

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

В.А. Трубецкой, В.А. Медведев, С.С. Ревнёв

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РОБОТОВ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Воронеж 2017

УДК 621.38(075.8)

Трубецкой В.А. Проектирование исполнительных систем роботов: учебное пособие / В.А. Трубецкой, В.А. Медведев, С.С. Ревнёв. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 97 с.

В учебном пособии рассматриваются вопросы проектирования электромеханических исполнительных систем промышленных роботов. Даны теоретические пояснения и методические рекомендации по построению динамической модели манипуляционного механизма, энергетическим расчетам исполнительных систем, выбору силовых устройств и элементов, цепей обратных связей, а также настройке контуров тока и скорости. Приводятся справочные данные электродвигателей.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 13.03.02 “Электроэнергетика и электротехника” (профиль “Электропривод и автоматика робототехнических систем”) по дисциплине “Исполнительные системы роботов”.

Учебное пособие предназначено для студентов 3-4 курса, а также представляет интерес для преподавателей, аспирантов и специалистов, связанных с разработкой и исследованием систем управления электроприводами.

Табл. 22. Ил. 25. Библиогр.: 35 назв.

Рецензенты: кафедра электроэнергетики Международного института компьютерных технологий (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А.Н. Анненков);

канд. техн. наук, доц. А.К. Муконин

© Трубецкой В.А., В.А. Медведев,
С.С. Ревнёв, 2017

© Оформление. ФГБОУ ВО
“Воронежский государственный
технический университет”, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Исходные данные и варианты заданий	6
2. Требования к объему, оформлению и содержанию	13
3. Динамическая модель звена манипуляционной системы	16
3.1. Особенности динамических моделей манипуляционных систем	16
3.2. Математическое описание динамики манипуляционно-го механизма	17
4. Энергетический расчет исполнительной системы	22
4.1. Особенности энергетического расчета	22
4.2. Определение мощности двигателя	23
4.3. Выбор двигателя	30
4.4. Определение передаточного числа редуктора	35
4.5. Методика выбора двигателя и передаточного числа редуктора	39
4.6. Проверка по параметрам движения и на нагрев	42
5. Проектирование и расчет параметров неизменяемой части исполнительной системы	45
5.1. Управляемый источник питания и силовая цепь	45
5.2. Цепь обратной связи по току	48
5.3. Цепь обратной связи по скорости	50
6. Расчет настроек	52
6.1. Контур тока	52
6.2. Контур скорости	54
6.3. Выбор структуры, расчет параметров и аппаратная реализация регуляторов ИС	56
6.4. Ограничение тока и скорости	60

Заключение	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример расчета исполнительной системы степени подвижности манипулятора станочного робота НЦТМ-01	64
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Технические данные электродвигателей постоянного тока, применяемых в робототехнике	90
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Форма титульного листа	94
Библиографический список	95

ВВЕДЕНИЕ

Цель курсового проекта – углубление и практическое применение знаний, полученных при изучении курса “Исполнительные системы роботов”, отработка навыков анализа и синтеза динамических систем.

Объектом проектирования является ИС одной из степеней подвижности. Ее массогабаритные и нагрузочные параметры учитывают как соответствующие параметры данной степени подвижности, так и параметры верхних относительно нее степеней, параметры движения нагрузки. Показатели динамические, точностные и временные, а также регулировочные свойства проектируемой системы обеспечиваются за счет энергетических возможностей двигателя и его согласования с нагрузкой, структурой и параметрами двухконтурной системы подчиненного регулирования тока и скорости с ограничением регулируемых координат и настройкой обоих контуров на какой-либо оптимум.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Исходные данные на проектирование - индивидуальные для каждого студента. Общее число вариантов - 108. Каждый из вариантов имеет свой шифр вида 1ВВВ3-ПБ2. Шифры выдаются руководителем проекта.

Первые пять символов в шифре определяют параметры, тип и номер проектируемой степени подвижности манипулятора, а именно:

- буквы ВВВ означают состав кинематической структуры манипулятора (рис. 1.1);
- первая цифра определяет номер варианта параметров звеньев манипуляционных систем (табл. 1.1);
- последняя цифра соответствует номеру степени подвижности проектируемой ИС.

Так в примере символы 1ВВВ3 означают, что проектируется ИС третьей степени подвижности манипулятора с тремя вращательными кинематическими парами, параметры манипуляционной системы соответствуют варианту 1 из таблицы 1.1.

Оставшиеся символы шифра обозначают номер варианта и вид управления, а именно:

- К – контурное (табл. 1.2), ПБ – позиционное с большим типовым перемещением (табл. 1.3), ПМ – позиционное с малым типовым перемещением (табл. 1.4);
- последняя цифра указывает на номер варианта соответствующей таблицы.

В приведенном примере символы ПБ2 соответствуют позиционному управлению звеньев манипулятора с большим типовым перемещением, параметры варианта 2 из таблицы 1.3.

В исходных данных задаются:

- масса переносимого груза m_r , кг;
- расстояние груза от оси координаты r_r , м;
- момент инерции манипулятора J_m , кг м²;
- номинальная скорость нагрузки ω_r , 1/с;

- максимально допустимая скорость $\omega_{г\text{ доп}}, 1/\text{с};$
- номинальное ускорение нагрузки $\varepsilon_{г}, 1/\text{с}^2;$
- максимально допустимое ускорение $\varepsilon_{г\text{ доп}}, 1/\text{с}^2;$
- время типового цикла $T_{ц}, \text{с}.$

Для позиционного управления:

- типовое перемещение φ рад;
- время позиционирования $t_{\varphi}, \text{с}.$

Для контурного управления - коэффициент загрузки в цикле:

- для максимального момента - $k_{\text{max}};$
- для статического момента - $k_{с}.$

Для всех вариантов предполагается, что управление ИС - скоростное, тип привода - электромеханический постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем. Последний должен обеспечивать работу ИС во всех четырех квадрантах механической характеристики. Диапазон напряжений управления от -10 В до +10 В.

На рис. 1.1 приведены варианты компоновок манипуляторов.

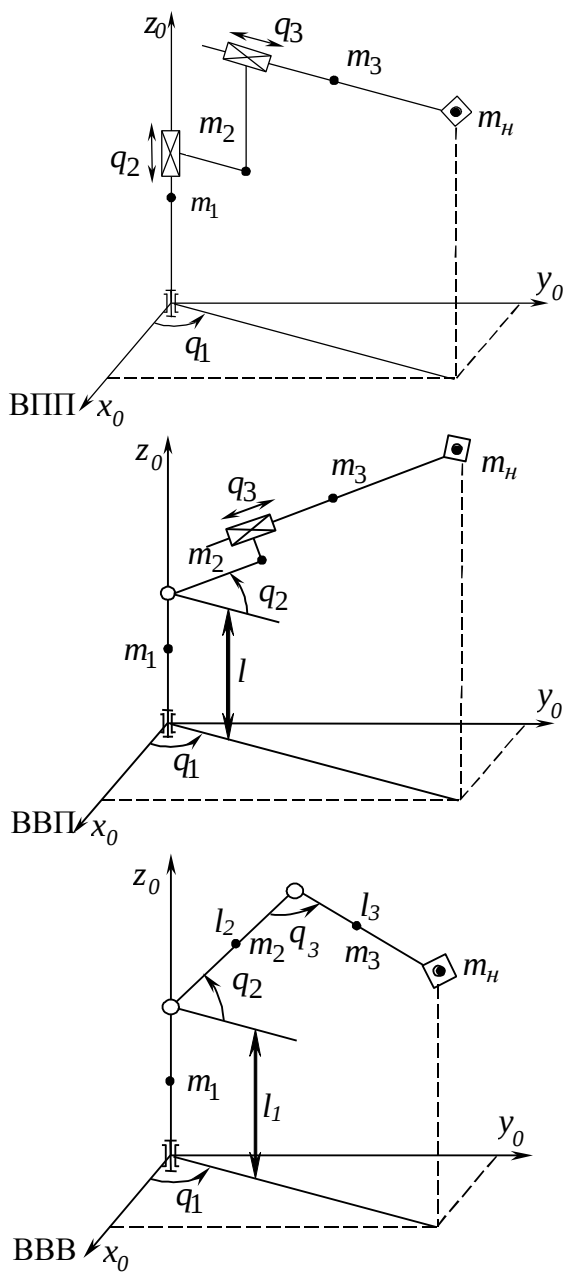


Рис. 1.1. Варианты компоновок манипуляторов

Таблица 1.1. Параметры манипуляторов

№	Параметр	В	П	П	В	В	П	В	В	В
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Масса груза m_H , кг	3			5			6		
	Масса звена m_i , кг	4	3	1,5	6	5	3	6	5	5
	Длина звена l_i , м	0,5	0,2	0,6	0,5	0,3	0,8	0,5	0,4	0,4
	Радиус колонны R_K , м	0,1			0,15			0,15		
	Доп. скор. звена $\dot{q}_i \max$	5 рад/с	0,9 м/с	1,2 м/с	4 рад/с	3 рад/с	1,5 м/с	3 рад/с	3 рад/с	4 рад/с
	Доп. ускор. звена $\ddot{q}_i \max$	20 рад/с ²	6 м/с ²	6 м/с ²	10 рад/с ²	10 рад/с ²	7 м/с ²	10 рад/с ²	8 рад/с ²	8 рад/с ²
2	Масса груза m_H , кг	8			10			15		
	Масса звена m_i , кг	9	5	4	12	8	6	12	8	8
	Длина звена l_i , м	0,4	0,2	0,5	0,8	0,3	0,8	0,8	0,6	0,6
	Радиус колонны R_K , м	0,2			0,2			0,2		
	Доп. скор. звена $\dot{q}_i \max$	4 рад/с	1 м/с	1,5 м/с	3,5 рад/с	3,5 рад/с	1,5 м/с	2,5 рад/с	3 рад/с	3 рад/с
	Доп. ускор. звена $\ddot{q}_i \max$	16 рад/с ²	6 м/с ²	5,5 м/с ²	12 рад/с ²	12 рад/с ²	7 м/с ²	6 рад/с ²	8 рад/с ²	6 рад/с ²

Таблица 1.2. Параметры движения ИС с контурным управлением

№	Параметры	В	П	П	В	В	П	В	В	В
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Ном. скор. звена $\dot{q}_i \text{ ном}$	0,5 рад/с	0,1 м/с	0,1 м/с	0,4 рад/с	0,4 рад/с	0,1 м/с	0,5 рад/с	0,5 рад/с	0,3 рад/с
	Ном. ускор. звена $\ddot{q}_i \text{ ном}$	15 рад/с ²	5 м/с ²	5 м/с ²	10 рад/с ²	10 рад/с ²	4 м/с ²	4 рад/с ²	4 рад/с ²	5 рад/с ²
	Коэф. загруженно- стив цикле $K_{\max} / K_c$	0,2	0,15	0,15	0,1	0,3	0,2	0,15	0,08	0,08
		0,7	0,6	0,7	0,7	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8
	Время цикла T_u , с	25			16			12		
2	Ном. скор. звена $\dot{q}_i \text{ ном}$	0,5 рад/с	0,1 м/с	0,08 м/с	0,4 рад/с	0,4 рад/с	0,1 м/с	0,4 рад/с	0,4 рад/с	0,3 рад/с
	Ном. ускор. звена $\ddot{q}_i \text{ ном}$	8 рад/с ²	4 м/с ²	5 м/с ²	8 рад/с ²	5 рад/с ²	3 м/с ²	5 рад/с ²	4 рад/с ²	5 рад/с ²
	Коэф. загруженно- сти в цикле, $K_{\max} / K_c$	0,15	0,12	0,1	0,2	0,15	0,18	0,2	0,13	0,13
		0,6	0,4	0,8	0,6	0,5	0,7	0,6	0,7	0,7
	Время цикла T_u , с	30			50			60		

Таблица 1.3. Параметры движения позиционных ИС с большим типовым перемещением

№	Параметры	В	П	П	В	В	П	В	В	В
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Типовое перемещение Δq_i	2,5 рад	0,4 м	0,5 м	3 рад	1,5 рад	0,6 м	1,4 рад	1,2 рад	2,2 рад
	Время позиционирования t_q , с	1,2	0,7	0,7	1,5	1	1	1,5	1,2	1,5
	Время цикла T_u , с	5			6			6		
2	Типовое перемещение Δq_i	1,8 рад	0,6 м	0,5 м	2 рад	1,2 рад	0,7 м	2,5 рад	1,6 рад	1,8 рад
	Время позиционирования t_q , с	1,5	2	1,7	2	1,5	2	3	2	2,5
	Время цикла T_u , с	10			12			15		

Таблица 1.4. Параметры движения позиционных ИС с малым типовым перемещением

№	Параметры	В	П	П	В	В	П	В	В	В
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Типовое перемещение Δq_i	0,2 рад	0,06 м	0,1 м	0,4 рад	0,25 рад	0,1 м	0,42 рад	0,34 рад	0,28 рад
	Время позиционирования t_q , с	0,25	0,2	0,3	0,4	0,35	0,3	0,65	0,65	0,55
	Время цикла $T_{\text{ц}}$, с	1			0,8			1,5		
2	Типовое перемещение Δq_i	0,46 рад	0,06 м	0,08 м	0,5 рад	0,36 рад	0,1 м	0,45 рад	0,44 рад	0,38 рад
	Время позиционирования t_q , с	0,35	0,25	0,25	0,6	0,45	0,25	0,6	0,5	0,55
	Время цикла $T_{\text{ц}}$, с	1			1,2			1,5		

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕМУ, ОФОРМЛЕНИЮ И СОДЕРЖАНИЮ

Расчетно-пояснительная записка (РПЗ) объемом 35 - 40 страниц содержит:

- **Титульный лист** в соответствии с приложением 2;
- лист **Задание на курсовой проект** по форме приложения 3;
- лист **Замечания руководителя**;
- **Содержание** с указанием начальных страниц разделов и пунктов;
- **Введение**;
- **Разделы** расчетно-пояснительной части;
- **Заключение**;
- **Список литературы**.

