения МР планирование траекторий не осуществляется, и считается, что внешняя среда является сама по себе своей лучшей моделью. Обобщенная структурная схема системы управления движением МР реактивной архитектуры представлена на рис. 3.3.

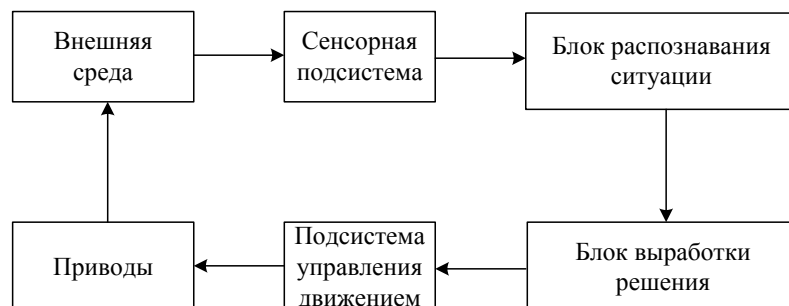


Рис. 3.3. Типовая структурная схема системы управления движением МР реактивной архитектуры

В силу того, что задача планирования маршрута в рамках рассматриваемой архитектуры не решается, блоки моделирования окружающей среды и планирования движения отсутствуют. Система управления осуществляет распознавание ситуации вокруг МР и вырабатывает управление, обеспечивающие достижение поставленной цели в сложившихся условиях. Непосредственно управление движением осуществляется такими же методами, что и в архитектуре SMPA-системы.

В настоящее время внимание в наибольшей степени уделяется разработке систем управления движением гибридной архитектуры. Существенной особенностью таких систем управления является реализация трехуровневой системы планирования, где на верхнем уровне функционирует общий планировщик, на среднем – контроллер выделенного класса дискретных событий, на нижнем – контроллеры для организации реактивного двигательного поведения.

На основе изложенного можно заключить, что система управления движением МР в недетерминированном рабочем пространстве должна осуществлять, в общем случае:

- обработку сенсорной информации; построение модели местности и локализацию робота; планирование траектории и ее отработку;

- организацию реактивного двигательного поведения.

Решение всех перечисленных задач сопряжено с неопределенностями, вызванными, как правило, неточностью, противоречивостью и неполнотой сенсорной информации; возможной нечеткостью команд оператора; отсутствием решения, адекватного сложившейся ситуации и установке оператора.

В силу наличия существенной неопределенности задача синтеза системы управления движением МР являются весьма трудноформализуемой, поэтому получение аналитических формулировок зависимостей является крайне сложной задачей.

В таких условиях интерес представляет логико-лингвистический подход, применяемый для реализации управления сложными динамическими объектами с неоднозначной реакцией на одни и те же ситуации, которые могут быть описаны только качественно, на близком к естественному языке. Применительно к задачам непосредственно управления движением МР следует отметить, что их решение требует применения методов интеллектуальной обработки неточной, нечеткой, неполной и противоречивой информации, а также методов самообучения на основе взаимодействия со средой функционирования.

Рассмотренные особенности определяют необходимость синтеза систем управления движением МР на базе концепции построения интеллектуальных систем управления (ИСУ), которая базируется на трех ключевых положениях:

1. теории ситуационного управления;
2. иерархическом принципе построения систем управления;
3. использовании интеллектуальных вычислительных технологий.

Ключевые положения теории ситуационного управления, развиваемой научной школой под руководством Д. А. Поспелова, предполагают установку соответствия между классами ситуаций, считающихся допустимыми в процессе функционирования системы, и решениями по управлению в этих ситуациях. При этом сложившаяся ситуация определяется состояниями объекта управления и внешней среды.

Следовательно, практическая реализация ситуационного подхода предполагает создание развернутой базы знаний о

специфике использования различных алгоритмов управления, особенностях объекта управления, целях функционирования системы и т. п. Именно наличие механизмов хранения и обработки знаний является главной архитектурной особенностью ИСУ.

Иерархический принцип построения ИСУ предполагает формирование их структуры из стратегического, тактического и исполнительного (приводного) уровней управления. Целесообразность такого подхода определяется такими его кибернетическими преимуществами, как возможность параллельного выполнения различных операций, параллельной обработки различных информационных массивов, сокращение общего объема управляющей информации и времени на ее обработку и т. д.

Формальную реализацию логико-лингвистического подхода, обработку неопределенной информации, возможность самообучения обеспечивают интеллектуальные вычислительные технологии. Такие технологии могут применяться, как в общесистемных контурах управления роботом, так и для решения локальных задач его отдельных подсистем.

Однако считать систему управления интеллектуальной можно только в том случае, если технологии искусственного интеллекта, реализованные в общесистемных контурах, обеспечивают возможность автономного решения сложных неалгоритмизуемых интеллектуальных задач, включая самоусовершенствование в процессе активного взаимодействия с внешней средой при решении этих задач.

Под ИСУ понимается такая система оценки ситуаций и принятия решений, которая при использовании знаний на базе качественных понятий и структурных отношений между ними обеспечивает процесс управления объектом и в необходимых случаях на базе обратных связей, с помощью обобщенной оценки качества функционирования и достижимости поставленной цели осуществляет неоднократный выбор терминальных условий и критериальной базы, определяющих текущую цель управления, а также проводит реконфигурацию способа управления и программы действий, исходя из заданной высшей цели функционирования системы.

Обобщенная структурно-функциональная схема ИСУ робота представлена на рис. 3.4.

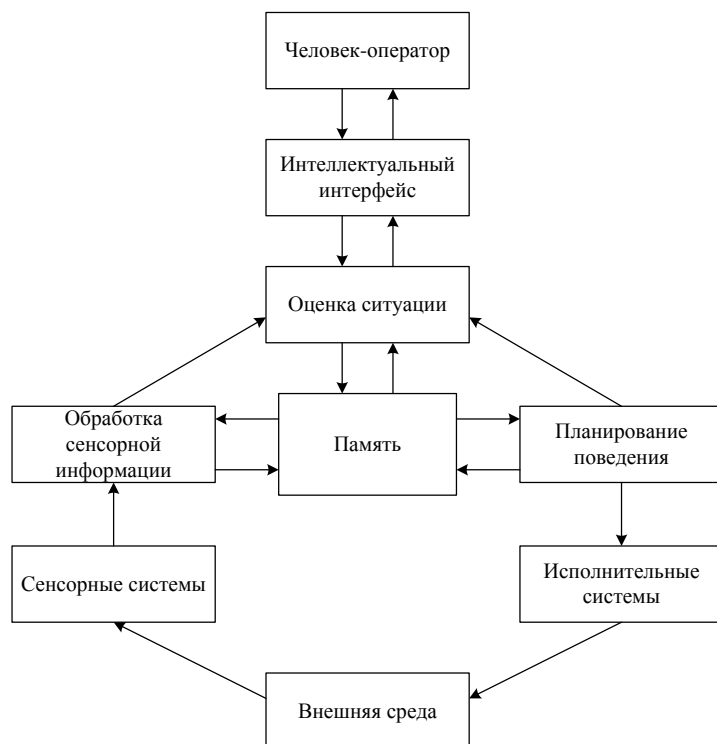


Рис. 3.4. Обобщенная структурно-функциональная схема интеллектуальной системы управления роботом

Центральным в рассматриваемой структуре является блок памяти, включающий базу знаний (БЗ) и базу данных (БД). В общем случае, БЗ содержит знания о внешней среде, БД – данные, как о внешней среде, так и о роботе. Возможно наличие специализированных БЗ и БД в отдельных системах робота.

БЗ содержит, как априорные знания, так и извлекаемые ИСУ в процессе функционирования робота. Знания представляют собой такую форму организации информации, отличительной особенностью которой является отражение закономерностей, действующих в какой-либо предметной области. В качестве примера знаний могут выступать, например, производственные правила, семантические сети и т. д.

Блок обработки сенсорной информации передает в блок памяти коррекцию сенсорной картины среды и получает от него экстраполяцию изменения состояния внешней среды.

Блоки оценки ситуации и планирования поведения получают

из памяти информацию о состоянии внешней среды. Первый из них оценивает это состояние и передает соответствующие оценки в блок памяти, а также корректирует цели управления и их приоритеты. Второй блок синтезирует план управления движением робота на базе поиска решения в пространстве состояний, декомпозиции задач. Синтезированный план передается в блок памяти.

Блок интеллектуального интерфейса обеспечивает связь с оператором. В общем случае этот блок должен быть связан со всеми рассмотренными функциональными блоками и обеспечивать развитый естественно-языковой интерфейс, предназначенный для поддержания активного человеко-машинного диалога и позволяющий обеспечивать оперативный ввод целеуказаний.

Структура ИСУ является иерархической. При этом каждый вышестоящий уровень реализует более сложный способ управления, что определяется ростом уровня неопределенности обрабатываемой информации, и вырабатывает решения реже. Верхний уровень управления образуют блоки обработки сенсорной информации, оценки ситуации, синтеза моделей внешней среды и робота, программ выполнения типовых операций. Нижний уровень включает исполнительные системы. Оператор может осуществлять непосредственное управление роботом на любом из уровней. Сложность задачи такого управления находится в обратной зависимости от уровня, на котором оно осуществляется.

В процессе функционирования робототехники, в том числе и мобильной, могут возникать непредвиденные ситуации, значения параметров которых существенно отличаются от эталонных, использовавшихся при начальной настройке параметров ИСУ экспертами, либо при первом обучении. В этой связи проблема самообучения робототехнических систем представляет большой интерес. Применительно к мобильным роботам это особенно актуально в силу невозможности априорного определения всех возможных ситуаций в недетерминированной среде их функционирования.

Весьма критичным требованием к ИСУ мобильного робота является оперативность выработки решений, определяемая динамикой среды функционирования. В значительной степени

быстродействие ИСУ зависит от вычислительной мощности её аппаратного обеспечения. Однако, в немалой степени на нее влияют и математические основы применяемого метода управления. Поэтому при анализе интеллектуальных подходов следует обратить внимание на их вычислительную емкость.

3.3. Математическое описание поведения мобильного колесного робота

Среди большого разнообразия РТС мобильные роботы отличаются активным взаимодействием с окружающей средой. Высокая подвижность МР достигается, в первую очередь, за счет увеличения числа приводных (активных) модулей и рационального расположения их на основании робота [22]. Усовершенствование кинематических характеристик, как правило, приводит к существенному усложнению динамической модели МР, что, в свою очередь, затрудняет процедуру синтеза законов управления.