Графическая часть проекта выполняется на листе чертежной бумаги формата А1 с основной надписью по ГОСТ 2.104. Графическая часть содержит иллюстративные материалы, включающие кинематическую схему манипулятора, важнейшие расчетные соотношения и математические описания устройств проектируемой системы в виде передаточных функций и структурных схем, условия и параметры настройки.

В пояснительной записке, **во введении** выполняется анализ задания на проектирование. Систематизируются требования к ИС в соответствии с исходными данными. Помимо этого выявляются особенности проектируемой системы, не оговоренные в задании прямо. В результате анализа устанавливается взаимосвязь исходных данных с состоянием манипулятора, условиями применения робота, причинами возможных превышений параметров движения, и, как следствие, требуемых ограничений.

Первый раздел посвящается разработке динамической модели проектируемого звена манипуляционной системы. Такая модель позволяет установить взаимосвязь между параметрами движения манипуляционной системы и численными зна-

чениями инерционностей, реактивных и активных нагрузок (моментов). В результате можно определить максимальные значения обобщенных сил при одновременной отработке программных движений звеньями манипулятора.

Второй раздел посвящается энергетическому расчету исполнительской системы. На основе полученных в первом разделе значений инерционностей, а также статических и динамических нагрузок проводится выбор двигателя и его согласование с объектом управления по параметрам движения и энергетическим показателям.

На этом этапе выполняется ориентировочный расчет мощности двигателя. Результаты последнего носят справочный характер и непосредственно для выбора двигателя высокодинамических систем воспроизведения движений не используются. Предварительный же выбор двигателя осуществляется по требуемому значению приемистости.

Затем определяется ориентировочное значение передаточного числа редуктора, производится окончательный выбор двигателя и передаточного числа редуктора. Определяются и рассчитываются ограничения на параметры движения исполнительской системы и режимы двигателя.

Следует иметь в виду, что в ряде случаев при окончательном выборе двигателя может потребоваться повторный расчет передаточного числа редуктора или его корректировка. Это приводит к необходимости пересчитать ограничения на параметры движения и режимы двигателя.

В **третьем разделе** выполняется проектирование и расчет параметров неизменяемой части исполнительской системы. Выбирается управляемый источник питания и определяются параметры математического описания силовой цепи в целом. Производится выбор и обоснование структуры ИС, проектируются цепи используемых обратных связей.

При математическом описании элементов структурной схемы очень важно учесть не только свойства выбираемых стандартных устройств (манипуляционного механизма с по-

лезным грузом, двигателя, широтно-импульсного преобразователя, тахогенератора и датчика тока), но и принятые автором технические решения для сглаживания помех, приведения сигналов обратных связей к входам задающих воздействий, а также согласованию входных и выходных сопротивлений устройств.

В *четвертом разделе* обосновывается выбор настроек контуров регулирования на какой-либо оптимум, приводятся принятые для расчетов настроек инженерные упрощения и допущения, определяются структура и параметры регуляторов. Определяются передаточные функции настроенных контуров, их статические и динамические параметры. Проектируются регуляторы, обеспечивающие требуемую настройку, цепи ограничения тока и скорости.

Проверка на соответствие полученных динамических и точностных свойств заданным обеспечивается путем проведения эксперимента с математической моделью ИС спроектированной степени подвижности.

В *заключении* выполняется анализ результатов, полученных при проектировании, в том числе путем сопоставления их с результатами проектирования ИС всего манипуляционного механизма.

Основные требования к оформлению проекта с примерами выполнения текста, содержания, рисунков, списка литературы и прочим изложены в [29].

3. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗВЕНА МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

3.1. Особенности динамических моделей манипуляционных систем

Манипулятор с точки зрения механики и теории механизмов — это сложный пространственный управляемый механизм с несколькими степенями свободы, содержащий как жесткие, так и упругие звенья, передачи и приводы. Манипуляционный робот представляет единую динамическую систему. В виду ее сложности при исследовании приходится выделять и рассматривать отдельно механизмы, приводы и систему управления.

Задачи исследования динамических свойств, динамических характеристик робота является одной из важных и сложных задач на этапе проектирования ИС.

Для описания движения тел в среде с большой плотностью традиционно принято использовать уравнения динамики объекта управления, получаемые из закона количества движения и закона момента количества движения. Для консервативной системы, когда выполняется закон сохранения энергии (т.е. движение робота происходит в безвоздушном пространстве либо в среде с малой плотностью при скоростях допускающих пренебрежение потерями энергии на преодоление сопротивления среды), могут быть использованы уравнения динамики на основе известных законов ньютоновой или лагранжевой механики [35].

Значительное распространение получил метод формирования динамической модели манипулятора, построенный на основе уравнений Ньютона – Эйлера. В этом методе для каждого звена используются два уравнения движения твердого тела с учетом реакций связей: уравнение движения центра масс как материальной точки и динамическое уравнение Эйлера вращения вокруг центра масс. Вывод уравнений движения

манипулятора методом Ньютона – Эйлера прост по содержанию, но весьма трудоемок. При этом трудоемкость решения прямой задачи динамики (определение сил по заданному движению) для манипулятора пропорциональна числу звеньев. С помощью уравнений последовательно от основания к схвату вычисляются кинематические характеристики движения звеньев (линейные и угловые скорости и ускорения, линейные ускорения центров масс звеньев). Метод Ньютона – Эйлера обладает хорошей вычислительной эффективностью и применяется при моделировании движений манипулятора на ЭВМ.

Построение динамической модели движения манипулятора методом Лагранжа – Эйлера отличается простотой, формализмом и единством подхода [25, 30, 33]. Уравнения Лагранжа – Эйлера обеспечивают строгое описание динамики состояния манипулятора в пространстве, обладают хорошей «аналитичностью» и допускают реализацию модели движения манипулятора на ЭВМ (хотя данный метод по сравнению с методом Ньютона – Эйлера имеет более низкую вычислительную эффективность [34]).

Еще один подход к формированию динамической модели основан на принципе Гаусса и уравнениях Аппеля. В них для расчета обобщенных ускорений используется прямая минимизация функции Гиббса на основе принципа наименьшего принуждения Гаусса. К недостаткам модели, построенной на основе уравнений Аппеля, следует отнести необходимость вычисления функции энергии ускорений и ее дифференцирования [9].

3.2. Математическое описание динамики манипуляционного механизма

Составление математической модели заключается в составлении системы уравнений, с помощью которых осуществляется математическое описание исследуемого объекта. На этом этапе динамического расчета приходится прибегать к уп-

рощениям, принимать некоторые гипотезы и допущения, компенсирующие недостатки знания или упрощающие саму процедуру математического описания динамической модели и ее дальнейший анализ [15, 19, 11, 23]. Здесь также требуется инженерная интуиция, основанная на понимании связи и соответствия математического анализа физическому явлению. Составление математической модели требует знания законов механики и некоторых экспериментальных закономерностей, учитывающих взаимодействие сил и отношение скоростей в процессе передачи энергии от двигателя к звену манипуляционной системы.

В основу наиболее простой динамической модели манипулятора положены следующие допущения и ограничения:

- динамическая модель робота с “жесткими” звеньями (пренебрегаем деформацией звеньев и элементов кинематических пар);
- звенья манипуляторов (за исключением стойки) рассматривать как тонкие однородные стержни с заданной длиной и массой;
- кинематические пары будем рассматривать как идеальные (звенья сочленяются без зазоров);
- законы движения звеньев заданы, т.е. в каждый момент времени известны координаты, скорости и ускорения точек механизма, а также угловые скорости и ускорения звеньев;
- все активные силы (за исключением движущих) считать известными или заданными функциями параметров движения.

Результаты, полученные на основе работы этой модели, принято считать «идеальными». Анализ модели дает исходное оценочное представление о влиянии соотношения скоростей и масс передаточных и исполнительных механизмов, а также соотношения активных и пассивных сил на закон движения ИС проектируемой степени подвижности манипулятора.

Итак, относительное перемещение i -го звена относительно связанного с ним $(i-1)$ -го звена представляет собой регулируемую переменную q_i , которая должна изменяться с помо-

щью i -го привода по желаемому закону. Вектор $q = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T$ является вектором обобщенных координат манипуляционного механизма. Пренебрегаем силами трения в кинематических парах (их можно учесть в КПД кинематических цепей ИС). Тогда для системы тел, находящихся в потенциальном поле сил тяжести, уравнения Лагранжа II рода записываются в векторной форме:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \omega} \right)^T - \left(\frac{\partial K}{\partial q} \right)^T = M - \left(\frac{\partial \Pi}{\partial q} \right)^T, \quad (3.1)$$

где $\omega = \frac{dq}{dt}$ вектор обобщенных скоростей, K и Π - кинетическая и потенциальная энергия манипуляционного механизма, M - вектор обобщенных сил, который является суммой двух векторов M_{np} (вектор сил, передаваемых исполняемыми двигателями звеньям манипулятора через устройства передачи движения) и $M_{вн}$ (вектор внешних сил).

$$M = M_{np} + M_{вн}. \quad (3.2)$$

Для вращательных движений векторы M , M_{np} , $M_{вн}$ понимаются как соответствующие векторы моментов сил.

Кинетическая энергия манипулятора K связана с вектором обобщенных скоростей ω с помощью симметричной матрицы инерционных характеристик $A(q)$, компоненты которой зависят от значений обобщенных координат:

$$K = \frac{1}{2} \omega^T \cdot A(q) \cdot \omega \quad (3.3)$$

Вычислив полную производную по времени в выражении (3.1), получим следующее уравнение динамики:

$$A(q) \frac{d\omega}{dt} + \frac{dA(q)}{dt} \omega = \left(\frac{\partial K}{\partial q} \right)^T + M + M_c, \quad (3.4)$$

где $M_c = -\left(\frac{\partial \Pi}{\partial q}\right)^T$ - вектор статических сил.

Полученное выражение (3.4) можно преобразовать к виду:

$$A(q)\frac{d\omega}{dt} = R(q, \omega) + M + M_c, \quad (3.5)$$

где $R(q, \omega) = \left(\frac{\partial K}{\partial q}\right)^T - \frac{dA(q)}{dt}\omega$.

В (3.5) вектор $R(q, \omega)$ характеризует моменты сил, обусловленные положениями и скоростями движения звеньев манипулятора (т.е. центробежных и кориолисовых сил), а вектор M_c характеризует моменты, вызванные силами тяжести движущихся масс элементов манипулятора. Компоненты этих векторов зависят от элементов вектора положений звеньев, а вектор $R(q, \omega)$ кроме этого еще и от скоростей движения звеньев манипулятора. При этом i -ый компонент векторов может являться функцией многих составляющих векторов q и ω , а не только величин q_i и ω_i . Это свидетельствует о проявлении динамического взаимодействия звеньев. Изменение положения одного из звеньев неминуемо приводит к силовому воздействию на другие звенья, от чего характер движения последних искажается.

Для манипуляционного механизма с N степенями подвижности в соответствии с выражением (3.5) система дифференциальных уравнений Лагранжа II рода примет вид

$$\begin{cases} a_{11}\ddot{q}_1 + a_{12}\ddot{q}_2 + \dots + a_{1N}\ddot{q}_N = R_1 + M_1 + M_{c1} \\ a_{21}\ddot{q}_1 + a_{22}\ddot{q}_2 + \dots + a_{2N}\ddot{q}_N = R_2 + M_2 + M_{c2} \\ \dots \\ a_{N1}\ddot{q}_1 + a_{N2}\ddot{q}_2 + \dots + a_{NN}\ddot{q}_N = R_N + M_N + M_{cN} \end{cases}, \quad (3.6)$$

где $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{NN}$ – компоненты симметричной матрицы инерционных характеристик:

$$A(q) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

В соответствии с вариантом задания необходимо разработать в среде MATLAB динамическую модель манипуляционного механизма. Для определения максимального значения момента статических сил и диапазона значений, которые принимает момент инерции разрабатываемой степени подвижности, следует смоделировать решение обратной задачи динамики, т.е. обобщенные координаты и их производные являются входными сигналами модели [25].

На заключительном же этапе исследования и уточнения параметров разработанной ИС данная динамическая модель манипулятора позволит получить значения обобщенной силы, являющейся возмущающим воздействием цепи формирования скорости ИС.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

4.1. Особенности энергетического расчета

В системах воспроизведения движений существует режим, в котором двигатель нагружен на максимальную мощность. Ее величина ограничена двумя обстоятельствами. Во-первых, мгновенное значение мощности двигателя не должно превышать максимальную, допустимую с учетом перегрузочной способности. Во-вторых, эквивалентная нагрузка двигателя не должна превышать номинальную. Последнее связано с ограничением тепловых потерь в двигателе и температуры его нагрева.

Для систем воспроизведения движений, работающих в основном в установившихся режимах, выполнение первого из ограничений не нарушает второго. Иначе обстоит дело для робототехнических систем, характеризующихся интенсивными динамическими режимами. В них ограничение по эквивалентной мощности (по нагреву) является более жестким, приводит к необходимости увеличивать установочную мощность, или, другими словами, приходится брать двигатель с запасом по мгновенной мощности.

Перегрузочная способность двигателя определяется допустимой перегрузкой по моменту $M_{\partial \max} = \lambda_m \cdot M_{\partial \text{ном}}$ и скорости $\omega_{\partial \max} = \lambda_{\omega} \cdot \omega_{\partial \text{ном}}$. Для большинства двигателей $\lambda_{\omega} = 1$. Те двигатели, которые допускают превышение скорости над номинальной, имеют λ_{ω} не более 1,5. Перегрузочная способность определяется в основном λ_m . Для различных серий двигателей постоянного тока ее величина составляет от 2 до 11 и более.

На многих этапах энергетического расчета удобно рассматривать мгновенное значение не мощности, а момента, развиваемого двигателем. При этом, во-первых, проще контроли-

ровать важнейший параметр двигателя - его нагруженность по моменту. Во-вторых, ограничения по тепловому режиму удобно рассматривать как ограничения для эквивалентного по нагреву момента, поскольку мощность тепловых потерь в двигателе пропорциональна квадрату этого момента, то есть квадрату тока.

При пересчете мощности и момента нагрузки к валу двигателя необходимо учитывать потери на трение в кинематической цепи ИС. Количественно их удобно определять через КПД этой цепи. Основной вклад в потери вносит, как правило, редуктор. Обычно полный КПД, учитывающий все потери, включая редуктор, составляет $\eta = 0,7 \div 0,9$.

Более подробно особенности энергетического расчета рассмотрены в [12, 16, 20, 27], а также в последующих пунктах данного раздела.

4.2. Определение мощности двигателя

Максимальная мощность двигателя, необходимая для движения манипуляционного механизма с полным моментом инерции J , моментом статистических сил M_c , со скоростью ω_n и ускорением ε_n определяется как:

$$N_{\dot{a}_{\max}} = \left(\frac{M_c}{\eta} + \frac{J_i \varepsilon_i}{\eta} + J_{\ddot{a}}^* \varepsilon_i \right) \omega_i, \quad (4.1)$$

где $J_{\dot{o}}^* = (J_y + J_p) \cdot i^2$ – момент инерции якоря и редуктора, приведенные к валу исполнительной системы; $i = \omega_o / \omega_n$ – передаточное число редуктора.

Полный момент инерции J_i в выражении (4.1) является компонентом главной диагонали симметричной матрицы инерционных характеристик $A(q)$ с номером соответствующим номеру проектируемой степени подвижности манипулятора. Значения момента инерции $J_i = a_{mm}$ и момента статических сил M_c должны учитывать наличие груза в захватном

устройстве, поскольку двигатель, выбираемый на этом этапе проектирования, должен обеспечить требуемые параметры движения звена m (скорость и ускорение) в любой конфигурации манипулятора, как с грузом, так и без него.

Если записать максимальную мощность двигателя через скорость не на валу ИС, а на валу двигателя, то

$$N_{\dot{a}_{\max}} = \left[\frac{M_c}{\eta \cdot i} + \left(\frac{J_{\dot{I}}}{\eta \cdot i} + J_{\ddot{a}} \cdot i \right) \cdot \varepsilon_{\dot{I}} \right] \cdot \omega_{\ddot{a}}. \quad (4.2)$$

Множитель при $\omega_{\ddot{a}}$ в этом выражении представляет собой максимальное значение момента, требуемое от двигателя. Таким образом

$$\dot{I}_{\ddot{a}_{\max}} = \frac{M_c}{\eta \cdot i} + \left(\frac{J_{\dot{I}}}{\eta \cdot i} + J_{\ddot{a}} \cdot i \right) \cdot \varepsilon_{\dot{I}}. \quad (4.3)$$

Из выражения (4.3) следует, что ускорение вала ИС (угловое ускорение нагрузки), как функция момента на валу двигателя можно определить

$$\varepsilon_{\dot{I}} = \frac{\dot{I}_{\ddot{a}_{\max}} \cdot \eta \cdot i - M_c}{J_{\dot{I}} + J_{\ddot{a}} \cdot i^2 \cdot \eta}. \quad (4.4)$$

Трудность предварительного расчета мощности двигателя ИС связана с тем, что на данном этапе проектирования неизвестны значения i и $J_{\dot{I}}$, существенно влияющие на его максимальную мощность.

Следует отметить, что недостаточность исходных данных является характерной особенностью инженерных расчетов. Для получения количественного результата приходится использовать всевозможные предположения, ориентировочные значения величин и упрощения, привлекать уже имеющийся опыт, выполнять различные проверки и уточнения. Такой метод решения задач является, по существу, методом последовательных приближений.

Для выполнения предварительного расчета мощности двигателя ИС следует рассмотреть специфику энергетики контурных и позиционных ИС.

4.2.1. При контурном режиме решается задача высокоточного перемещения рабочего органа робота по заданной траектории с требуемой контурной скоростью. Для этого необходимы высокая статическая и динамическая точности ИС, а также хорошие ее частотные свойства. Энергетические параметры в этом режиме не являются определяющими, так как статическая нагрузка близка к норме, а динамические режимы занимают незначительную часть общего времени работы, характеризуются малой интенсивностью.

Как правило, в быстродействующих контурных ИС нагрузка должна быть согласована с двигателем через редуктор таким образом, чтобы в режиме максимально необходимого ускорения двигатель развивал максимально допустимый для себя момент. Данное условие обеспечивается выбором оптимального по ускорению передаточного числа редуктора. Последнее зависит от конкретных значений момента инерции и максимально допустимого момента двигателя, от статического момента сопротивления и инерционности нагрузки.

Важное требование к ИС - минимальные габариты и вес двигателя. Оно реализуется в случае, если запас двигателя по моменту минимален и согласование с нагрузкой через редуктор обеспечивает минимально возможный момент двигателя, необходимый для получения заданного ускорения. Из теории известно, что в таких условиях момент инерции двигателя с редуктором, приведенный к валу ИС, т.е. J_{∂}^* близок к величине $(M_c + J_l \cdot \varepsilon_l) / \varepsilon_l$. Анализ и имеющийся опыт показывают, что в исполнительных системах с максимальным ускорением передаточное число и, соответственно, величина J_{∂}^* будут примерно такими же, как в ИС с минимальным моментом. Это означает, что в обоих названных случаях можно при оценке мощности двигателя ориентироваться на величину $J_{\ddot{a}}^* \approx (M_c + J_l \cdot \varepsilon_l) / \varepsilon_l$. Отклонение от этого равенства

в системах с максимальным ускорением тем меньше, чем меньше в нагрузке доля статического момента M_c . Таким образом, величину J_{∂}^* контурных ИС удастся оценить по параметрам нагрузки. Значения скорости и ускорения режима наибольшей нагруженности для расчетов контурных систем по формуле (4.1) берутся из исходных данных на проектирование.

Энергетические параметры ИС при контурном режиме не являются определяющими, так как статическая нагрузка близка к норме, а динамические режимы занимают незначительную часть общего времени работы и характеризуются малой интенсивностью.

Реально ИС, проектируемые на максимальное ускорение и малонагруженные статическим моментом, имеют такое же передаточное число, как и при минимуме момента двигателя. Поэтому данное выражение удобно для предварительного определения максимальной мощности двигателя контурных и позиционных ИС с малым типовым перемещением.

4.2.2. При позиционном режиме основная задача промышленного робота - перемещение рабочего органа в новое положение с заданной точностью за минимальное время. Здесь характерны часто повторяющиеся и весьма интенсивные разгоны и торможения, занимающие значительную часть общего времени работы. Энергетические параметры ИС при позиционном режиме работы становятся определяющими.

В позиционных ИС оптимальное передаточное число редуктора зависит от типового перемещения. Это отражается и на величине J_{∂}^* .

При малых перемещениях, составляющих доли процента от пути по координате, например, в роботах для точечной сварки, скорость ИС не успевает достигать установившегося значения. Закон ее изменения при позиционировании треугольный. В этих условиях привод, как и при контурном

управлении, должен проектироваться на максимальное ускорение. Здесь значение J_0^* близко к величине $(M_c + J_f \cdot \varepsilon_f) / \varepsilon_f$.

По мере увеличения типового перемещения, когда оно достигает единиц и десятков процентов от пути по координате (роботы для погрузочно-разгрузочных и транспортных операций), появляется участок, который ИС с минимальным временем позиционирования должна проходить на большой установившейся скорости. Закон ее изменения становится трапецеидальным. В таких условиях привод с максимальным ускорением, имеющий малую установившуюся скорость, не обеспечивает минимальное время позиционирования. При оптимизации этого времени оказывается, что передаточное число редуктора и скорость ИС требуются в 1,5 - 3 раза меньше, чем в предыдущем случае. Соответственно и величина J_0^* против предыдущего берется в 2 - 9 раз меньше.

При позиционном управлении значения скорости и ускорения ИС для предварительного расчета мощности необходимо находить специально. Дело в том, что в исходных данных для позиционных ИС оговариваются максимально допустимые значения скоростей и ускорений. Они носят ограничительный характер. Их величины зависят от особенностей кинематической цепи манипулятора, требуемого ресурса последнего, свойств объектов манипулирования, особенностей технологического процесса и иных соображений подобного рода. В проектируемой ИС они не должны превышать ни в каких режимах работы. Прямо с максимально необходимой мощностью они не связаны. Подход к выбору значений ω_n и ε_n , которые определяют требуемую мощность, базируется на соображениях и опыте, изложенных в [6, 7, 17, 24].

В позиционных ИС максимальная мощность двигателя требуется в конце разгона и в начале торможения, где скорость максимальна как при треугольном, так и при трапецеидальном законе движения (рис. 4.1). При этом получается, что макси-

мальная мощность зависит от величины типового перемещения, так как последнее определяет максимальную скорость.

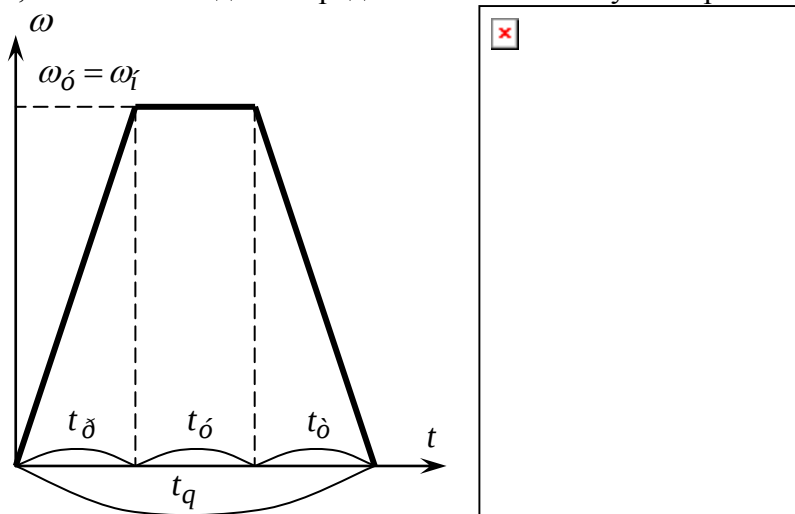


Рис. 4.1.

При малых перемещениях и, соответственно, треугольном законе изменения скорости, ее наибольшее значение будет $\omega_i = 0,5 \cdot \varepsilon_i \cdot t_q$. Для расчета $N_{\ddot{a}max}$ значение скорости ω_i берут обычно с небольшим запасом, 10-20 % против определенного выше, т.е. $\omega_i = (0,55-0,6) \cdot \varepsilon_i \cdot t_q$.

При больших типовых перемещениях скорость ИС достигает установившегося значения. Известно, что существует оптимальное значение этой скорости, при которой типовое перемещение за данное время выполняется с минимальной динамической мощностью двигателя. Эта скорость определяется как $\omega_i = 1,5 \cdot q / t_q$. Ее значение и используется для определения максимальной мощности двигателя, если в задании на проектирование не оговорена меньшая допустимая скорость.