При описании основных характеристик мобильных колесных роботов, рассматривают две подсистемы [22]: платформа и колесная подсистема (КП). Платформа является управляемой подсистемой, относительно которой оценивается поведение МР как транспортного модуля. В самом простом случае платформа может описываться массой m_0 и моментом инерции J_0 относительно центра масс или полюса платформы. Положение платформы на плоскости описывается декартовыми координатами $\{x, y\}$ и углом ориентации α .

Колесная (или управляющая) подсистема (КП) состоит из колесных модулей, которые включают колесные механизмы и соответствующие электроприводы колес и поворотных механизмов. КП действует на платформу посредством сил продольного F_1 , поперечного F_2 движений и момента M . Эти силы формируются за счет суммарного действия продольной движущей силы колесных модулей f_{pr}^j , поперечных сил трения скольжения f_{tr}^j и ориентации колес относительно платформы β_j (рис. 3.5).

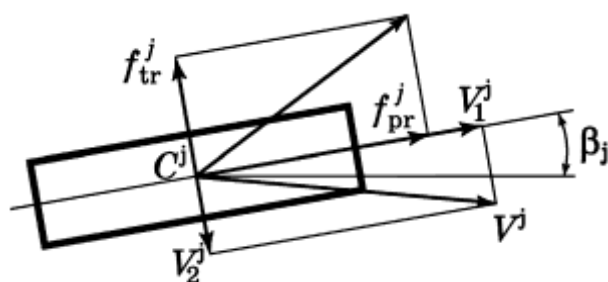


Рис. 3.5. Активные силы и скорости движения j -го колеса

Чтобы построить математическую модель колесного мобильного робота, рассмотрим конфигурацию с m независимыми ведущими колесными модулями, расположенными в произвольных точках координатной системы z , связанной с движущейся платформой. Для анализа линейных скоростей j -го колесного модуля введем подвижный базис τ^j , положение которого определяется ориентацией β_j колеса относительно платформы (рис. 3.6).

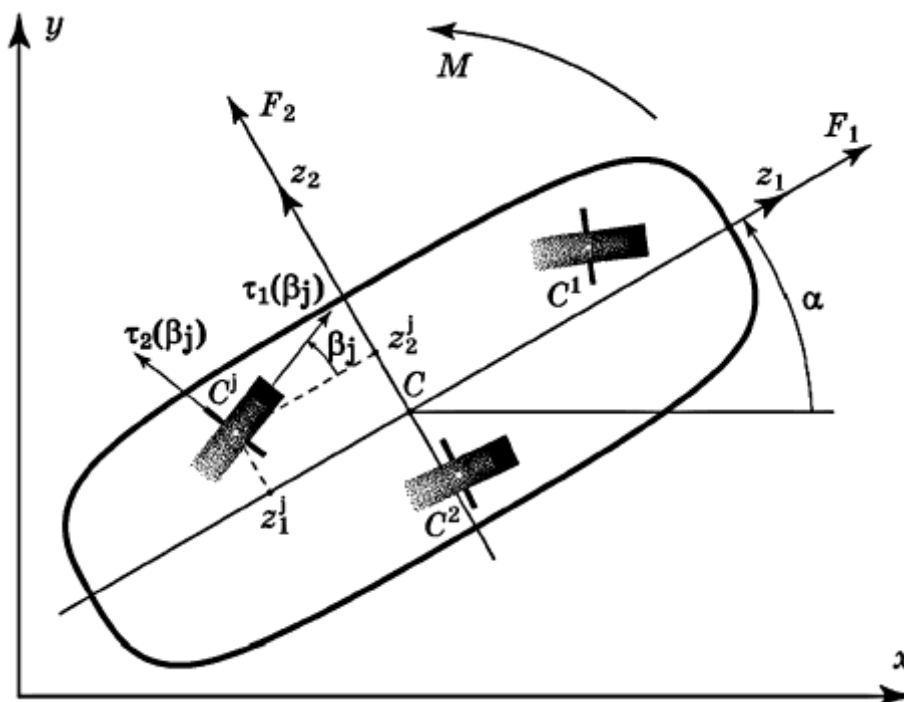


Рис. 3.6. Колесный робот в декартовой системе координат

Математическая модель колесного МР может быть построена на основе известных законов кинематики и динамики. При составлении модели учитывается суммарное действие на платформу сил, создаваемых колесными модулями: активные усилия ведущих приводов f_{pr}^j и поперечная сила трения скольжения f_{tr}^j .

Согласно [22], модель многоколесного МР в абсолютной системе координат имеет вид:

$$\begin{aligned}
 m_0 \ddot{x}(t) &= \sum_{j=1}^m (f_{pr}^j \cos \beta_j - f_{tr}^j \sin \beta_j) \cos \alpha - \sum_{j=1}^m (f_{pr}^j \sin \beta_j + f_{tr}^j \cos \beta_j) \sin \alpha \\
 m_0 \ddot{y}(t) &= \sum_{j=1}^m (f_{pr}^j \cos \beta_j - f_{tr}^j \sin \beta_j) \sin \alpha + \sum_{j=1}^m (f_{pr}^j \sin \beta_j + f_{tr}^j \cos \beta_j) \cos \alpha \\
 J_0 \ddot{\alpha}(t) &= \sum_{j=1}^m ((z_1^j \sin \beta_j - z_2^j \cos \beta_j) f_{pr}^j + (z_1^j \cos \beta_j + z_2^j \sin \beta_j) f_{tr}^j)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

где m – число колесных модулей. Линейная скорость колес в базисе τ_j определяется из выражений:

$$\begin{aligned}
 V_1^j &= \cos \beta_j (V_x \cos \alpha + V_y \sin \alpha - z_2^j \omega) + \sin \beta_j (V_y \cos \alpha - V_x \sin \alpha + z_1^j \omega) \\
 V_2^j &= -\sin \beta_j (V_x \cos \alpha + V_y \sin \alpha - z_2^j \omega) + \cos \beta_j (V_y \cos \alpha - V_x \sin \alpha + z_1^j \omega)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

где V_x и V_y – скорости МР в абсолютной (декартовой) системе координат. Сила трения скольжения, вызванная поперечным движением колеса, пропорциональна скорости поперечного движения:

$$f_{tr}^j = -k_j V_2^j \tag{3.5}$$

где k_j – коэффициенты продольного трения скольжения. При составлении математической модели был введен ряд следующих допущений [22]:

- колесная система содержит не менее двух колес и все они расположены в разных точках;
- влиянием пассивных колесных модулей можно пренебречь;
- активные колеса находятся в точечном контакте с поверхностью;
- не рассматриваются эффекты перераспределения нагрузки на колеса при маневрировании;
- не рассматривается эффект проскальзывания колес;
- движение робота рассматривается по горизонтальной плоскости;
- корпус робота считается твердым телом.

Для удобства дальнейшего рассмотрения представим модель (3.3) МР в форме Коши:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) &= x_2 \\
 m_0 \dot{x}_2(t) &= F_1 \cos x_5 - F_2 \sin x_5 \\
 \dot{x}_3(t) &= x_4 \\
 m_0 \dot{x}_4(t) &= F_1 \sin x_5 + F_2 \cos x_5 \\
 \dot{x}_5(t) &= x_6 \\
 J_0 \dot{x}_6(t) &= M
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

где:

$$\begin{aligned}
 x_1 = x, x_2 = \dot{x}(t), x_3 = y, x_4 = \dot{y}(t), x_5 = \alpha, x_6 = \dot{\alpha}(t), \\
 f_{tr}^j = -k_j (-\sin \beta_j \cdot (x_2 \cdot \cos x_5 + x_4 \cdot \sin x_5 - z_2^j \cdot x_6) + \cos \beta_j \cdot (x_4 \cdot \cos x_5 - x_2 \cdot \sin x_5 + z_1^j \cdot x_6))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \sum_{j=1}^m (f_{pr}^j \cos \beta_j - f_{tr}^j \sin \beta_j) \\
 F_2 &= \sum_{j=1}^m (f_{pr}^j \sin \beta_j + f_{tr}^j \cos \beta_j) \\
 M &= \sum_{j=1}^m ((z_1^j \sin \beta_j - z_2^j \cos \beta_j) f_{pr}^j + (z_1^j \cos \beta_j + z_2^j \sin \beta_j) f_{tr}^j)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Представленная математическая модель (3.7) МР с произвольным расположением ведущих колес отличается существенной нелинейностью, наличием избыточных каналов управления и наличием неголономных связей, что всегда характерно для транспортных модулей. Управляющими величинами, формирующими заданный режим движения, здесь являются продольные движущие силы колесных модулей f_{pr}^j (или моменты на валу колесных приводов) и ориентации колес относительно платформы β_j , т.е. имеется $2m$ каналов управления.

Анализ математической модели (3.6) позволяет сделать вывод, что в системе за счет совместного действия на платформу всех колесных модулей формируются три вектора сил: продольная

F_1 , поперечная F_2 и момент M (рис. 3.6). Эти силы в виде нелинейной зависимости связаны между собой через указанные выше $2m$ каналов управления.

Иерархический принцип организации системы управления для колесного МР, представленный на рис. 3.7, благодаря естественной динамической декомпозиции объекта управления, позволяет выделить более и менее динамичные подсистемы. Малоинерционные исполнительные устройства регулируются посредством уставок, поступающих с верхнего слоя системы управления, определяемых главной (глобальной) целью управления.

На рис. 3.7 приведена структура иерархической СУ со следующими обозначениями:

X – вектор состояния внешних координат,

ϑ – вектор внешних возмущений,

D – исполнительный привод,

P – регулятор исполнительного привода.

Верхний слой системы управления должен обеспечивать планирование траектории в декартовой системе координат и выдавать необходимые значения сил $F_1(x)$, $F_2(x)$ и момента $M(x)$ для подсистемы среднего слоя (СС) – подсистемы распределения сил и углов ориентации колесных модулей. Подсистема СС вычисляет продольные силы f_{pr} и углы ориентации β для каждого из колесных модулей и выдает их на регуляторы исполнительных приводов (нижний слой системы управления). Для регуляторов нижнего слоя данные величины являются технологическими инвариантами. В задачу регуляторов нижнего слоя входит отработка заданий, поступивших от СС.