При энергетических и других расчетах могут представлять интерес соотношения для определения других параметров движения. При трапецеидальном законе изменения скорости оптимальная величина пути разгона и торможения определя-

ется как $q_{\delta} \ddot{\omega}_0 = q_0 \ddot{\omega}_0 = 0,25 \cdot q$. Оптимальное время разгона будет $t_{\delta} = t_q/3$. Оптимальное ускорение при разгоне и торможении $\varepsilon_i = 4,5 \cdot q/t_q^2$.

Мощность двигателя, рассчитанная на данном этапе, не дает исчерпывающих данных для его выбора. Двигатели нужной мощности имеют разные значения максимального момента, скорости и момента инерции ротора. Последний определяет энергетические затраты на динамику собственно двигателя, в связи с чем является весьма важным его параметром. Для выбора двигателя крайне необходим учет его конструктивных особенностей.

Особо следует остановиться на определении параметров движения кинематических пар манипулятора, совершающих поступательное перемещение.

Линейные электрические машины не нашли широкого применения при проектировании поступательных степеней подвижности манипуляторов ПР. Обычно проектировщики используют электродвигатели с вращающимся ротором, а задачу преобразования движения в поступательное решают путем применения в конструкции реечных и винтовых передач. В этом случае преобразование параметров поступательного движения звена манипулятора к вращательному движению ротора двигателя определяется радиусом приведения такой передачи, рассчитываемым по формуле

$$\rho = \frac{V_i}{\omega_i}, \quad (4.5)$$

где V_i , ω_i - поступательная и вращательная скорости нагрузки исполнительного привода. Задаваясь значением радиуса приведения ρ при заданной линейной скорости нагрузки V_i можно вычислить необходимую угловую скорость шестерни (в случае применения реечной передачи) или винта (в случае с винтовой передачей).

Таким образом, переход от линейных параметров к параметрам вращательного движения можно получить

$$\dot{\tilde{n}} = F_c \cdot \rho, J_l = m \cdot \rho^2, \omega_l = V_l / \rho, \varepsilon_l = a_l / \rho, \quad (4.6)$$

где F_c - статическая сила, обусловленная силами тяжести; m - масса приводимых в движение тел; a_l - линейное ускорение приводимых в движение масс.

Передаточное число исполнительный системы теперь должно обеспечить согласование по скорости и моменту ротор двигателя и конечного звена механизма вращения.

4.3. Выбор двигателя

Требования к электродвигателям постоянного тока для ИС роботов, следящих и других высокودинамичных систем воспроизведения движения достаточно хорошо освещены в [1, 2, 13, 20, 22].

4.3.1. При выборе двигателей следует учитывать прежде всего их общие свойства.

Как известно, масса и габариты электродвигателя растут с увеличением мощности. Они больше у двигателей, имеющих большой момент. Для получения минимальных массы и габаритов ИС предпочтительны двигатели с большой частотой вращения. Однако для согласования их с низкоскоростной нагрузкой требуется редуктор. С увеличением передаточного числа последнего растет стоимость и снижается надежность ИС, так что передаточное число желательно иметь минимальным.

Важным требованием к двигателям высокودинамичных ИС является минимум их момента инерции. Это связано с тем, что в ярко выраженных динамических режимах затраты мощности на преодоление сил инерции самого ротора составляют значительную часть полной динамической мощности. Инерци-

онность ротора определяет важный показатель двигателя - его быстродействие, то есть величину теоретически возможного ускорения $\varepsilon_{\partial \max} = M_{\partial \max} / J_{\text{я}}$. $J_{\text{я}}$ определяет также электромеханическую постоянную времени собственно двигателя $T_{\text{мд}} = J_{\text{я}} / \beta$, где $\beta = \Delta M / \Delta \omega$ - жесткость механической характеристики. У лучших образцов $T_{\text{мд}} < 10$ мс. По соображениям быстродействия предпочтение следует отдавать двигателям, ротор которых имеет малый момент инерции за счет отсутствия в нем ферромагнетика.

Индуктивность и активное сопротивление якоря двигателя определяют его собственную электромагнитную инерционность, характеризующую электромагнитную постоянную времени $T_{\text{яд}}$. С увеличением последней замедляются процессы изменения тока (момента), а следовательно, ухудшаются динамические свойства двигателя. Однако при очень малых $T_{\text{яд}}$ пульсации тока при питании двигателя от управляемых источников с импульсным регулированием оказываются недопустимо большими, приводят к заметному нагреву. Для уменьшения пульсаций повышают частоту импульсной модуляции или увеличивают искусственно $T_{\text{яд}}$ за счет введения дросселя. Для современных двигателей величина $T_{\text{яд}}$ составляет единицы миллисекунд и менее.

Сопротивление якоря, если его нет в паспортных данных, ориентировочно находится по формуле

$$R_{\text{я}} = 0.5 \cdot (1 - \eta_{\partial}) \cdot U_{\text{н}} / I_{\text{н}}, \quad (4.5)$$

где $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ номинальные параметры двигателя, а η_{∂} - его КПД.

$R_{\text{я}}$ определяет жесткость механических характеристик и диапазон регулирования скорости.

Интенсивность переходных процессов двигателя можно характеризовать такими его энергетическими показателями,

как энергоемкость $\mathcal{E}_\partial = J_\partial \cdot \omega_{\partial n}^2$ и приемистость $P_\partial = M_{\partial \max} \cdot \varepsilon_\partial = J_\partial \cdot \varepsilon_\partial^2 = M_{\partial \max}^2 / J_\partial$, где $\varepsilon_\partial = M_{\partial \max} / J_\partial$ - ускорение двигателя при номинальном моменте. Энергоемкость характеризует запасаемую движущимися массами двигателя кинетическую энергию. Приемистость показывает достижимую скорость регулирования мощности на валу двигателя.

Тепловую инерционность двигателя характеризует тепловая постоянная времени T_q . Она показывает время, за которое двигатель нагревается на 63 % от допустимой установившейся температуры. Последняя определяется свойствами изоляции. Величина T_q растет с улучшением условий отвода тепла и для электродвигателей роботов составляет 5 – 8 мин.

4.3.2. Общие свойства двигателей связаны с их конструктивными особенностями.

Двигатели обычного исполнения имеют ферромагнитный пазовый якорь и электромагнитное возбуждение. Для них характерны большие значения $T_{m\partial} > 20$ мс и $T_{я} > 5$ мс, удельный момент менее 0,1 Нм/кг. К этой группе относятся двигатели серий ДИ, МИ, СД, П, Д, СЛ. Только последние являются более-менее подходящими для ИС роботов.

Высокомоментные двигатели – это, как правило, многополюсные электрические машины с возбуждением от высококоэрцитивных магнитов, с гладким ферромагнитным якорем и большим числом коллекторных пластин. Их перегрузочная способность по току (моменту) достигает 14, удельный момент превышает 0,2 Нм/кг. Обмотка на гладком якоре хорошо охлаждается. Это двигатели серий ДПТ, ДПР, ДПИ и ДП. Использование их предпочтительно для больших перемещений на переносных и транспортных координатах при требуемом моменте более 10 Нм и мощности более 0,5 кВт.

Двигатели с полым и дисковым якорем без ферромагнетика являются, как правило, высокомоментными, имеют воз-

буждение от постоянных магнитов, малый момент инерции, обеспечивают высокоинтенсивные переходные процессы, целесообразны при номинальных моментах менее 5 Нм в ИС с малыми типовыми перемещениями.

В большинстве случаев предпочтение следует отдавать двигателям, имеющим встроенный тахогенератор. Это упрощает конструкцию электромеханического модуля, делает ее более совершенной, улучшает массогабаритные показатели.

4.3.3. В литературе описаны разнообразные методики выбора двигателя, отличающиеся не только критериями согласования с нагрузкой, но и величинами, подлежащими согласованию [12, 20]. Последними для двигателя с одной стороны и нагрузки с другой являются скорость, момент, ускорение и момент инерции.

Двигатели одной мощности имеют различные номинальные момент и скорость. Очень важно подобрать такой двигатель, который одновременно и по моменту и по скорости будет использован рационально, т.е. и по моменту и по скорости будет хорошо согласован с нагрузкой.

Условия рациональности должны учитывать и основную задачу, решаемую ИС, и типовые режимы работы. Так, например, для позиционных систем с малыми перемещениями, а также для контурных систем полагают, что оптимальное согласование должно обеспечивать максимальное ускорение. Для позиционных систем с большими перемещениями должно обеспечиваться минимальное время позиционирования. Согласование высокооборотного двигателя с низкоскоростной нагрузкой выполняется механическим редуктором.

В [16, 20] показано, что переменные, подлежащие согласованию, можно определить как энергетические показатели двигателя и нагрузки такие, как энергоемкость и приемистость. Удобно то, что эти показатели не зависят от передаточного числа редуктора. Они позволяют уже на начальном этапе проектирования, при известных параметрах движения

нагрузки и ее инерционности достаточно точно определить требуемый момент, скорость и оптимальный момент инерции двигателя.

Наиболее просто и точно энергетические критерии формулируются для ИС, обеспечивающих максимум ускорения при $M_c = 0$. В этом случае условия согласования

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{\ddot{a}} &= J_{\ddot{a}} \cdot \omega_{\ddot{a}I}^2 \geq J_I \cdot \omega_I^2 = \dot{Y}_I, \\ \ddot{I}_{\ddot{a}} &= \dot{I}_{\ddot{a}\max}^2 / J_{\ddot{a}} \geq 4 \cdot J_I \cdot \varepsilon_I^2 = 4\ddot{I}_I. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Физический смысл этих условий достаточно прост. При $\mathcal{E}_\partial = \mathcal{E}_n$ запасы кинетической энергии двигателя и нагрузки одинаковы, что означает их согласованность по мощности, моменту инерции и скорости. При $\mathcal{E}_\partial < \mathcal{E}_n$ можно утверждать, что согласования нет из-за недостаточной скорости двигателя. Другими словами, требуемая по условиям согласования скорость для данного двигателя превышает номинальную, он как бы “перегружен” по скорости в то время, как может быть недоиспользован, недогружен по моменту. Подобная ситуация неприемлема для ИС с максимальным ускорением, однако удовлетворяет требованиям позиционных ИС с большими типовыми перемещениями, где в ущерб ускорению требуется иметь повышенную максимальную скорость нагрузки. При существенном различии $\mathcal{E}_\partial > \mathcal{E}_n$ двигатель будет недоиспользован по скорости и перегружен по моменту. Это означает несогласованность моментов инерции.

При $P_\partial \geq 4P_n$ ускорение ИС будет больше или равно требуемому, иначе - меньше необходимого. Выполнение условия $P_\partial \geq 4P_n$ является, как правило, более важным, чем $\mathcal{E}_\partial > \mathcal{E}_n$.

Используя показатель приемистости следует иметь в виду следующее. Если с помощью этого показателя сравниваются между собой несколько двигателей, следует учитывать номинальное значение их моментов. Если по приемистости осу-

ществляется выбор двигателя для исполнительной системы, то следует брать максимальное рабочее, т.е. значение его момента с учетом перегрузки двигателя .

В большинстве случаев невозможно подобрать такой двигатель, который согласуется с нагрузкой без запаса по всем параметрам одновременно. По отдельным показателям неизбежно превышение, что и учитывается знаками неравенства в приведенных критериях.

Паспортные данные двигателей, применяемых в робототехнике, приведены в приложении 2, а также в [14].

4.4. Определение передаточного числа редуктора

Номинальная мощность электродвигателя развивается при частоте вращения во много раз больше, чем требуется для манипуляционного механизма. При этом, соответственно, момент двигателя во много раз меньше требуемого. Согласование параметров движения двигателя с нагрузкой выполняется с помощью редуктора, который понижает скорость в i раз, увеличивая во столько же раз момент.

В ИС роботов с известным статическим моментом и моментом инерции выбор передаточного числа редуктора производится из условия обеспечения максимального быстродействия или максимального ускорения ИС при минимальном моменте двигателя. Именно такое условие позволяет получить высокие эксплуатационные свойства ИС при минимальных массе и габаритах привода.

4.4.1. В ИС с контурным управлением, а также в позиционных ИС с малым типовым перемещением, когда скорость не успевает нарасти до установившегося значения, а ее график треугольный, быстродействие пропорционально ускорению. Обеспечить максимальное быстродействие - значит получить

максимальное ускорение. При этом задача определения оптимального передаточного числа редуктора решается двояко.

Случай 1. Когда двигатель выбран и проектировщик знает его момент инерции и максимально допустимый момент на валу, тогда оптимальное передаточное число редуктора определяется как такое, при котором данный двигатель обеспечивает максимально возможное ускорение ИС с известными моментом инерции и моментом статическим. Идея поиска i_{onm} проста: надо найти абсциссу экстремума функции $\varepsilon_n(i)$, определяемой выражением (4.4). Продифференцировав его по i и приравняв эту частную производную к нулю, получим квадратное уравнение, одно из решений которого является искомой величиной

$$i_{\ddot{n} \ddot{a}} \varepsilon = \frac{\dot{I} \ddot{n}}{\eta \cdot \dot{I} \ddot{a}} + \sqrt{\left(\frac{\dot{I} \ddot{n}}{\eta \cdot \dot{I} \ddot{a}} \right)^2 + \frac{J_{\dot{I}}}{\eta \cdot J_{\ddot{a}}}}. \quad (4.7)$$

При отсутствии статического момента сопротивления, т.е. при $M_c = 0$ оптимальное передаточное число будет

$$i_{\ddot{n} \ddot{a}} \varepsilon = \sqrt{\frac{J_{\dot{I}}}{\eta \cdot J_{\ddot{a}}}}. \quad (4.8)$$

Случай 2. Когда известно требуемое ускорение ε_n , то величину i можно определить как такую, при которой от двигателя с известным моментом инерции потребуются для получения ε_n , минимальный момент. Порядок поиска i_{onm} аналогичен предыдущему: находится абсцисса экстремума функции $M_\partial(i)$, определяемой выражением (4.3)

$$\dot{I} \ddot{a} = \frac{\dot{I} \ddot{n}}{\eta \cdot i} + \left(\frac{J_{\dot{I}}}{\eta \cdot i} + J_{\ddot{a}} \cdot i \right) \cdot \varepsilon_{\dot{I}}. \quad (4.9)$$

Продифференцировав его по i и приравняв эту частную производную к нулю, получим уравнение, решение которого

$$\dot{i}_{\text{ндо}} \dot{i} = \sqrt{\frac{\dot{I}_{\text{н}} + J_{\dot{i}} \cdot \varepsilon_{\dot{i}}}{\eta \cdot J_{\ddot{a}} \cdot \varepsilon_{\dot{i}}}}. \quad (4.10)$$

и есть искомая величина $\dot{i}$, минимизирующая момент двигателя. Если ИС не нагружена статическим моментом, то $i_{\text{онт м}} = i_{\text{онт}} \varepsilon$.

4.4.2. В позиционных ИС с большим типовым перемещением, когда на некотором участке пути система движется с установившейся скоростью, максимальное быстродействие означает минимум времени позиционирования. Соответственно, оптимальное $\dot{i}$ определяется как такое, при котором в ИС с выбранным двигателем обеспечивается минимум времени позиционирования. Наличие оптимума по $\dot{i}$ связано со следующим. При увеличении $\dot{i}$ быстро уменьшается приведенный к валу двигателя момент инерции нагрузки, благодаря чему растет ускорение ИС. За счет этого уменьшается время разгона и торможения. Однако одновременно уменьшается и установившаяся скорость ИС, ограниченная максимальной скоростью двигателя. В результате ИС проходит большой участок пути на малой установившейся скорости и общее время позиционирования может увеличиться.

Для определения $i_{\text{онт}}$ записывают функцию времени, затрачиваемое на отработку координаты $t_q(i)$. При этом обычно считают, что время разгона и торможения одинаковы, скорость нарастает и спадает линейно, а в пределах времени t_y движение происходит с установившейся скоростью ω_y , как показано на рис. 4.1.

Тогда время отработки обобщенной координаты

$$t_q = 2 \cdot t_p + t_y. \quad (4.11)$$

Величину t_p можно определить из равенства импульса динамического момента на валу ИС $M_{\text{дин}} \cdot t_p$ и количества движения $J_{\Sigma} \cdot \omega_y$ за время разгона, что даст

$$t_p = J_{\Sigma} \cdot \omega_y / M_{\partial \text{ин}}. \quad (4.12)$$

Величина t_y с учетом того, что график скорости трапецеидальный

$$t_y = (q - 2 \cdot q_p) / \omega_y. \quad (4.13)$$

В свою очередь, учитывая равенство работы динамического момента системы на пути разгона q_p и кинетическую энергию ее масс J_{Σ} , движущихся в конце участка разгона со скоростью ω_y , путь разгона определится как

$$q_p = J_{\Sigma} \cdot \omega_y / (2 \cdot M_{\partial \text{ин}}). \quad (4.14)$$

Подставляя (3.4.4.), (3.4.5) и (3.4.6) в (3.4.3), а также учитывая, что скорость двигателя $\omega_{\partial} = i \cdot \omega_n$, динамический момент на его валу $M_{\partial \partial \text{ин}} = M_{\partial \text{ин}} / (\eta \cdot i)$, а $J_{\Sigma} = J_{\dot{I}} + J_{\ddot{a}} \cdot i^2$, получим

$$t_q = \frac{q \cdot i}{\omega_{\ddot{a}}} + \frac{(J_{\dot{I}} + J_{\ddot{a}} \cdot i^2) \cdot \omega_{\ddot{a}}}{i^2 \cdot M_{\ddot{a} \ddot{a} \ddot{e} \dot{I}} \cdot \eta}. \quad (4.15)$$

Взяв производную $\partial t_q / \partial i$, приравняв ее к нулю и решив это уравнение, получим оптимальное передаточное число редуктора, минимизирующее время позиционирования

$$i_{\dot{I} \ddot{a} \ddot{e} \dot{I} \partial t} = 3 \sqrt{\frac{2 \cdot J_{\dot{I}} \cdot \omega_{\ddot{a}}}{q \cdot M_{\ddot{a} \ddot{a} \ddot{e} \dot{I}} \cdot \eta}}. \quad (4.16)$$

Таким образом, при $M_c = 0$ величина i , минимизирующая время позиционирования, зависит от $M_{\partial \partial \text{ин}}$, от номинальной частоты вращения ω_{∂} и момента инерции нагрузки $J_{\dot{I}}$, а также от типового перемещения q . Если $M_c \neq 0$, то $M_{\partial \partial \text{ин}} = M_{\partial \text{макс}} - M_c / (\eta \cdot i)$ и вычислять $i_{\text{онмт}}$ приходится методом последовательных приближений.

При использовании (4.16) необходимо проверять, действительно ли перемещение настолько велико, что на пути позиционирования есть участок движения с установившейся скоростью. Подходы к такой проверке могут быть самые разные. Автор [24] предлагает в качестве признака правомерности расчетов по (4.16) сравнивать с единицей отношение приведенного к валу двигателя момента инерции нагрузки и момента инерции самого двигателя, т.е. $J/(J_d \cdot i^2) > 1$. Если проверка не подтверждает правомерность использования (4.16), то передаточное число редуктора следует определять по (4.7).

Существует множество других способов оценки требуемого передаточного числа редуктора. Высокой наглядностью обладают графические способы [16, 27], но они трудоемки. Широко используется мажорантный способ [10], в основе которого - определение допустимых значений i_1 и i_2 . Принципиальных отличий по получаемым результатам все эти способы не имеют. Проектировщик вправе выбирать любой из них.

4.5. Методика выбора двигателя и передаточного числа редуктора

Предлагаемая методика базируется на теоретических положениях, описанных в пп. 4.1 - 4.4. Методика удобна, когда требования к ИС по массогабаритным показателям сформулированы в общем виде.

В качестве исходных данных используются величины скоростей и ускорений, подлежащие реализации в ИС. Как основные согласуемые динамические переменные рассматриваются приемистость и скорость. Исходные данные, необходимые для выбора двигателя контурных ИС, содержатся в техническом задании на проектирование. Для позиционных ИС они должны быть определены специально, например, так, как описано в п.4.2.2.

Перед расчетами по данной методике целесообразно выполнить ориентировочный расчет мощности двигателя и определить серии, из которых он будет выбираться.

Последовательность и содержание основных пунктов методики следующие.

4.5.1. Определяется требуемая величина приемистости нагрузки

$$4\ddot{I}_{\dot{I}} = 4 \frac{\varepsilon_{\dot{I}}}{\eta^2} \left(\dot{I}_{\ddot{n}} + J \cdot \varepsilon_{\dot{I}} \right). \quad (4.17)$$

4.5.2. С учетом рекомендаций п.4.3. из выбранной серии берутся несколько двигателей с мощностью, близкой к расчетной и определяется их приемистость. При этом момент двигателя берется соответствующим двух - трехкратной перегрузке. Таким образом выбирается двигатель, удовлетворяющий условию $\ddot{I}_{\ddot{a}max} > 4\ddot{I}_{\dot{I}}$. Равенство $\ddot{I}_{\ddot{a}max} = 4\ddot{I}_{\dot{I}}$ означает, что выбранный двигатель в условиях оптимального согласования с нагрузкой обеспечивает требуемое ускорение без запаса по моменту. Условие $\ddot{I}_{\ddot{a}max} < 4\ddot{I}_{\dot{I}}$ говорит о том, что двигатель с выбранной перегрузкой по моменту даже в условиях оптимального согласования не в состоянии обеспечить требуемое ускорение нагрузки. Необходимо увеличить перегрузку этого двигателя или взять другой.

Для высокодинамичных ИС, особенно позиционных, работающих в интенсивных переходных режимах, предпочтителен выбор двигателя, высокая приемистость которого обеспечивается при малой его мощности за счет малого $J_{\ddot{a}}$ и большого $\dot{I}_{\ddot{a}max}$.

4.5.3. Определяется передаточное число редуктора, близкое к оптимальному. При этом используются расчетные соотношения и рекомендации п. 4.4.

4.5.4. Проверяется согласованность двигателя с нагрузкой по скорости. Условие согласования $\omega_{\ddot{a}max} \geq \omega_i \cdot i$.

При этом могут встретиться следующие варианты:

Вариант А. Условие согласования выполняется. Можно считать, что выбор двигателя на данном этапе закончен. Однако если есть существенное превышение $\omega_{\ddot{a}max}$ над

$\omega_i \cdot i$, это свидетельствует о большой недогруженности двигателя по скорости и мощности. При жестких массогабаритных требованиях к ИС желательно выбрать другой двигатель с меньшей мощностью за счет меньшей скорости.

Вариант Б. Условие согласования по скорости не выполняется. Если двигатель не имел значительного запаса по моменту, следует возвратиться к п. 4.5.2. и выбрать двигатель с большей максимальной скоростью при той же приемистости или с большей приемистостью и мощностью при прежней скорости, что менее предпочтительно.

Вариант В. Условие согласования по скорости не выполняется. Если двигатель имел запас по моменту, то можно попытаться использовать этот запас, уменьшив передаточное число редуктора до величины, обеспечивающей согласование по скорости, после чего проверить, обеспечивает ли ИС с таким редуктором требуемое ускорение

$$\varepsilon_i = \frac{\dot{I} \ddot{a}_{max} \cdot \eta \cdot i - M \ddot{n}}{J + J_{\ddot{a}} \cdot i^2 \cdot \eta} > \varepsilon_{i \hat{i}}. \quad (4.18)$$

Если ускорение оказывается не менее требуемого, то двигатель обеспечивает заданные скорость и динамику при передаточном числе редуктора меньшем, чем оптимальное по быстродействию.

Если требуемое ускорение не обеспечивается, то ситуация оказывается аналогична той, что предполагает **Вариант Б.** Придется вернуться к п.4.5.2. и выбрать другой двигатель.

4.6. Проверка на нагрев

Необходимость проверки ИС по параметрам движения обусловлена следующим.

Во-первых, на предыдущих этапах при реализации требуемых скорости, ускорения и времени позиционирования исходили из расчетных значений передаточного числа, момента инерции и КПД редуктора. После выбора последнего по каталогу из числа серийных его параметры корректируются. В связи с этим должны быть уточнены и параметры движения, так что может потребоваться дополнительная проверка энергетики.

Во-вторых, существует опасность превышения предельно допустимых скорости и ускорения. Это связано с наличием запасов по скорости и моменту двигателя, а также с тем, что момент инерции ИС может становиться существенно меньше максимального, а перемещение - больше типового.

В-третьих, следует определить максимально необходимые фактические значения скорости и момента двигателя, обеспечивающие для контурных ИС требуемые скорость и ускорение, для позиционных - время позиционирования. Эти фактические значения необходимы для проверки двигателя на нагрев, а также для реализации соответствующих ограничений в системе регулирования.

В заключение энергетических расчетов проводится проверка двигателя на нагрев. На рис. 4.2 приведена нагрузочная диаграмма исполнительного двигателя в типовом цикле работы позиционной исполнительной системы робота при большом типовом перемещении.

Особенностью ИС роботов является то, что время цикла, как правило, существенно меньше, чем тепловая постоянная времени электродвигателя. В этих условиях проверку на нагрев для двигателей постоянного тока можно вести по среднеквадратичному моменту

$$\dot{I}_{\ddot{a}i} \geq M_{\ddot{n}\ddot{e}\ddot{a}} = \sqrt{\frac{\dot{I}_{\ddot{\delta}}^2 t_{\ddot{\delta}} + \dot{I}_{\ddot{n}}^2 t_{\ddot{o}} + \dot{I}_{\ddot{\delta}}^2 t_{\ddot{\delta}} + \dot{I}_{\ddot{n}}^2 t_{\ddot{i}}}{T_{\ddot{o}}}}, \quad (4.19)$$

где $\dot{I}_{\ddot{\delta}}, t_{\ddot{\delta}}$ - момент и время при разгоне двигателя; $\dot{I}_{\ddot{n}}, t_{\ddot{o}}$ - момент и время при движении с постоянной скоростью; $\dot{I}_{\ddot{\delta}}, t_{\ddot{\delta}}$ - момент и время при торможении двигателя; $\dot{I}_{\ddot{n}}, t_{\ddot{i}}$ - момент и время в паузе; $T_{\ddot{o}} = t_q + t_{\ddot{i}}$ - время цикла.