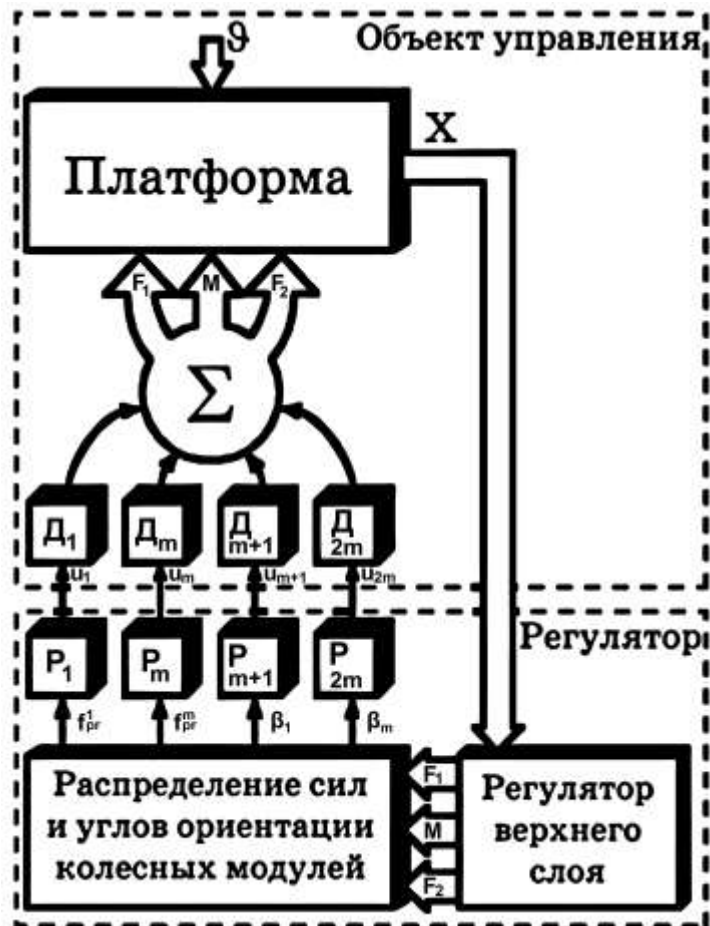


Рис. 3.7. Структурная схема иерархической системы управления

Конструкция МР, соответствующая структурной схеме на рис. 3.7, предусматривает наличие двух приводов у каждого колесного модуля. Один из приводов должен формировать заданную продольную силу f_{pr} (или момент на валу двигателя $M_d = f_{pr} \cdot r$, где r – радиус колеса), второй привод обеспечивает поддержание заданной ориентации колесного модуля β относительно платформы. Для каждого из приводов должен быть разработан локальный регулятор, в задачу которого входит стабилизация одной из указанных величин.

Для подсистем НС можно сформулировать следующие подмножества целей. Это, во-первых, развитие исполнительными приводами необходимого момента ($M = M_0 = \text{const}$) – для силомоментных двигателей, или отработку заданного угла поворота ($\theta_r = \theta_{r0} = \text{const}$) – для исполнительных приводов, обеспечивающих ориентацию колесных модулей, и, во-вторых, для

АД – поддержание требуемого электромагнитного состояния – $\psi_r = \psi_{r0} = \text{const}$.

Особенность синтеза регулятора для приводов при стабилизации момента M_c проявляется в неконтролируемом изменении скорости. Значение скорости определяется внешними факторами и зависит от момента сопротивления вращению. Основная модель многоколесного МР (3.3), описывающая ее кинематическую часть, позволяет выразить скорость вращения колеса через внешние координаты системы:

$$\omega_{rj} = \frac{\cos \beta_j (x_1 \cos x_6 + x_3 \sin x_6 - z_2^j x_5) + \sin \beta_j (x_3 \cos x_6 - x_1 \sin x_6 + z_1^j x_5)}{r}$$

где: r – радиус колеса, j – порядковый номер колеса.

Приведенное выражение отражает свойство неголономности в системе, что накладывает дополнительные трудности при синтезе СУ.

Тема 4. Управление пространственным движением

Важной проблемой теории и практики управления пространственным движением твердого тела (в том числе воздушных, космических, подводных и наземных движущихся объектов) за последние 50 лет была и остается проблема синтеза векторных регуляторов – автопилотов в её различных постановках. Крупный вклад в решение этой проблемы сделан научной школой А.А. Красовского [28, 29], в которой развиты методы аналитического конструирования автопилотов для разных классов летательных аппаратов (ЛА) на основе функционала обобщенной работы (ФОР). В работах В.Н. Букова [30] показано эффективное применение метода ФОР с использованием прогнозирующей модели процесса управления. Развиваемые в последнее время различные методы и подходы к построению законов управления нелинейными объектами различных классов отражены в известных трудах [31, 32] И.В. Мирошника, В.О. Никифорова, А.Л. Фрадкова, где, в частности, предложены методы адаптивного управления пространственным движением. О все возрастающих требованиях к динамическим свойствам пространственного движения указанных объектов говорит, например, тот факт, что к современным и перспективным типам ЛА различных компоновок в настоящее время предъявляются повышенные требования к маневренности и управляемости, поскольку область применения таких аппаратов весьма широка и предполагает полет на режимах, близким к критическим, как, например, полет и маневрирование на сверхмалой высоте в условиях сложного рельефа местности, и т.д. Поэтому актуальность и важность указанной проблемы не только не снижаются, но и нарастают, требуя привлечения новых подходов и методов теории синтеза систем управления.

Используемые на практике методы и подходы теории управления для синтеза автопилотов, как правило, опираются на линеаризованные математические модели подвижных объектов, представленные в виде вход-выходных соотношений. Применение нелинейных (исходных) моделей движения затруднено из-за

сложности методов синтеза регуляторов, «работающих» с многомерными многосвязными нелинейными объектами.

Следует отметить, что не для всех режимов движения «упущенные» нелинейности в математической модели (динамические свойства) оказывают существенное влияние. Например, при поддержании заданных параметров продольного движения, процессы, протекающие в системе «объект управления - автопилот» в режиме малых отклонений, можно, с физической точки зрения, условно назвать линейными и согласится с адекватностью линеаризованной модели.

Однако очевидно, что обязательно будут существовать такие режимы (в частности экстремальные), когда синтезированный «линейный» регулятор не сможет обеспечить желаемого функционирования системы управления подвижным объектом. В особых высокоманевренных режимах движения актуально наличие автопилота (авторулевого), учитывающего как можно точнее свойства объекта управления. Решением этой проблемы является синтез законов управления движением на основе полной нелинейной математической модели объекта, как наиболее точно отражающей динамику системы с физической точки зрения.

Для синтеза алгоритмов управления такими системами целесообразно использовать метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). В рамках этого метода возможна работа с полной нелинейной моделью движения. Анализ движения объекта можно проводить с учетом всех координат системы, то есть, в отличие от традиционного подхода - конструирования отдельного стабилизирующего управления для каждого канала (контура) регулирования, в этом подходе используется совместное (координированное) управление по всем переменным с целью перевода объекта в желаемое состояние.

4.1. Математическое описание пространственного движения твёрдого тела

Прежде чем приступать к описанию математических моделей движения твёрдого тела, дадим определения системам координат, в которых эти модели записаны. Вид математической модели движения твёрдого тела, записанной в разных системах координат, может также существенно различаться. При этом, очевидно, что необходим такой выбор направлений осей системы координат, чтобы форма записанных законов движения имела наиболее удобный вид для последующего применения в процедурах анализа и синтеза алгоритмов управления. Общепринято описание движения в прямоугольных правых системах координат. В инженерном справочнике [33] приведено описание различных систем координат и их обозначение и классификация в соответствии с ГОСТ. При решении задач управления пространственным движением необходимо использовать как минимум два вида систем координат – подвижную систему, связанную с объектом (обычно – его центром масс), и неподвижную, связанную с началом координат в какой либо точке пространства.

В качестве неподвижной системы координат выберем нормальную земную систему координат [33], с началом координат O_0 на поверхности земли в точке старта (либо в любой другой допустимой точке пространства в соответствии с конкретными условиями решаемой задачи). При этом начальное направление движения объекта совпадает с направлением оси X_g , оси X_g и Z_g взаимно перпендикулярны и расположены в горизонтальной плоскости. Ось Y_g направлена вертикально вверх (рис. 4.1). Вращением Земли и влиянием других небесных тел пренебрегаем.

Подвижная нормальная система координат [30] связана с центром масс твёрдого тела; примем, что её оси параллельны нормальной земной системе координат. Относительное положение этих двух систем координат определяется радиус-вектором r между их началами, что показано на рис. 4.1. Проекция радиус-вектора r на ось OY_g определяет геометрическую высоту полета.

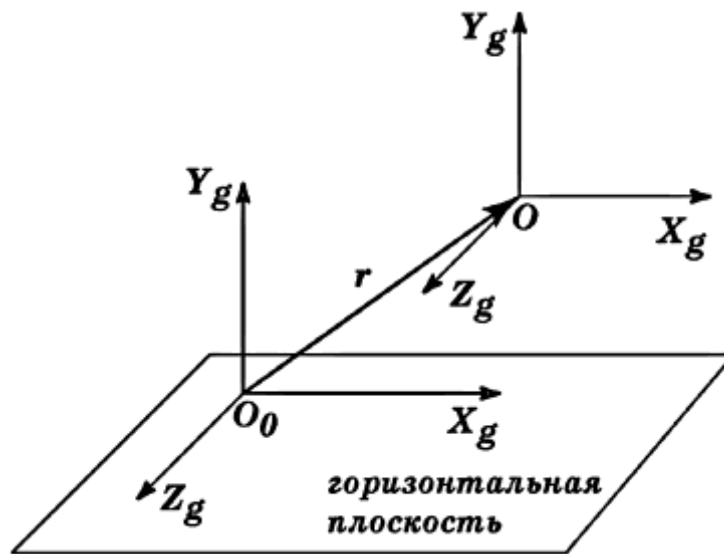


Рис. 4.1. Инерциальная система отсчета

Для определения угловых координат твердого тела относительно инерциальной системы отсчета используется связанная система координат. Положение связанной системы координат относительно нормальной системы координат определяется тремя углами поворота систем относительно друг друга - углами тангажа ϑ , крена γ и рыскания (курса) χ – рис. 4.2. Эти углы аналогичны корабельным углам, введенным А.Н. Крыловым [34]. Угол ϑ образован продольной осью OX и горизонтальной плоскостью, угол χ заключен между осью OX_g нормальной системы координат и проекцией оси OX на горизонтальную плоскость, угол γ характеризует поворот объекта управления вокруг продольной оси OX .