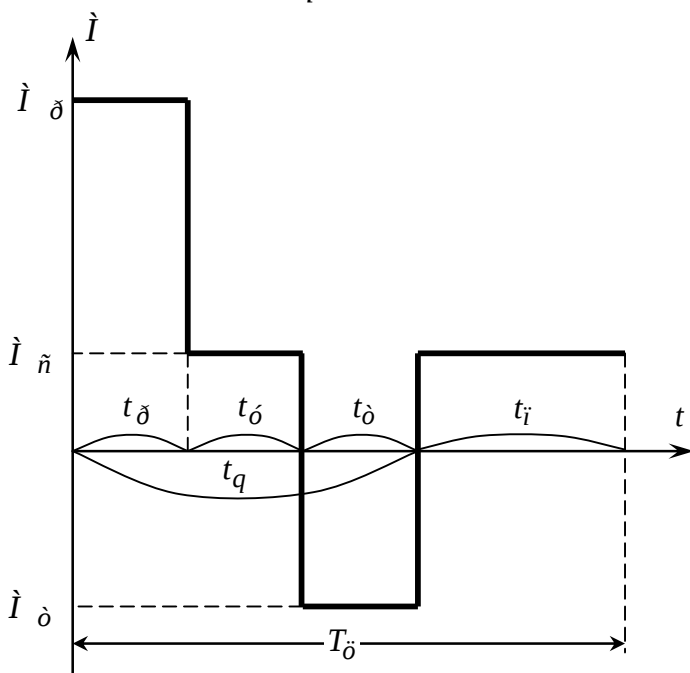


Рис. 4.2.

При горизонтальном расположении плоскости перемещения координаты для удержания ее в неподвижном состоянии момент двигателя не требуется, тогда $\dot{I}_{\ddot{n}} = 0$.

Для исполнительного двигателя позиционной системы с малым типовым перемещением участок движения с постоянной скоростью отсутствует, т.е. $t_{\ddot{o}} = 0$.

В случае контурного управления нагрузочная диаграмма исполнительного двигателя может быть получена следующим образом. Сначала необходимо решить обратную задачу кинематики, определяя тем самым закон изменения требуемой обобщенной координаты во времени из траектории рабочего органа в базовой системе координат манипулятора. Используя полученную функцию обобщенной координаты и ее первой и второй производных по времени в качестве задания для динамической модели манипулятора, на выходе этой модели получим искомую зависимость момента ИС от времени. Анализ этой зависимости позволяет в техническом задании на проектирование задать коэффициенты K_{max} и K_c . Они определяют долю времени движения в цикле звена манипулятора в интенсивных переходных процессах (с максимальным рабочим моментом при разгоне / торможении) и в статическом режиме работы (при медленно меняющейся скорости рабочего органа) соответственно.

$$t_{max} = K_{max} T_{\ddot{\theta}}; \quad t_c = K_c T_{\ddot{\theta}}. \quad (4.20)$$

Тогда выражение для определения среднеквадратичного момента при проверке исполнительного двигателя на нагрев принимает вид

$$\dot{I}_{\ddot{\theta}} \geq M_{\ddot{\theta}} = \sqrt{\frac{\dot{I}_{\ddot{\theta}}^2 \cdot t_{max} + \dot{I}_{\ddot{\theta}}^2 \cdot t_c + \dot{I}_{\ddot{\theta}}^2 \cdot t_i}{T_{\ddot{\theta}}}}. \quad (4.21)$$

Следует учитывать, что для исполнительной системы, работающей в горизонтальной плоскости статическая составляющая момента равна 0.

Если в результате расчетов $\dot{I}_{\ddot{\theta}} \geq M_{\ddot{\theta}}$, то тепловой режим двигателя в пределах нормы. В противном случае следует выбрать двигатель с большим номинальным моментом или уменьшить его нагруженность и повторить все расчеты.

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НЕИЗМЕНЯЕМОЙ ЧАСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В данном разделе следует обосновать назначение и необходимость использования каждого из устройств неизменяемой части ИС, определить требования к этим устройствам и выбрать их из числа выпускаемых серийно. Необходимо также разработать специальные средства, обеспечивающие помехозащищенность и согласование информационных сигналов. Далее определяются все необходимые параметры математической модели и приводится структурная схема неизменяемой части.

С учетом учебного характера проекта считается, что серийные устройства неизменяемой части ИС выбраны, если их паспортные параметры определены численно.

5.1. Управляемый источник питания и силовая цепь

Требования к управляемому источнику питания (УИП) тесно связаны с параметрами двигателя, так что необходимо выписать паспортные данные выбранного двигателя и определить другие его параметры, необходимые для дальнейших расчетов.

В настоящее время в управляемом электроприводе исполнительных систем хорошо зарекомендовали себя широтно-импульсные преобразователи (ШИП), обладающие малой инерционностью и допускающие регулирование скорости двигателя в широком диапазоне.

Номинальное выходное напряжение ШИП выбирается на 10-20 % больше номинального напряжения двигателя. Такой запас необходим с учетом возможного снижения напряжения питающей сети и для форсировки двигателя. Если двигатель используется на скорости выше номинальной, то указан-

ные превышения необходимо брать относительно напряжения двигателя на максимальной скорости.

Токи ШИП, как номинальный, так и максимально допустимый, должны быть не меньше соответствующих токов двигателя.

Внутреннее сопротивление ШИП ориентировочно можно определить через номинальное напряжение и ток преобразователя как

$$R_i = (0,002 \div 0,1) \frac{U_{i \dot{i}}}{I_{i \dot{i}}}. \quad (5.1)$$

Важным этапом проектирования является определение необходимой индуктивности якорной цепи L_a по соображениям сглаживания пульсаций тока, а также обеспечения его непрерывности. При выполнении первого условия выполняется, как правило, и второе.

Точный расчет L_a требует большого объема вычислений. В инженерной практике пользуются приближенной оценкой L_a по формуле

$$L_a = \frac{e_{i \dot{i}} \cdot E_{i \dot{i}} \max}{i_{i \dot{i}} \cdot \omega_{i \dot{i}} \cdot I_{i \dot{i}} \dot{i}} = \frac{e_{i \dot{i}} \cdot E_{i \dot{i}} \max}{i_{i \dot{i}} \cdot 2\pi \cdot f_{i \dot{i}} \cdot I_{i \dot{i}} \dot{i}}, \quad (5.2)$$

где $e_{i \dot{i}}$ - максимально возможная относительная величина эффективного значения напряжения первой гармоники пульсаций на выходе ШИП; $i_{i \dot{i}}$ - максимально допустимая относительная величина эффективного значения тока первой гармоники пульсаций ШИП; $f_{i \dot{i}}$ и $\omega_{i \dot{i}}$ - частота и угловая частота пульсаций; $E_{i \dot{i}} \max$ - максимальная ЭДС преобразователя; $I_{i \dot{i}} \dot{i}$ - номинальный ток нагрузки.

Величина $i_{i \dot{i}}$ на практике выбирается в диапазоне $0,03 \div 0,09$. Чем меньше мощность преобразователя (двигате-

ля) и выше требования к его регулировочным свойствам, тем меньше должно быть $i_{\dot{\gamma}}$ и больше требуется L_a .

Для ШИП пульсации обычно максимальны при коэффициенте заполнения $\gamma = 0,5$, т.е. при $E_{\dot{\gamma}} = 0,5 \cdot \dot{A}_{\dot{\gamma} \max}$, а $e_{\dot{\gamma}}$ составляет при этом 0,45.

Частота пульсаций ШИП определяется его частотой импульсной модуляции, в современных устройствах составляющей 2-20 кГц.

Для реализации L_a необходимо в якорную цепь ввести дроссель с индуктивностью

$$L_{\ddot{a}\delta} = L_a - L_{\ddot{\gamma}}, \quad (5.3)$$

где $L_{\ddot{\gamma}}$ - индуктивность якоря двигателя. Активное сопротивление дросселя можно в первом приближении рассчитать через номинальное напряжение преобразователя и ток дросселя

$$R_{\ddot{a}\delta} = (0,003 \div 0,01) \frac{U_{\dot{\gamma} \dot{\gamma}}}{I_{\dot{\gamma} \dot{\gamma}}}. \quad (5.4)$$

Коэффициент передачи преобразователя с приемлемой точностью рассчитывается по формуле

$$\hat{E}_{\dot{\gamma}} = \frac{\dot{A}_{\dot{\gamma} \max}}{U_{\acute{o} \max}} = \frac{U_{\dot{\gamma} \dot{\gamma}} + I_{\dot{\gamma} \dot{\gamma}} \cdot R_{\dot{\gamma}}}{U_{\acute{o} \max}}, \quad (5.5)$$

где $U_{\acute{o} \max}$ - максимальное значение напряжения управления преобразователя.

Для сглаживания помех по сигналу управления преобразователя вводится фильтр, являющийся апериодическим звеном. Постоянная времени фильтра зависит от частоты импульсной модуляции ШИП и в первом приближении определяется выражением

$$\dot{O}_{\delta} = \frac{1 \div 2}{f_{\dot{e} \dot{\gamma}}}. \quad (5.6)$$

При расчете элементов R и C этого фильтра можно считать, что входное сопротивление ШИП составляет 10 кОм, а

выходное сопротивление источника сигнала управления преобразователем - регулятора - 100 - 200 Ом.

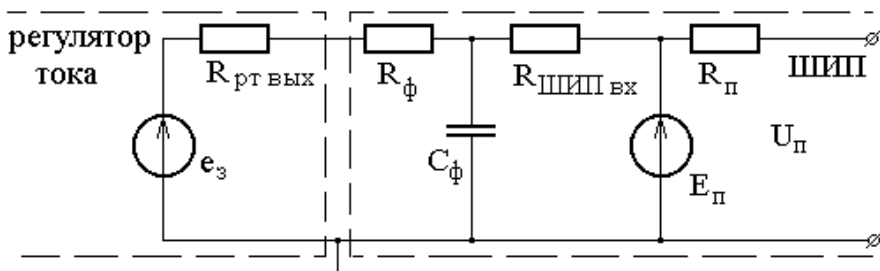


Рис. 5.1. Схема замещения ШИП

Передающая функция ШИП не учитывает свойства преобразователя по возмущению. Эти свойства учитываются в математическом описании исполнительного двигателя, где в постоянные времени T_a и T_l входят параметры всей силовой цепи. Полная индуктивность якорной цепи вычисляется по формуле (5.2), а полное сопротивление якорной цепи можно определить в соответствии с выражением

$$R_a = R_{\ddot{y}} + R_{\ddot{a}\delta} + R_i + R_{\emptyset} . \quad (5.7)$$

Коэффициент передачи ДПТ определяют по формуле

$$K_{\ddot{a}} = \frac{\omega_l}{U_l - I_l R_{\ddot{y}}} . \quad (5.8)$$

Постоянные времени двигателя ИС вычисляют как

$$T_{\ddot{a}} = \frac{L_a}{R_a} , \quad (5.9)$$

$$T_l = \hat{E}_{\ddot{a}}^2 R_a J_{\Sigma} , \quad (5.10)$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции на валу двигателя. Он включает в себя момент инерции ротора двигателя $J_{\ddot{y}}$ и среднее значение момента инерции манипуляционного устройства $J_{l\ddot{a}\delta}$.

Таким образом, с учетом передаточного числа редуктора, получим выражение

$$J_{\Sigma} = J_{\ddot{y}} + \frac{(J_{\dot{I} \max} + J_{\dot{I} \min})}{2 \cdot i^2}. \quad (5.11)$$

В дальнейшем определяются статические и динамические параметры, входящие в математическое описание силовой цепи и изображается ее структурная схема.

Технические данные ШИП, а также комплектных электроприводов для промышленных роботов приведены в [4, 14, 26].

5.2. Цепь обратной связи по току

Обратная связь (ОС) по току усложняет исполнительную систему, увеличивает ее стоимость, так что использование этой ОС должно быть оправданно.

В качестве преобразователя тока в напряжение в электроприводах часто используется шунт, включенный в якорную цепь и непосредственно преобразующий ток двигателя в напряжение.

Стандартные шунты типа 75 Ш или 75 ШС имеют напряжение 75 мВ при токах 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0 А и так далее в соответствии с этим рядом чисел. Номинальный ток шунта следует выбирать близким к максимальному рабочему току двигателя, но не менее последнего.

Сигнал с шунта подается на устройство гальванической развязки (УГР), далее - на линейный усилитель, который приводит сигнал к стандартному уровню, например, $U_{oci} = 10$ В.

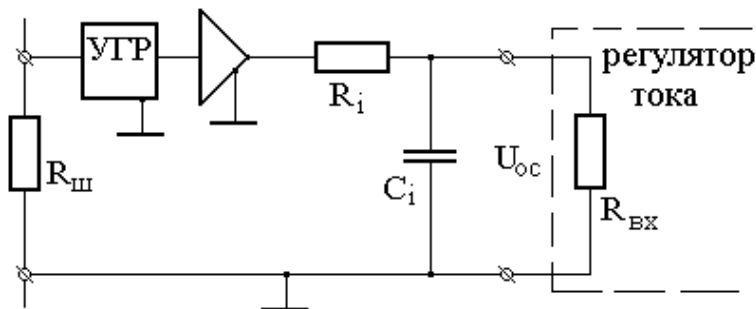


Рис. 5.2. Цепь обратной связи по току

Как правило, УГР и усилитель входят в состав преобразователя. Проектировщику необходимо лишь определить требуемый коэффициент передачи названного усилителя. При этом U_{oci} должно обеспечиваться при максимальном токе двигателя. Коэффициент передачи такого датчика

$$K_i = R_{\emptyset} K_{\phi} = \frac{U_{oci}}{I_{\dot{y}max}}. \quad (5.12)$$

Значение сопротивления шунта $R_{\emptyset}$ необходимо в дальнейшем учитывать в сопротивлении якорной цепи R_a .

$$R_{\emptyset} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{I_{\emptyset \text{ м}}}. \quad (5.13)$$

Для выходных сигналов датчиков тока характерен большой уровень пульсаций, приводящий к недопустимым колебаниям тока в контуре его регулирования. Эти пульсации необходимо сглаживать RC фильтром на выходе датчика. В датчиках тока ШИП, при частоте пульсаций 2 - 8 кГц, достаточно иметь $T_i = 0,3 - 1$ мс.

5.3. Цепь обратной связи по скорости

В качестве датчика обратной связи (ОС) по частоте вращения (скорости) в ИС с двигателями постоянного тока используются высокоточные тахогенераторы (ТГ) постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Современные двигатели, предназначенные для ИС ПР и других высокоточных и динамичных систем воспроизведения движений, имеют, как правило, встроенные ТГ. Это позволяет существенно упростить конструкцию ИС. Примером являются двигатели серий ДП, ПЯ, ПБВ, ДПУ, ДПИ с пазовым якорем и 4ДПУ.

Основными параметрами ТГ являются крутизна его характеристики $S_{\dot{\alpha}}$, определяемая относительно ЭДС, а также сопротивление якоря $R_{\dot{\alpha}}$. Типичные значения $S_{\dot{\alpha}} = (0,01 - 0,06) \text{ В/(об/мин)}$, $R_{\dot{\alpha}} = (0,05 - 0,2) \text{ кОм}$.

При выполнении проекта можно считать, что $S_{\dot{\alpha}} = 0,02 \text{ В/(об/мин)}$, $R_{\text{ТГ}} = 0,1 \text{ кОм}$. Достаточно подробно тахогенераторы описаны в [32].

При проектировании цепи ОС по скорости необходимо привести выходной сигнал ТГ к стандартному задающему воздействию, а также сгладить имеющиеся в нем пульсации и помехи. Первая задача решается с помощью резистивного делителя, вторая с помощью RC фильтра.

Приведение осуществляется обычно к уровню 0,93 - 0,98 максимума сигнала задания, что позволяет с гарантией обеспечивать максимально необходимую скорость привода. Коэффициент передачи K_{ω} определяется для выходного напряжения датчика с учетом сопротивления нагрузки. Последним является входное сопротивление регулятора скорости, составляющее обычно 10 кОм.

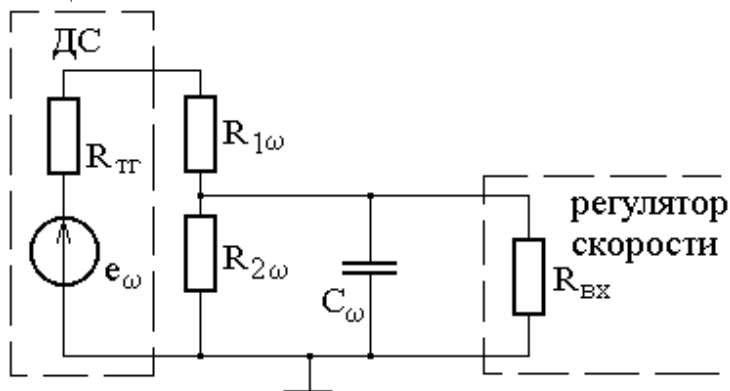


Рис. 5.3. Цепь обратной связи по скорости

Фильтр реализуют, подключая на выход цепи ОС конденсатор. Роль резистора, определяющего постоянную време-

ни фильтра, выполняет сопротивление параллельного соединения трех цепей - входного сопротивления регулятора, суммы $R_{\dot{o}\tilde{a}}$ и сопротивления последовательного резистора делителя, сопротивление параллельного резистора делителя. Постоянную времени T_{ω} выбирают 1 - 4 мс, что обеспечивает удовлетворительное сглаживание щеточных и зубцовых пульсаций.

6. РАСЧЕТ НАСТРОЕК

Данный этап включает уяснение требований к настраиваемому контуру, выбор какого-либо оптимума, выявление звеньев с компенсируемой и звеньев с малыми постоянными времени в настраиваемых контурах, определение типа регулятора и расчет его параметров. Достаточно полно эти вопросы рассмотрены в [3, 5, 18, 21, 31].

6.1. Контур тока

Расчет настройки контура тока по исходной структурной схеме затруднен, так как сигнал, соответствующий ЭДС двигателя, образует перекрещивающиеся обратные связи. По существу он является возмущающим воздействием для контура тока, приводит к отклонениям последнего от значений, предписанных сигналом задания. Формируется это возмущение в канале внутренней обратной связи в зависимости от частоты вращения. Из-за перекрещивающихся связей контур тока пересекается с контуром скорости, расчет настройки заметно усложняется.

Расчет можно существенно упростить, если двигатель в составе привода является апериодическим звеном. Тогда влиянием его ЭДС на изменения тока можно пренебречь, особенно в начальной фазе переходных процессов. Объясняется это сравнительно большой по сравнению с T_a инерционностью T_l канала формирования ЭДС двигателя, в связи с чем, изменения тока в динамике слабо связаны с изменениями ЭДС (скорости) и определяются, в основном, характером изменений выходного напряжения преобразователя и величиной T_a .

Если двигатель - колебательное звено, то пренебрежение его ЭДС вносит в расчеты настройки заметную погрешность. Однако названное упрощение оправдано. Погрешность устраняют при наладке исполнительной системы.

Объектом контура, наиболее влияющим на формирование тока, является, как правило, звено ДПТ $W_{\dot{y}\ddot{e}\dot{i}} = \frac{1/R_a}{T_a s + 1}$, так что компенсации при настройке подлежит наибольшая постоянная контура T_a .

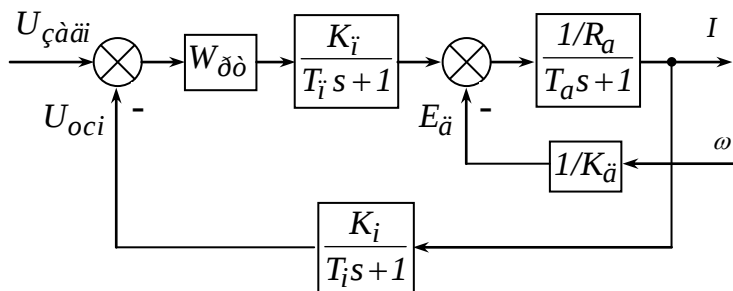


Рис. 6.1. Контур тока

Другие звенья неизменяемой части контура, чаще всего апериодические, описывающие преобразователь и цепь обратной связи. Они являются обычно звеньями с малыми, не подлежащими компенсации постоянными $T_{\dot{i}}$ и T_i . Их можно рассматривать как одно звено с постоянной

$$T_{\mu i} = 0,5 \cdot \left(T_{\dot{i}} + T_i + \sqrt{(T_{\dot{i}} + T_i)^2 + T_i^2} \right) \approx T_{\dot{i}} + T_i. \quad (6.1)$$

Если $T_a \geq 2T_{\mu i}$, то этот прием не приводит к заметной погрешности.

Требования к контуру тока позиционных и контурных ИС сводятся к достижению максимально возможного быстродействия при практическом отсутствии перерегулирования, а также минимума статической погрешности регулирования тока. Первое обеспечивает эффективное ограничение тока в пусковых режимах и при перегрузках на требуемом уровне без динамических выбросов, повышает устойчивость и динамические свойства контура регулирования скорости, которому под-

чинен контур тока. Второе позволяет максимально использовать двигатель по мощности (току) во всем диапазоне регулирования скорости.

Указанные требования в контуре рассмотренной выше структуры реализуются настройкой на модульный оптимум.

6.2. Контур скорости

В контур скорости входят звенья, описывающие электромеханическую часть системы с учетом свойств манипуляционного механизма, оптимизированный контур тока и цепь обратной связи по скорости с фильтром для сглаживания помех.

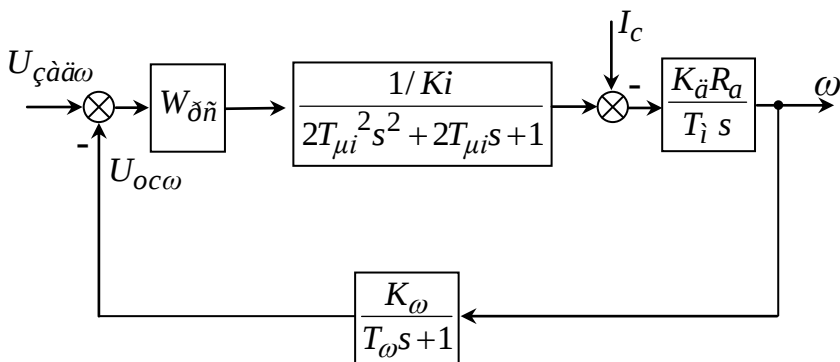


Рис. 6.2. Контур скорости

Элементом с большой постоянной времени является интегрирующее звено $W_i = \frac{K_{\ddot{a}} R_a}{T_i s}$. Два других звена в контуре имеют малые по сравнению с T_i постоянные, которые с учетом их природы компенсации не подлежат.

Контур отличается от стандартного, так как одно из звеньев с некомпенсируемой постоянной времени (контур тока с МО) является колебательным. Для упрощения расчетов его аппроксимируют апериодическим звеном первого порядка

$$W_{\hat{e}\hat{o}}^{i\hat{i}} = \frac{1/K_i}{2T_{\mu i}^2 s^2 + 2T_{\mu i} s + 1} \Rightarrow W_{\hat{e}\hat{o}} = \frac{1/K_i}{2T_{\mu i} s + 1}.$$

Малая некомпенсируемая постоянная времени контура скорости определяется в соответствии с выражением

$$T_{\mu\omega} = 0,5 \left(T_{\omega} + 2T_{\mu} + \sqrt{(T_{\omega} + 2T_{\mu})^2 + T_{\omega}^2} \right) \approx T_{\omega} + 2T_{\mu}. \quad (6.2)$$

Если $T_i \geq 2T_{\mu\omega}$, то этот прием не приводит к заметной погрешности.

В ИС с управлением по скорости рассматриваемый контур является основным, внешним. При позиционном управлении главное требование к нему - минимум длительности переходного процесса пуска / торможения ИС при практическом отсутствии перерегулирования.

При контурном же управлении требуется высокоточное воспроизведение задающего воздействия в квазистатическом режиме, в том числе при наличии интенсивных возмущений.

При позиционном управлении высокой статической точности обычно не требуется. При контурном - допустимы перерегулирование и некоторая колебательность. В обоих случаях необходима высокая скорость формирования регулируемой величины.

Настройку позиционных ИС, учитывая сказанное, выполняют на МО. В контурных ИС с высокими требованиями к точности поддержания скорости при большом диапазоне регулирования контур скорости выполняют двукратно-интегрирующим, настраивая его на симметричный оптимум (СО).

6.3. Выбор структуры, расчет параметров и аппаратная реализация регуляторов ИС

При оптимизации контура регулирования по быстродействию, т.е. настройке на модульный оптимум, необходимо

определить структуру регулятора, которая зависит от передаточной функции объекта контура с большой, подлежащей компенсации, постоянной времени (табл. 6.1).

Таблица 6.1

ОБЪЕКТ	РЕГУЛЯТОР		
	Тип	Постоянная времени	Коэффициент передачи
$\frac{K_{i\dot{a}}}{\dot{O}_{i\dot{a}} s}$	П	—	$\beta = \frac{T_{i\dot{a}}}{2\dot{O}_{\mu} K_{i\dot{a}} K_{\mu} K_{i\ddot{n}}}$
$\frac{K_{i\dot{a}}}{\dot{O}_{i\dot{a}} s + 1}$	ПИ	$\tau = \dot{O}_{i\dot{a}}$	$\beta = \frac{T_{i\dot{a}}}{2\dot{O}_{\mu} K_{i\dot{a}} K_{\mu} K_{i\ddot{n}}}$

Передаточная функция контура настроенного на модульный оптимум принимает вид

$$W_{ii} = \frac{1/K_{oc}}{2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu} s + 1}, \quad (6.3)$$

где K_{oc} - коэффициент передачи цепи обратной связи;

T_{μ} - малая некомпенсируемая постоянная времени контура регулирования.