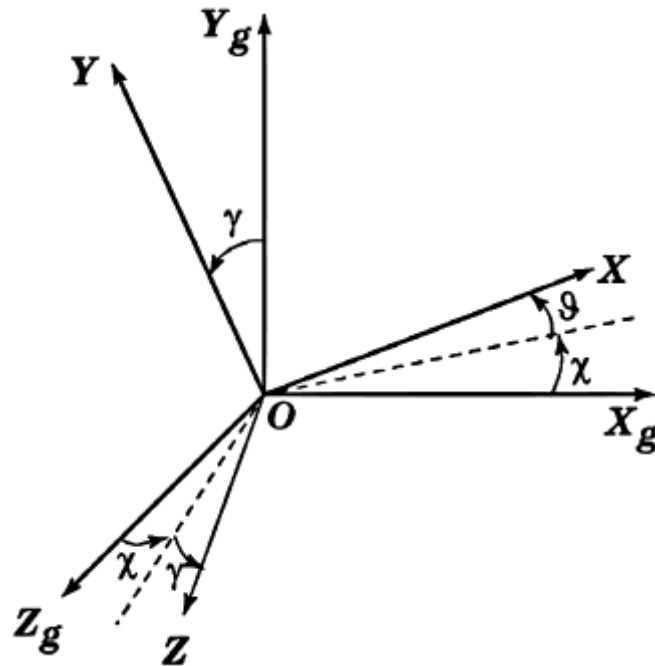


Рис. 4.2. Связь между земной и связанной системами координат: углы Эйлера

Углы тангажа, крена, рыскания имеют общее название – углы Эйлера, что дает наименование одному из вариантов записи математической модели движения, которая будет приведена далее. В такой записи использование углов Эйлера основано на предположении, что угол тангажа $\vartheta \neq \pi / 2$.

При исследовании действия аэродинамических сил и моментов в ряде случаев используется скоростная система координат. В этой системе ось OX_c направляют по вектору скорости полета относительно воздушной среды (скоростная ось). Ось OY_c лежит в плоскости симметрии, направлена вверх (ось подъемной силы). Ось OZ_c – боковая ось (направлена вправо). В скоростной и полусвязанной системах координат учитываются параметры полета, связанные с направлением вектора скорости – углы атаки α и скольжения β . Угол атаки α лежит между продольной осью ЛА OX и проекцией вектора скорости полета на плоскость симметрии ЛА XOY ; угол скольжения β лежит между направлением вектора скорости полета и плоскостью симметрии. При $\alpha = \beta = 0$ скоростная и связанная системы совпадают. Связь полусвязанной системы $OX_1Y_1Z_1$ и связанной системы $OXYZ$ и вектора скорости показана на рис. 4.3.

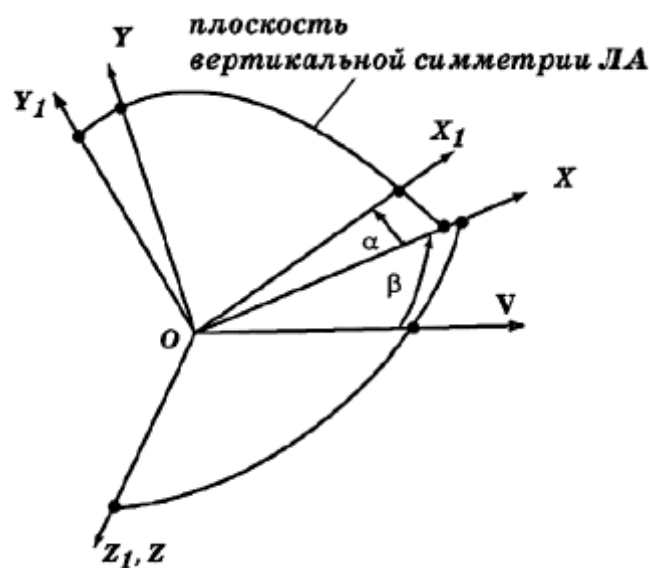


Рис. 4.3. Полусвязанная система координат: углы атаки и скольжения

Взаимное расположение скоростной и земной систем координат определяется углом θ наклона траектории движения относительно горизонтальной плоскости и путевым углом Ξ (рис. 4.4).

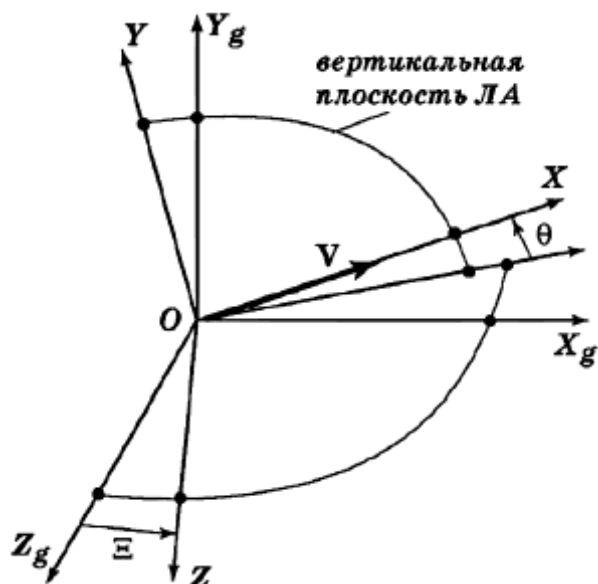


Рис. 4.4. Скоростная система координат: угол наклона траектории и путевой угол

Таким образом, положение и ориентация объекта по отношению к началам земной и связанной с центром масс систем координат определяется линейными и угловыми координатами. Однако для воздушного летательного аппарата традиционно используются также дополнительные параметры его полета, характеризующие движение самолета по отношению к набегающему воздушному потоку: воздушная скорость $|V|$; углы атаки α и скольжения β , изменение которых приводит к изменению значений аэродинамических коэффициентов компоновочной схемы ЛА; угол наклона траектории θ ; угол поворота траектории в горизонтальной плоскости Ξ . Связь этих углов между собой и с компонентами скорости определяется следующими соотношениями [30]:

$$\begin{aligned}
 |V| &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \\
 \operatorname{tg} \alpha &= -\frac{V_y}{V_x}; \\
 \sin \beta &= \frac{V_z}{|V|}; \\
 \vartheta &= \alpha + \theta; \\
 \Xi &= \beta + \theta_h
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

где θ_h – угол наклона траектории к горизонтальной плоскости.

Соотношения (4.1) необходимы при формировании технологических инвариантов [6] систем в задачах синтеза регуляторов.

Вид математической модели движения твердого тела зависит от выбора системы координат, в которой эта модель записана. Различные формы записи уравнений движения твердого тела приведены в ряде известных справочников, учебников и монографий, как, например в [28, 30, 33-38].

При анализе и формировании математической модели подвижного объекта также были приняты следующие допущения:

- конструкция считается жесткой;
- масса постоянна (кроме специально оговоренных случаев)

и отсутствует жидкое наполнение;

- главные оси инерции совпадают с осями связанной системы координат;

- сила тяги двигателя лежит в плоскости симметрии объекта и направлена вдоль вектора, проходящего через его центр масс и составляющего с осью OX угол φ . По умолчанию $\varphi = 0$;

- атмосфера является стандартной по ГОСТ 4401-81 (для воздушных ЛА).

Для записи систем уравнений движения использовалась система координат, связанная с центром масс, в качестве неподвижной системы принята земная система с началом координат в заданной точке [28, 30, 33-38].

В рассматриваемом случае объект управления считается твердым телом. Полная математическая модель на основании уравнений механики (законов Ньютона) такого объекта является нелинейной [27, 28, 30, 33-38] и представляется в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику и кинематику вращательного и поступательного движений. Таким образом, пространственное движение состоит из:

- движения центра масс по траектории;
- движения твердого тела относительно центра масс.

Эти движения имеют шесть степеней свободы.

Наиболее распространенной формой записи уравнений движения твердого тела является форма Коши [27].

Поэтому модель объекта управления (в том числе и ЛА) целесообразно представлять в следующей форме [27, 30]:

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = f(x, u, a, t, \xi) \quad (4.2)$$

где:

x – вектор состояния размерности n ;

u – вектор управления, размерности r , $r < n$;

ξ – вектор возмущений (возмущающих воздействий) размерности q ;

t – время;

f – векторная функция векторного аргумента;

a – вектор параметров, в общем случае неизменяемых ($\dot{a}(t) = \frac{da(t)}{dt} = 0$), а также не требующих измерения в процессе управления.

В случае рассмотрения стационарной системы, в выражении (5.2) время в явном виде как аргумент векторной функции будет отсутствовать. Вид, в котором задана функция f , может быть аналитическим, численным (табличным) или численно-аналитическим [27].

Для описания и исследования вращательного движения твердого тела вокруг центра масс наиболее распространенными являются три формы [30] уравнений движения, связанные с:

- углами Эйлера;
- направляющими косинусами углов;
- кватернионами (параметрами Родрига-Гамильтона).

Третья форма записи уравнений движения используется при моделировании на пилотажных стендах, первая форма является традиционной и широко распространенной, вторая форма является наиболее универсальной, поскольку в ней отсутствуют ограничения на величину угла тангажа. Применение математической модели, записанной через направляющие косинусы углов, необходимо при рассмотрении, например, высокоманевренных самолетов.

Динамика поступательного движения ЛА описывается следующей системой дифференциальных уравнений [30]:

$$\begin{aligned}\dot{V}_x(t) &= V_y \omega_z - V_z \omega_y + \frac{1}{m} F_x; \\ \dot{V}_y(t) &= V_z \omega_x - V_x \omega_z + \frac{1}{m} F_y; \\ \dot{V}_z(t) &= V_x \omega_y - V_y \omega_x + \frac{1}{m} F_z,\end{aligned}\tag{4.3}$$

где:

m – масса объекта (в общем случае – постоянна);

V_x, V_y, V_z – компоненты вектора линейной скорости V центра масс;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости ω вращения твердого тела на оси системы координат, связанной с центром масс;

$[F_x F_y F_z]^T = F$ – главный вектор сил.
 F определяется выражением

$$F = G + P + R, \quad (4.4)$$

где:

G – вектор силы тяжести,

P – вектор силы тяги двигателя,

R – равнодействующий вектор аэродинамических или гидродинамических сил.

Динамика вращательного движения описывается уравнениями [30]:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x(t) &= \frac{I_y - I_z}{I_x} \omega_y \omega_z + \frac{1}{I_x} M_x; \\ \dot{\omega}_y(t) &= \frac{I_z - I_x}{I_y} \omega_x \omega_z + \frac{1}{I_y} M_y; \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{I_x - I_y}{I_z} \omega_x \omega_y + \frac{1}{I_z} M_z, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где:

I_x, I_y, I_z – моменты инерции относительно осей системы координат;
 $[M_x M_y M_z]^T = M$ – вектор составляющих момента количества движения, в общем случае состоящий из суммы вектора аэродинамического момента M_a и гироскопического момента $M_{\text{гир}}$, создаваемого двигателем, т.е.

$$M = M_a + M_{\text{гир}} \quad (4.6)$$

Уравнения кинематики поступательного движения [30]:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= V_x \cos \chi \cos \vartheta + V_y (\sin \gamma \sin \vartheta - \cos \gamma \cos \chi \sin \vartheta) + V_z (\cos \gamma \sin \chi + \sin \gamma \cos \chi \sin \vartheta); \\ \dot{Y}(t) &= V_x \sin \vartheta + V_y \cos \gamma \cos \vartheta - V_z \sin \gamma \cos \vartheta; \\ \dot{Z}(t) &= -V_x \sin \chi \cos \vartheta + V_y (\sin \gamma \cos \chi + \cos \gamma \sin \chi \sin \vartheta), \end{aligned} \quad (4.7)$$

Уравнения кинематики вращательного движения, записанные через углы Эйлера, имеют вид [30]:

$$\begin{aligned}\dot{\vartheta}(t) &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \dot{\gamma}(t) &= \omega_x - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma); \\ \dot{\chi}(t) &= \omega_y \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} - \omega_z \frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta}\end{aligned}\tag{4.8}$$

Таким образом, полной нелинейной моделью пространственного движения твердого тела на примере жесткого ЛА, записанной через углы Эйлера, будут являться системы уравнений (4.3), (4.5), (4.7), (4.8). Порядок системы $n = 12$.

4.2. Иерархическая структура математических моделей движения

При применении различных методов синтеза устройств и законов управления сложными техническими системами неизбежно введение некоторой совокупности допущений, упрощений, а также разбиение исходной задачи или объекта управления на ряд более простых подзадач или подсистем. Проблема состоит во введении необходимых допущений таким образом, чтобы используемая исходная математическая модель и построенные на её основе регуляторы были в достаточной степени адекватны поведению рассматриваемого физического объекта.

Одним из известных подходов к разрешению проблемы сложности системы может быть применение различных видов декомпозиции моделей объектов [30, 31]. При анализе сложных динамических объектов управления на этапе выбора или формирования «рабочей» математической модели различают следующие виды декомпозиции систем [31]:

- структурная (объектная) декомпозиция – выделение более простых подсистем, допускающих отдельное рассмотрение;
- функциональная (задачно-ориентированная) декомпозиция – разбиение общей проблемы на несколько частных задач различного уровня иерархии;
- временная декомпозиция – выделение отдельных режимов работы системы.

При анализе многосвязных многомерных объектов широко применяется первый вид декомпозиции, в связи с чем проявляются уже упомянутые недостатки применения традиционных методов синтеза. Применительно к летательным аппаратам и другим подвижным объектам, структурная декомпозиция состоит в выделении изолированных каналов управления отдельно для каждой переменной системы. К таким подсистемам относятся, например, канал управления углом тангажа, канал выдерживания вертикальной скорости полета при посадке и т.д. Такое разделение происходит при линеаризации исходной математической модели и пренебрежении перекрестными связями между каналами управления. Подобное «упрощение» позволяет полностью описать все технические блоки, входящие в рассматриваемые контуры

управления – от системы датчиков до исполнительного механизма, включая в некоторых случаях динамику приводов рулевых машинок и т.д. Однако очевидно, что при синтезе векторных регуляторов использование нелинейной модели высокого порядка, также описывающей все технические средства управления полетом, приведет к избыточному усложнению самой процедуры синтеза законов управления, а вид возможных полученных законов управления будет чрезвычайно сложен для технической реализации. Более того, такой подход самоисключает какую-либо универсальность и возможность серьезной модернизации предлагаемых законов управления и процедур их синтеза, поскольку они будут непосредственно привязаны к уникальной комбинации рассматриваемых технических средств управления.

Поэтому при анализе нелинейной модели пространственного движения предлагается использовать второй и третий подходы к декомпозиции системы. В первую очередь, это временная декомпозиция – постановка разного набора целей и приоритетов при управлении различными режимами движения. Функциональная (задачно-ориентированная) декомпозиция достигается, например, при следующей иерархии в решении проблем управления полетом:

1. Нахождение законов управления изменением обобщенных сил и моментов сил, входящих в систему уравнений (4.3), (4.5), (4.7), (4.8). Полученные законы будут являться базовыми универсальными алгоритмами управления для подвижных объектов различных компоновочных схем, пространственное движение которых может быть описано системой уравнений (4.3), (4.5), (4.7), (4.8).

2. На основе полученных базовых универсальных законов изменения сил и моментов в соответствии с заданной компоновочной схемой (назначением и расположением органов управления) находятся законы, описывающие отклонение рабочих управляющих органов в зависимости от состояния объекта и поставленных задач. Эти законы будут являться задающими воздействиями (целями управления) для исполнительных механизмов управляющих поверхностей.

3. Локальные регуляторы исполнительных механизмов (управление на нижнем уровне) формируют программы управления для электрических или гидравлических приводов рулевых машинок, реализующих заданное отклонение управляющих поверхностей.

Структура описанной иерархической схемы синтеза показана на рис. 4.5. Отметим, что задачно-ориентированное иерархическое управление в полной мере соответствует понятиям «внешних» и «внутренних» управлений [6, 21, 39] метода АКАР. Также следует добавить, что в результате применения указанных принципов декомпозиции рассматриваемая задача управления движением системы в целом дополняется правилами взаимодействия подсистем [31], например, ограничениями на управление, вводимыми на уровне локальных регуляторов.

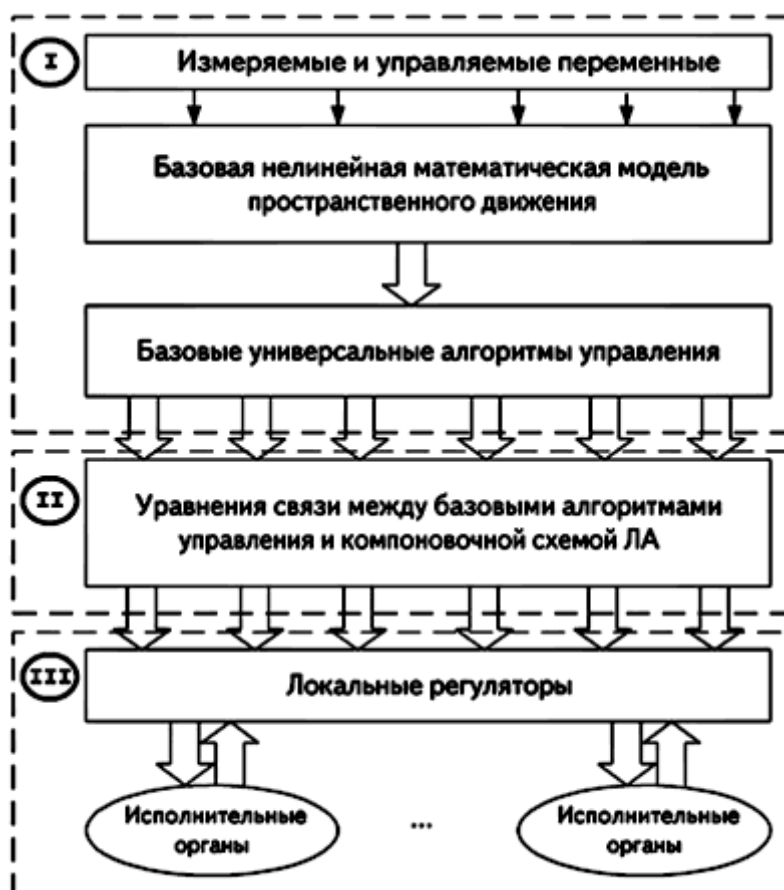


Рис. 4.5. Иерархическое управление – уровни иерархии:
 I – верхний, II – средний, III – нижний

Однако, для некоторых, но весьма актуальных задач управления движением конкретных объектов и режимов их функционирования будет целесообразна изначальная модификация в допустимых пределах исходной общей модели пространственного движения, отражающая цели управления и условия среды. Другими словами, на основе нелинейной модели движения 12-го порядка можно получить нелинейные модели как для различных режимов «работы» объекта, так и отличающихся внешних условий. Зависимость моделей движения некоторых объектов от общей модели пространственного движения (4.3), (4.5), (4.7) и (4.8) и индивидуальных особенностей и внешних условий приведена на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Взаимосвязанные модели пространственного движения

Необходимость рассмотрения и анализа широкого спектра задач управления движением предъявляет различные требования к точности представления математической модели ЛА. Широко используемое на практике разделение уравнений пространственного движения на уравнения бокового и

продольного движения и, как следствие, их изолированное исследование допустимо только в режиме малых возмущений (под возмущениями в данном случае понимается, в том числе, и желаемое изменение характеристик полета, например высоты) и управляющих воздействий [40]. В случае, когда действующие возмущения велики, требуется рассматривать нелинейные уравнения пространственного движения. Более того, для изучения особенностей динамики самолета при выходе некоторых характеристик движения за допустимые границы их изменения необходимо рассмотрение так называемых критических режимов полета (сваливание, штопор и т.п.), что в большинстве своем требует анализа практически полных уравнений, описывающих движение самолета.

4.3. Математическая модель пространственного движения воздушного летательного аппарата

В общем случае для управления полетом ЛА необходимо изменять входящие в правые части уравнений динамики пространственного движения твердого тела (4.3) и (4.5) силы F и моменты сил M [30], действующие на ЛА, посредством отклонения управляющих поверхностей ЛА и изменением режима работы его двигателя. Для иллюстрации возможности реализации исполнительных устройств для всех шести степеней свободы приведем схему ЛА [30] (рис. 4.7) с возможным расположением аэродинамических рулевых органов, соответствующим современным концепциям построения ЛА и систем управления. Такие управляющие поверхности различаются по принципу действия, но в результате их использование приводит к появлению дополнительных аэродинамических сил, входящих в (4.4) и (4.6).

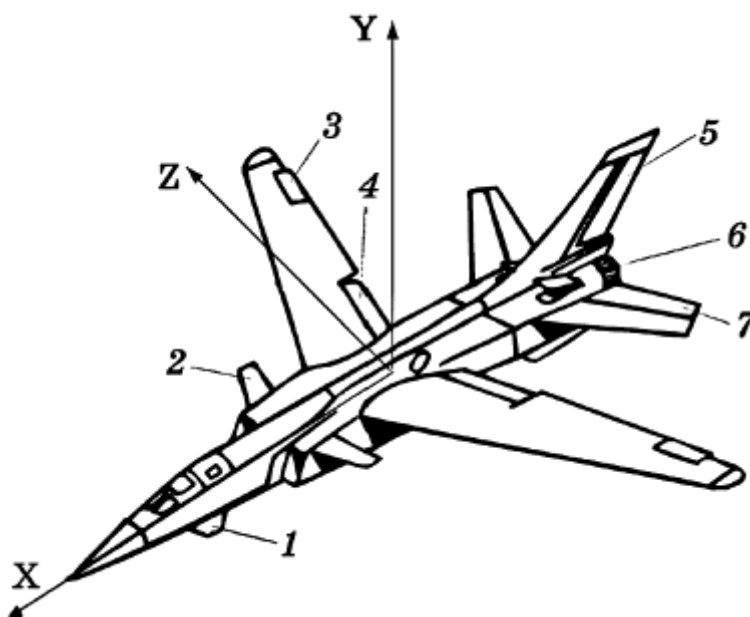


Рис. 4.7. Схема современного ЛА с возможным расположением органов управления

На рис. 4.7 обозначены как традиционные рулевые органы: 3 — элероны, 5 — руль направления, 7 — руль высоты (для создания управляющих моментов вокруг осей X , Y , Z); так и дополнительные управляющие поверхности: 1 — продольное переднее оперение, 2 —

горизонтальное переднее оперение, 4 – закрылки, 6 – тормозные щитки (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Условное обозначение управляющего органа	Название управляющего (рулевого) органа	Единица измерения перемещений
$\delta_{п.о.}$	продольное переднее оперение	градусы
$\delta_{г.о.}$	горизонтальное оперение	градусы
$\delta_{э.}$	элероны	градусы
$\delta_{з.}$	закрылки	градусы
$\delta_{р.н.}$	руль направления	градусы
$\delta_{т.щ.}$	тормозные щитки	доли диапазона
$\delta_{р.в.}$	руль высоты	градусы
$\delta_{р.у.}$	ручка управления двигателем	доли диапазона

Входящие в правые части уравнений динамики вращательного и поступательного движений (системы (4.3), (4.5)) управляющие результирующие линейные силы F и моменты сил M представляют собой сложные функциональные зависимости от углов отклонений управляющих поверхностей, тяги двигателя, высоты и скорости полета, динамики исполнительных приводов и т.д. На определенном этапе анализа и синтеза систем управления может быть поставлена задача определения требуемых величин векторов сил и моментов сил для достижения цели управления в общем виде, без раскрытия указанных зависимостей. В такой постановке задачи для системы вида (4.2) размерность векторного пространства $\dim u = 6$.

Однако, такое обобщенное описание вектора управляющих воздействий не совсем пригодно для практического применения. Необходимо раскрытие указанных векторов сил (4.4) и моментов

(4.6) до непосредственных зависимостей от углов отклонения (поворота) и (или) скорости поворота конкретных управляющих поверхностей. Рассмотрим подробнее соотношения (4.4) и (4.6).

В нормальной системе координат вектор силы тяжести имеет вид [30]:

$$G = [0 \ -gm \ 0], \quad (4.9)$$

где g – ускорение свободного падения. Для введения вектора силы тяжести (а также других сил и моментов) в уравнения системы (4.3) необходимо добавить к ним компоненты вектора (4.9).

Сила тяги двигателя P для случая плоскосимметричного одномоторного самолета есть вектор, составляющие которого [28, 30] в связанной системе координат равны:

$$P = P(\delta_{p.y.}, |V|, H) [\cos \varphi \ \sin \varphi \ 0]^T, \quad (4.10)$$

где H – высота полета. Величина тяги двигателя $P(\delta_{p.y.}, |V|, H)$ зависит от положения ручки управления двигателем $\delta_{p.y.}$, скорости, высоты полета, и, в общем случае, от времени.

Аэродинамические силы, действующие на ЛА, определяются конфигурацией ЛА и характером обтекания его воздушным потоком. Для связанной системы координат [30]:

$$R = qS [c_x \ c_y \ c_z]^T, \quad (4.11)$$

где q – скоростной напор, определяемый формулой

$$q = \frac{\rho |V|^2}{2}, \quad (4.12)$$

где:

ρ – плотность воздуха, зависящая от высоты H полета и устанавливаемая для стандартной атмосферы по ГОСТ 4401-81 [33];

S – площадь крыла самолета;

c_i – безразмерные коэффициенты аэродинамических сил.

Зависимость $\rho(H)$ можно также определить по приближенной формуле [38, 41] в предположении изотермичности атмосферы (при постоянной температуре $T = 15,15^\circ\text{C}$):

$$\rho \approx \rho_0 \cdot \exp(-\lambda H), \quad (4.13)$$

где $\rho_0 = 0,12492 \text{ [кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4]$ – плотность воздуха земной атмосферы на уровне моря; для высот полета $H \leq 10000 \text{ м}$ коэффициент $\lambda = 10^{-4} \text{ [1/м]}$. В случае необходимости более точного учета изменения параметров атмосферы вместо формулы (4.13) следует использовать другие соотношения, приведенные в [41]. Слагаемые выражения (4.6) имеют следующий вид [30]:

$$M_a = qSB[m_x \quad m_y \quad m_z]^T, \quad (4.14)$$

$$M_{зв} = K_{дв}[0 \quad -\omega_z \quad \omega_y]^T, \quad (4.15)$$

где:

q определяется выражением (4.12);

$B = \text{diag}(l, l, b_A)$ – диагональная матрица линейных размеров ЛА: размаха крыла l , средней аэродинамической хорды крыла b_A ;

$K_{дв}$ – суммарный момент количества движения вращающихся частей двигателя ($K_{дв} < 0$).

В (4.11) и (4.14) также входят коэффициенты аэродинамических сил c_x, c_y, c_z и моментов m_x, m_y, m_z . Эти коэффициенты в общем случае являются сложными функциями конфигурации ЛА (его компоновки, положения рулевых органов) и условий полета, т.е. зависят от следующих параметров [30]:

$$\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \delta, \dots, \text{Ma, Re} \quad (4.16)$$

где:

$\text{Ma} = |V| / a$ – число Маха;

a – скорость звука на высоте полета;

δ – угловое положение (отклонение) рулевых органов

$\text{Re} = (|V| \cdot b_A) / \nu$ – число Рейнольдса;

ν – кинетический коэффициент вязкости воздуха.

Для ЛА с компоновочной схемой, показанной на рис. 4.7, обозначения возможных рулевых органов δ представлены в табл. 4.1 [30, 38]. Функциональные зависимости аэродинамических сил и моментов от параметров (4.16) объекта управления могут быть получены различными способами, в том числе [30]:

- экспериментальным исследованием физических масштабных моделей ЛА в аэродинамических трубах,
- математическим расчетом аэродинамических характеристик на основе теории движения тела в среде,
- идентификацией аэродинамических характеристик по результатам летных экспериментов.

При анализе объекта с целью проектирования системы управления необходима информация об указанных зависимостях и коэффициентах – эти данные должны входить в техническое задание [36] на разработку системы. Принятым является представление этих зависимостей в виде функциональных рядов, например, в следующем виде для компоновочной схемы самолета, представленного на рис. 4.7 [30]:

$$\begin{aligned} c_x &= c_x(\alpha) + c_x^{\delta_{P.B.}}(\alpha)\delta_{P.B.} + c_x^{\delta_{T.Ш.}}(\alpha)\delta_{T.Ш.} + c_x^{\delta_3}(\alpha)\delta_3, \\ c_y &= c_y(\alpha) + c_y^{\delta_{P.B.}}(\alpha)\delta_{P.B.} + c_y^{\delta_{T.O.}}(\alpha)\delta_{T.O.} + c_x^{\delta_3}(\alpha)\delta_3, \\ c_z &= c_z^\beta(\alpha)\beta + c_z^{\delta_{P.B.}}(\alpha)\delta_{P.B.} + c_z^{\delta_{П.О.}}(\alpha)\delta_{П.О.} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} m_x &= m_x(\alpha, \beta) + \tilde{m}_x^{\bar{\omega}_x}(\alpha)\bar{\omega}_x + \tilde{m}_x^{\bar{\omega}_y}(\alpha)\bar{\omega}_y + \tilde{m}_x^{\delta_\Delta}(\alpha)\delta_\Delta + \\ &+ \tilde{m}_x^{\delta_{P.H.}}(\alpha)\delta_{P.H.} + \tilde{m}_x^{\delta_{П.О.}}(\alpha)\delta_{П.О.} \\ m_y &= m_y(\alpha, \beta) + \tilde{m}_y^{\bar{\omega}_x}(\alpha)\bar{\omega}_x + \tilde{m}_y^{\bar{\omega}_y}(\alpha)\bar{\omega}_y + \tilde{m}_y^{\delta_\Delta}(\alpha)\delta_\Delta + \\ &+ \tilde{m}_y^{\delta_{P.H.}}(\alpha)\delta_{P.H.} + \tilde{m}_y^{\delta_\Delta\delta_{P.B.}}(\alpha)\delta_\Delta\delta_{P.B.} + \tilde{m}_y^{\delta_{П.О.}}(\alpha)\delta_{П.О.} \\ m_z &= m_z(\alpha) + \tilde{m}_z^{\bar{\omega}_z}(\alpha)\bar{\omega}_z + \tilde{m}_z^{\delta_{P.B.}}(\alpha)\delta_{P.B.} + \tilde{m}_z^{\delta_3}(\alpha)\delta_3 + \tilde{m}_z^{\delta_{T.O.}}(\alpha)\delta_{T.O.} \end{aligned} \quad (4.18)$$

где, кроме описанных в табл. 4.1 углов отклонения управляющих поверхностей, другие переменные коэффициенты, зависящие от углов атаки α и скольжения β , являются аэродинамическими характеристиками рассматриваемого ЛА. Верхними индексами обозначены соответствующие производные аэродинамических

коэффициентов, символом « \sim » - обобщенные производные аэродинамических коэффициентов:

$$\begin{aligned}
 \tilde{m}_z^{\bar{\omega}_z}(\alpha) &= m_z^{\bar{\omega}_z}(\alpha) + \dot{m}_z^{\alpha}(\alpha) \\
 \tilde{m}_x^{\bar{\omega}_x}(\alpha) &= m_x^{\bar{\omega}_x}(\alpha) + \dot{m}_x^{\beta}(\alpha) \cdot \sin \alpha \\
 \tilde{m}_x^{\bar{\omega}_y}(\alpha) &= m_x^{\bar{\omega}_y}(\alpha) + \dot{m}_x^{\beta}(\alpha) \cdot \cos \alpha \\
 \tilde{m}_y^{\bar{\omega}_x}(\alpha) &= m_y^{\bar{\omega}_x}(\alpha) + \dot{m}_y^{\beta}(\alpha) \cdot \sin \alpha \\
 \tilde{m}_y^{\bar{\omega}_y}(\alpha) &= m_y^{\bar{\omega}_y}(\alpha) + \dot{m}_y^{\beta}(\alpha) \cdot \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

В (4.19) чертой отмечены безразмерные угловые скорости:

$$\begin{aligned}
 \bar{\omega}_x &= \frac{l \cdot \omega_x}{2 \cdot |V|} \\
 \bar{\omega}_y &= \frac{l \cdot \omega_y}{2 \cdot |V|} \\
 \bar{\omega}_z &= \frac{l \cdot \omega_z}{|V|} \\
 \dot{\alpha} &= \frac{b_A \cdot \dot{\alpha}}{|V|} \\
 \dot{\beta} &= \frac{l \cdot \dot{\beta}}{2 \cdot |V|}
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Как видно из (4.17)-(4.19), аэродинамические силы и моменты представлены в явной зависимости от угла атаки и/или скольжения. Таким образом, система уравнений (4.3), (4.5), (4.7), (4.8) с учетом (4.10), (4.11), (4.14) является полной нелинейной математической моделью движения ЛА с компоновкой, соответствующей рис. 4.7. Подробное представление функций (4.10), (4.11), (4.14) позволяет найти законы управления непосредственно в виде зависимостей от углов отклонения управляющих поверхностей δ_i . Выражения для коэффициентов (4.17), (4.18) справедливы в широком диапазоне углов атаки и скольжения на дозвуковых скоростях полета [30]. При

рассмотрении других компоновочных схем ЛА, которые в большинстве случаев являются частными или упрощенными вариантами компоновки ЛА, представленной на рис. 4.7, в основном изменится только вид соотношений (4.17)-(4.18).

Приведенная нелинейная модель движения ЛА обладает высокой универсальностью и при достаточно полном описании коэффициентов аэродинамических сил и моментов позволяет исследовать динамику движения ЛА в предельных режимах (сваливание на больших углах атаки, выполнение сложных маневров, автоматические взлет и посадка, облет препятствия), а также в других режимах полета, при которых в значительной степени проявляются связи между параметрами продольного и боковых движений [28, 29, 38].

В отдельных режимах полета связи между отдельными составляющими продольного и бокового движений в полной модели 12-го порядка несущественны. К подобным режимам можно отнести взлет и посадку ЛА. Эти режимы содержат несколько иной ряд задач и целей управления, чем в общем случае полета. Поэтому можно получить более простую отдельную систему уравнений продольного движения [28, 30].

На рис. 4.8 представлены динамические и кинематические переменные уравнений продольного движения центра масс ЛА: x, y – оси системы координат, связанной с центром масс; P – сила тяги двигателя; L – подъемная сила; D – сила лобового сопротивления; m – масса аппарата; g – ускорение свободного падения; ϑ – угол тангажа; Θ – угол наклона траектории; $\alpha = (\vartheta - \Theta)$ – угол атаки; V – вектор линейной скорости.

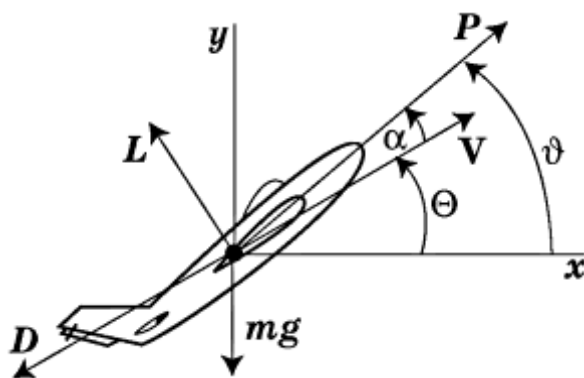


Рис. 4.8. Координаты продольного движения

Движение ЛА в продольной вертикальной плоскости может быть описано следующей нелинейной системой уравнений [28, 30]:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= \frac{P}{m} \cos(\vartheta - \Theta) - \frac{D}{m} - g \sin \Theta \\
 \dot{\Theta}(t) &= \frac{P}{m \cdot V} \sin(\vartheta - \Theta) + \frac{L}{m \cdot V} - \frac{g}{V} \cos \Theta \\
 \dot{\omega}_z(t) &= \frac{1}{I_z} M_z \\
 \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z \\
 \dot{H}(t) &= V \cdot \sin \Theta
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

где:

H – высота полета;

I_z – момент инерции;

M_z – суммарный момент сил;

ω_z - угловая скорость;

P, D, L, V, g – модули соответствующих векторов.

Переменные P, D, L, M_z сложным образом зависят от скорости полета, углов отклонения управляющих поверхностей, геометрических размеров и конфигурации ЛА и других параметров. Модель (4.21) адекватна в отсутствии ветра и при малом диапазоне изменения координат состояния, при котором влиянием перекрестных связей между компонентами и переменными продольного и бокового движений можно пренебречь [30].

4.4. Математическая модель движения космического летательного аппарата

Рассмотрим построение математической модели движения для решения задачи синтеза системы трехканального управления космическим летательным аппаратом (КЛА). Угловое движение КЛА относительно центра масс описывается динамическими уравнениями Эйлера

$$\begin{aligned} A \cdot \dot{\omega}_1(t) &= (B - C)\omega_2\omega_3 + M_1 \\ B \cdot \dot{\omega}_2(t) &= (C - A)\omega_1\omega_3 + M_2 \\ C \cdot \dot{\omega}_3(t) &= (A - B)\omega_1\omega_2 + M_3 \end{aligned} \quad (4.22)$$

где:

M_1, M_2, M_3 – управляющие моменты, развиваемые соответствующими двигателями;

A, B, C – главные центральные моменты инерции КЛА;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – проекция вектора угловой скорости КЛА на его главные центральные оси инерции (i_1, i_2, i_3).

Дополним (4.22) кинематическими уравнениями Пуассона, определяющими ориентацию КЛА:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_1(t) &= \omega_3\lambda_2 - \omega_2\lambda_3 \\ \dot{\lambda}_2(t) &= \omega_1\lambda_3 - \omega_3\lambda_1 \\ \dot{\lambda}_3(t) &= \omega_2\lambda_1 - \omega_1\lambda_2 \end{aligned} \quad (4.23)$$

где:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – переменные, характеризующие отклонение КЛА от неподвижной вертикальной оси. Предположим, что на координаты ориентации наложена связь в виде:

$$\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1 \quad (4.24)$$

Тогда уравнения Эйлера (4.22) и Пуассона (4.23) с учетом инварианта (4.24) в совокупности описывают систему одноосной

стабилизации равновесия КЛА посредством двигателей. При $M_1 = M_2 = M_3 = 0$ эти уравнения имеют частное решение $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 0$, $\lambda_1 = \lambda_3 = 0$, $\lambda_2 = 1$, соответствующее положению равновесия КЛА, при котором направление одной из главных центральных осей инерции совпадает с направлением неподвижной вертикальной оси. Сформулируем задачу стабилизации положения равновесия КЛА с помощью управлений. Для этого, вводя новые переменные:

$$\begin{aligned}x_1 &= \omega_2, \\x_2 &= \lambda_1, \\x_3 &= \lambda_3, \\x_4 &= \omega_1, \\x_5 &= \omega_3, \\x_6 &= \lambda_2 - 1, \\u_1 &= M_1 / B, \\u_4 &= M_2 / A, \\u_5 &= M_3 / C,\end{aligned}$$

и исключая x_6 посредством $\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1$, составим на основе уравнений Эйлера и Пуассона следующие дифференциальные уравнения возмущенного движения [28]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= \left(\frac{C-A}{B}\right)x_4x_5 + u_1 \\ \dot{x}_2(t) &= -x_1x_3 + x_5\sqrt{1-x_2^2-x_3^2} \\ \dot{x}_3(t) &= x_1x_2 - x_4\sqrt{1-x_2^2-x_3^2} \\ \dot{x}_4(t) &= \left(\frac{B-C}{A}\right)x_1x_5 + u_4 \\ \dot{x}_5(t) &= \left(\frac{A-B}{C}\right)x_1x_4 + u_5\end{aligned}\tag{4.25}$$

Система уравнений (4.25) описывает угловое движение КЛА относительно центра масс в окрестности желаемого положения, например $x_k = 0$, $k = 1, \dots, 5$, в котором аппарат имеет заданную одноосную ориентацию в инерциальном пространстве.

4.5. Математическая модель пространственного движения автономного подводного аппарата

Уравнения движения АПА в связанной системе координат могут быть получены из законов механики как уравнения пространственного движения твердого тела в жидкой среде и согласно [42] имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 m_x \dot{V}_x(t) + m_z \omega_y V_z - m_y \omega_z V_y &= R_x \\
 m_y \dot{V}_y(t) + m_x \omega_z V_x - m_z \omega_x V_z - \lambda_{35} \omega_x \omega_y &= R_y \\
 m_z \dot{V}_z(t) + m_y \omega_x V_y - m_x \omega_y V_x + \lambda_{26} \omega_x \omega_z &= R_z \\
 J_x \dot{\omega}_x(t) &= M_x \\
 J_y \dot{\omega}_y(t) + \omega_x \omega_z (J_x - J_z) + V_x V_z (m_x - m_z) &= M_y \\
 J_z \dot{\omega}_z(t) + \omega_x \omega_y (J_x - J_y) + V_x V_y (m_x - m_y) &= M_z
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

где:

V_x, V_y, V_z и $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции на оси связанной системы координат вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА и вектора угловой скорости вращения АПА относительно центра масс соответственно;

m_x, m_y, m_z и J_x, J_y, J_z – элементы матрицы инерции твердого тела с учетом присоединенных масс жидкости;

λ_{35} и λ_{26} – некоторые коэффициенты;

$R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$ – проекции векторов внешних сил и моментов.

Уравнения движения АПА (4.26) справедливы, если: начало системы координат совпадает с центром масс АПА, координатные оси являются центральными осями инерции, форма АПА соответствует эллипсоиду вращения.

Внешние силы и моменты, действующие на АПА, включают в себя:

- гидродинамические силы и моменты на корпусе, возникающие при движении АПА в жидкости; силы веса и водоизмещения;

- управляющие силы и моменты, создаваемые движителями и другими средствами управления;

- возмущающие силы и моменты, обусловленные действием подводных течений.

Правые части уравнений (4.26) конкретизируются исходя из априорных знаний о конструктивных особенностях и форме АПА, возможных условий движения, а также с учетом необходимого уровня детализации математической модели и принятых допущений.

В дальнейшем будем считать, что АПА оснащен стандартным набором средств управления – рис. 4.9:

- тяговый движитель, образованный двумя винтами с противоположным вращением и создающий силу тяги T строго по продольной оси Ox ;

- вертикальный руль с углом поворота $\delta_{\text{верт}}$, который обеспечивает ориентацию по курсу;

- разрезной горизонтальный руль, состоящий из двух элеронов. При разном развороте левого и правого элеронов на углы $\delta_{\text{лев}}$ и $\delta_{\text{прав}}$ дифференцирующий управляющий момент равен их среднему значению

$$\delta_{\Gamma} = 0,5 \cdot (\delta_{\text{лев}} + \delta_{\text{прав}}),$$

а кренящий – разности

$$\Delta\delta_{\Gamma} = \delta_{\text{лев}} - \delta_{\text{прав}}$$

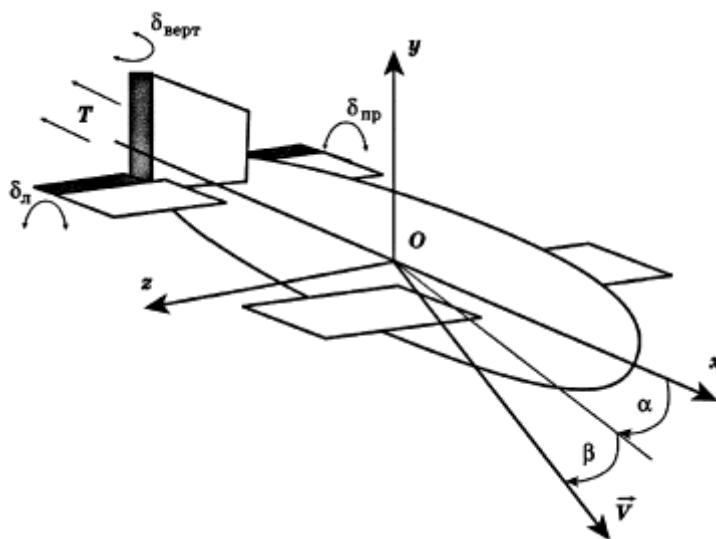


Рис. 4.9. Схема АПА

Движением АПА можно также управлять путем изменения плавучести (набор и сброс балластов) и посредством вертикальных винтов. Наличие этих каналов управления с одной стороны, несомненно, повышает маневренность аппарата, а с другой – упрощает задачу синтеза управляющих алгоритмов. В дальнейшем будем считать, что аппарат имеет нулевую плавучесть, а точка приложения силы водоизмещения совпадает с его центром масс.

Гидродинамические силы на корпусе АПА и рулях в общем случае являются нелинейными функциями углов атаки и дрейфа, углов поворота рулей, проекций вектора угловой скорости. Определение вида этих функций представляет отдельную задачу анализа движения тела в жидкости, которая решается путем использования упрощенных зависимостей или путем модельных испытаний. Согласно общераспространенной практике представим гидродинамические силы и моменты в виде линейной комбинации кинематических параметров, углов ориентации и управления.

Тогда с учетом принятых выше допущений внешние силы и моменты можно записать следующим образом [42]:

$$\begin{aligned}
 R_x &= T - qv^{2/3} (c_x^\alpha \alpha + c_x^\beta \beta + c_x^{\delta_\Gamma} \delta_\Gamma + c_x^{\delta_{BEPT}} \delta_{BEPT}) \\
 R_y &= qv^{2/3} (c_y^\alpha \alpha + c_y^{\omega_z} \omega_z + c_y^{\delta_\Gamma} \delta_\Gamma) \\
 R_z &= qv^{2/3} (c_z^\beta \beta + c_z^{\omega_y} \omega_y + c_z^{\delta_{BEPT}} \delta_{BEPT}) \\
 M_x &= qv (m_x^\beta \beta + m_x^{\omega_x} \omega_x + m_x^{\Delta\delta_\Gamma} \Delta\delta_\Gamma) \\
 M_y &= qv (m_y^\beta \beta + m_y^{\omega_y} \omega_y + m_y^{\delta_{BEPT}} \Delta\delta_{BEPT}) \\
 M_z &= qv (m_z^\alpha \alpha + m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_\Gamma} \delta_\Gamma)
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

где:

c_i^j и m_i^j – некоторые гидродинамические коэффициенты;

α и β – углы атаки и дрейфа;

q – скоростной напор, зависящий от плотности воды и скорости движения:

$q = 0,5 \cdot \rho V^2$, v – объемное водоизмещение аппарата.

Чтобы получить полную модель пространственного движения АПА, необходимо к уравнениям равновесия сил и моментов (4.26)

с учетом (4.27) добавить уравнения связи для поступательного и вращательного движений [42]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_g(t) &= V_x - V_y \psi + V_z \varphi \\
 \dot{y}_g(t) &= V_x \psi + V_y - V_z \theta \\
 \dot{z}_g(t) &= -V_x \varphi - V_y \theta + V_z \\
 \dot{\theta}(t) &= \frac{1}{1 + \psi \theta} (\omega_x + \omega_x \psi \theta - \omega_y \psi + \omega_z \psi^2) \\
 \dot{\varphi}(t) &= \frac{1}{1 + \psi \theta} (\omega_y - \omega_z \psi) \\
 \dot{\psi}(t) &= \frac{1}{1 + \psi \theta} (\omega_z + \omega_y \theta)
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

где:

x_g, y_g, z_g – координаты центра масс АПА в базовой системе координат;

θ – угол крена;

φ – угол рыскания;

ψ – угол дифферента.

Заметим, что кинематические уравнения (4.28) справедливы при небольших значениях углов Эйлера.

Таким образом, отличие модели (4.26), (4.28) от системы (4.3), (4.5), (4.7), (4.8) состоит в допущении малости изменения углов крена и дифферента и наличием дополнительных членов в виде «присоединенных масс», характеризующих сопротивление среды.

Список литературы

1. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы / Под общей редакцией А.А. Колесникова. – М.: Едиториал УРСС, 2005.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами, - Л.: Энергоиздат, 1982.
3. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. - М.: Энергоатомиздат, 2001.
5. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. - М.: Издательский центр "Академия", 2004.
6. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
7. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. - Ч. II.
8. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе. - М.: Высшая школа, 1989.
9. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. - М.: Энергия, 1979.
10. Булгаков А.А. Частотное управление двигателями. - М.: Энергоатомиздат, 1982.
11. Krishnan R. Electric motor drives: modelling, analysis and control. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
12. Шрейнер Р.Т., Дмитриенко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. - Кишинев: ШТИИНЦА, 1982.
13. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. - М.: Энергоатомиздат, 1987.

14. Водовозов В.М. Теория и системы электропривода: Учебное пособие. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ, 2004.
15. Поляков В.Н., Таран А.А., Шрейнер Р. Т. Алгоритм численного решения задачи экстремального управления асинхронным электроприводом при ограничениях по току и напряжению / Электротехника. - 2001. - №11. - С. 45-48.
16. Ловчаков В.П., Сухинин Б.В., Сурков В.В. Нелинейные системы управления электроприводами и их аналитическое конструирование. - Тула: Тул. гос. ун-т, 1999.
17. Колесников А.А., Веселов Т.Е., Попов А.Н., Колесников А.А., Кузьменко А.А. Синергетическое управление нелинейными электромеханическими системами. - М.: Испосервис, 2000.
18. Веселов Т.Е., Колесников А.А. Синергетический синтез векторных регуляторов нелинейных асинхронных электроприводов / Синтез алгоритмов сложных систем: Межведомственный тематический научный сборник. - Москва - Таганрог, 1997. - Вып. 9. - С. 108-122.
19. Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. - М.: Мир, 1989.
20. Месарович М., Мако Д., Такахара И, Теория иерархических многоуровневых систем. - М.: Мир, 1973.
21. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А.А. Колесникова. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. -Ч. III.
22. Бурлаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков С.И. Системы управления движением колесных роботов. - СПб.: Наука, 2001.
23. Тимофеев А.В. Управление роботами. - Л.: ЛГУ, 1985.
24. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы. - Л.: Машиностроение, 1988.
25. Ермилов Ю.А., Шпаков А.И. Синтез законов стабилизации прямолинейного движения автоматической тележки / Робототехнические системы и автоматическое управление. - М.: МИРЭА, 1985. - С. 447.
26. Горбачев И.В., Филимонов А.Е., Шухов А.Г. Алгоритмы управления транспортными роботами в гибких

- производственных системах / Изв. АН Техн. кибернетика. - 1988. - №4. - С. 59-70.
27. Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. - Ч. I.
 28. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973.
 29. Красовский А.А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. - М.: Машиностроение, 1969.
 30. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
 31. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. - СПб: Наука, 2000.
 32. Мирошник И.В., Никифоров В.О. Адаптивное управление пространственным движением нелинейных объектов / Автоматика и телемеханика. - 1991. - №7. - С. 78-87.
 33. Механика полета. Общие сведения. Уравнения движения / Под ред. С.А. Горбатенко, Э.М. Макашов, Ю.Ф. Полушкин и Л.В. Шефтель. - М.: Машиностроение, 1969.
 34. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
 35. Белгородский С.Л. Автоматизация управления посадкой самолета. - М.: Изд-во "Транспорт", 1972.
 36. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чикулаев М.С. Системы автоматического управления самолетами. - М.: Машиностроение, 1987.
 37. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. - М.: Машиностроение, 1973.
 38. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолета: Пространственное движение. - М.: Машиностроение, 1983.
 39. Колесников А.А., Медведев М.Ю. Современные методы синтеза систем управления. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.

40. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Аэродинамика самолета: Динамика продольного и бокового движения. - М.: Машиностроение, 1979.
41. Остраславский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1969.
42. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами: учебник. - Л.: Судостроение, 1988.