Статические свойства контура, настроенного на модульный оптимум, обеспечивают астатизм I порядка по управлению и, в некоторых случаях, астатизм I порядка по возмущению.

Оптимизации частотных и статических свойств можно добиться настройкой контура на симметричный оптимум. При такой настройке минимизируем время первого согласования в динамическом режиме работы при достаточной устойчивости контура ($\sigma \approx 43\%$). В статическом режиме работы эта настройка обеспечивает II порядок астатизма по управлению и не менее I порядка по возмущению.

Передаточная функция контура, настроенного на симметричный оптимум имеет вид

$$W_{c\hat{i}} = \frac{(4T_{\mu}s + 1)K_{oc}}{8T_{\mu}^3s^3 + 8T_{\mu}^2s^2 + 4T_{\mu}s + 1}, \quad (6.4)$$

где K_{oc} - коэффициент передачи цепи обратной связи;

T_{μ} - малая некомпенсируемая постоянная времени контура регулирования.

В контуре скорости реализовать такую настройку можно при помощи ПИ-регулятора с параметрами:

$$\beta = \frac{T_{\hat{i}}}{2\dot{O}_{\mu} K_{\hat{i}} K_{\mu} K_{\hat{n}}}, \quad \tau = 4T_{\mu\omega}, \quad (6.5)$$

где $T_{\mu\omega}$ - малая некомпенсируемая постоянная времени контура скорости.

Рассматриваемые в проекте регуляторы аппаратно можно реализовать на базе операционных усилителей. В табл. 6.2 показаны передаточные функции и схемные решения некоторых регуляторов, применяемых в ИС.

В современных ИС роботов комплекс управляющих устройств построен на базе промышленных микроконтроллеров, которые имеют в своей структуре счетчики-таймеры, позволяющие реализовать ШИМ для управления силовыми транзисторными ключами преобразовательных устройств ИС. Кроме этого микроконтроллеры имеют несколько аналоговых входов с встроенными АЦП, позволяющими преобразовать аналоговый сигнал цепей обратных связей ИС в цифровой код.

В системе подчиненного регулирования ИС внутренний контур тока обладает наименьшей инерционностью формирования регулируемой величины. Поэтому период формирования управляющих воздействий ИС для координаты тока не должен превышать 20 мс, иначе возможна потеря качества управления. Значительные затраты времени на формирование сигнала управления ранее наблюдались именно в устройствах преобразования аналоговых сигналов цепей ОС в цифровой код.

Таблица 6.2

Тип	Передаточная ф-ция	Аппаратная реализация
II	$W_i = \beta$ $\beta = \frac{R_{oc}}{R_{\hat{a}\hat{o}}}$	
И	$W_{\hat{E}} = \frac{\beta}{\tau s}$ $\beta = \frac{R_{oc}}{R_{\hat{a}\hat{o}}}, \tau = R_{\hat{a}\hat{o}} C_{oc}$	
III	$W_{\hat{I}\hat{E}} = \frac{\beta(\tau s + 1)}{\tau s}$ $\beta = \frac{R_{oc}}{R_{\hat{a}\hat{o}}}, \tau = R_{oc} C_{oc}$	

Однако в современных микроконтроллерах (например, фирмы ATMEL) при тактовой частоте 16 МГц операция преобразования аналогового сигнала составляет порядка 15 мкс, что позволяет реализовать управление достаточного качества.

Координаты скорости и положения звеньев формируются на выходе ИС значительно медленнее, чем координата тока, и с реализацией их микропроцессорного управления обычно не возникает проблем.

Задачи фильтрации сигналов цепей обратных связей можно решать аппаратно, программно или комбинированно.

6.4. Ограничение тока и скорости

Необходимость ограничения в ИС тока, а следовательно, и момента ДПТ связана со следующим.

Во всех режимах ток (момент) не должен превышать величины, допустимой для двигателя, а также величины, при которой ускорение ИС больше предельно допустимого. В то же время, если ток, обеспечивающий требуемое ускорение в наиболее нагруженном состоянии, оказывается меньше отмеченных выше значений, целесообразно ограничить его на этом минимально допустимом уровне, что снизит динамические нагрузки ИС, увеличит ее ресурс, уменьшит нагрев двигателя.

Как известно, в системах подчиненного регулирования успешно используется так называемое последовательное ограничение регулируемых координат. Оно сводится к ограничению сигнала задания по соответствующей координате. Таковым для тока является выходной сигнал регулятора скорости (РС). Он имеет естественное ограничение, уровень которого, обычно 10 - 15 В, определяется типом используемого в РС операционного усилителя. Как правило, необходим меньший уровень, особенно если двигатель имеет запас по моменту, а проектирование датчика тока велось на максимально допусти-

мый ток двигателя и/или на выходное напряжение менее уровня естественного ограничения РС.

Определение требуемого уровня ограничения тока (момента) базируется на подходах и соображениях, изложенных в разд. 4. Пересчет тока в сигнал задания выполняется с учетом астатизма контура тока по управлению. Для ограничения выходного сигнала РС обычно используется нелинейное сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя. Проектировщику необходимо разработать соответствующую схему и определить параметры ее элементов.

В случае цифрового микропроцессорного управления сигнал задания контура тока ограничивается программно.

Необходимость ограничения скорости, возникающая при использовании двигателя с запасом по скорости, при увеличении перемещения позиционных ИС против типового, базируется на соображениях, таких же, как при ограничениях тока. В результате расчетов формулируются требования к ограничению сигнала задания скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проверки соответствия спроектированной системы техническому заданию необходимо выполнить анализ влияния полезного груза и геометрии манипуляционного механизма на свойства настроенного контура скорости. При этом важно выявить возможные способы стабилизации этих свойств.

Кроме этого в задачи исследования входит определение фактически полученных показателей качества системы, таких как статическая точность по управлению и возмущению, пере-регулирование и время переходного процесса, динамический выброс тока при стопорении, диапазон регулирования скорости. При этом важно выявить влияние на показатели качества меняющихся с изменением геометрии и загрузки манипулятора параметров исполнительной системы.

Анализ ИС проводится на математической модели в среде MATLAB. В качестве возмущающего воздействия контура скорости необходимо использовать выходной сигнал динамической модели манипуляционного механизма. Сигналы напряжения задания ИС следует формировать пропорциональными сигналам изменения скорости в типовом цикле работы манипуляционного механизма.

Для получения результатов моделирования сопоставимых с физической моделью необходимо в прямую цепь математической модели ИС поставить нелинейные элементы типа «насыщение», которые позволят ограничить выходные сигналы регуляторов и ШИП максимально допустимыми значениями.

Методика анализа, разработанной в ходе курсового проектирования ИС, обсуждается с руководителем на консультациях.

На защиту курсового проекта предоставляется пояснительная записка, лист формата A1 графической части, содержащий: техническое задание, рассчитанные параметры уст-

ройств ИС, структурную схему привода и динамическую модель манипуляционного механизма, а так же графики статических и динамических характеристик системы, полученные в результате моделирования. Для подтверждения адекватности результатов на защите необходимо продемонстрировать математическую модель в среде MATLAB.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СТЕПЕНИ ПОДВИЖНОСТИ МАНИПУЛЯТОРА СТАНОЧНОГО РОБОТА НЦТМ-01

Промышленный робот «Электроника НЦТМ-01» является адаптивным роботом второго поколения, управляемым от микроЭВМ. Он предназначен для загрузки токарных станков с числовым программным управлением и образует в совокупности со станком гибкий производственный модуль, используемый в гибких автоматизированных цехах и участках. Манипулятор робота оснащен электромеханическими приводами.

Расчетная схема манипулятора показана на рис. П1.1.

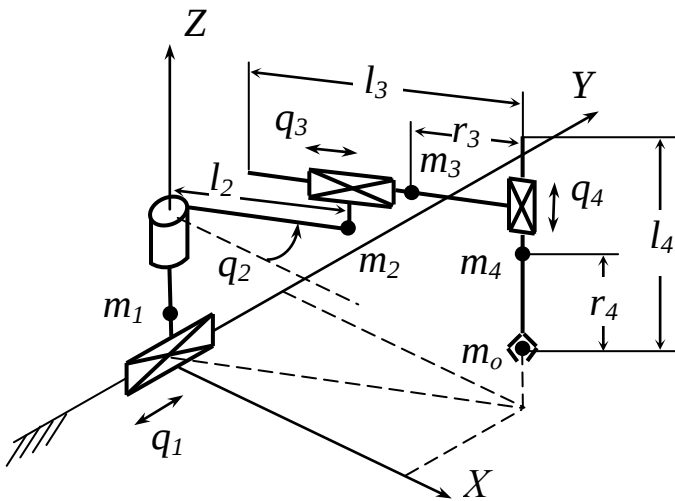


Рис. П1.1. Манипулятор НЦТМ-01

Необходимо спроектировать позиционную с большим типовым перемещением ИС горизонтальной поступательной степени подвижности (координата q_3) манипулятора. Составим динамическую модель этой координаты манипулятора.

Для составления функции Лагранжа необходимо определить кинетическую и потенциальную энергии манипуляционного механизма.

Кинетическая энергия механизма состоит из кинетических энергии подвижных частей звеньев манипулятора и кинетической энергии объекта в захватном устройстве.

Первое звено манипулятора движется поступательно в горизонтальной плоскости

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 \dot{q}_1^2, \quad (\text{П1.1})$$

где m_1 - масса подвижных частей первого звена, движущихся поступательно со скоростью $\dot{q}_1$.

Второе звено имеет вращательное движение, поэтому кинетическая энергия этого звена имеет две составляющие

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{q}_2^2, \quad (\text{П1.2})$$

где m_2 - масса элементов второго звена, сосредоточенная в точке; v_2 - мгновенная скорость движения центра масс звена; J_2 - момент инерции второго звена при вращении относительно центра масс со скоростью $\dot{q}_2$.

Квадрат мгновенной скорости движения центра масс можно вычислить по формуле

$$v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2, \quad (\text{П1.3})$$

где $\dot{x}_2$ и $\dot{y}_2$ - производные положения центра масс в базовой системе координат манипулятора. Положение центра масс выразим через обобщенные координаты манипулятора

$$x_2 = l_2 \cos q_2, \quad y_2 = l_2 \sin q_2 + q_1. \quad (\text{П1.4})$$

Тогда производные положения центра масс принимают вид

$$\dot{x}_2 = -l_2 \dot{q}_2 \sin q_2, \quad \dot{y}_2 = l_2 \dot{q}_2 \cos q_2 + \dot{q}_1. \quad (\text{П1.5})$$

Возведем выражения (П1.5) в квадрат и подставим в (П1.3)

$$v_2^2 = l_2^2 \dot{q}_2^2 + \dot{q}_1^2 + 2l_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \cos q_2. \quad (\text{П1.6})$$

Таким образом, можно записать выражение для вычисления кинетической энергии второго звена манипулятора

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 (l_2^2 \dot{q}_2^2 + \dot{q}_1^2 + 2l_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \cos q_2) + \frac{1}{2} J_2 \dot{q}_2^2. \quad (\text{П1.7})$$

Для третьего звена манипулятора, участвующего в плоскопараллельном движении, кинетическая энергия определяется выражением

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 v_3^2 + \frac{1}{2} J_3 \dot{q}_2^2. \quad (\text{П1.8})$$

Пользуясь аналогичным приемом и выполнив соответствующие преобразования, как для второго звена, получим квадрат мгновенной скорости движения центра масс

$$v_3^2 = \dot{q}_3^2 + (l_2 + q_3 - r_3) \dot{q}_2^2 + \dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 (\dot{q}_3 \sin q_2 + \dot{q}_2 (l_2 + q_3 - r_3) \cos q_2). \quad (\text{П1.9})$$

Подставляя (П1.9) в (П1.8) получим кинетическую энергию третьего звена

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 [\dot{q}_3^2 + (l_2 + q_3 - r_3) \dot{q}_2^2 + \dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 (\dot{q}_3 \sin q_2 + \dot{q}_2 (l_2 + q_3 - r_3) \cos q_2)] + \frac{1}{2} J_3 \dot{q}_2^2. \quad (\text{П1.10})$$

Аналогично, с учетом изменения координаты Z, составим выражения для кинетической энергии четвертого звена и объекта манипулирования в захватном устройстве

$$K_4 = \frac{1}{2} m_4 [\dot{q}_1^2 + \dot{q}_3^2 + \dot{q}_4^2 + (l_2 + q_3) \dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 (\dot{q}_3 \sin q_2 + \dot{q}_2 (l_2 + q_3) \cos q_2)] + \frac{1}{2} J_4 \dot{q}_2^2, \quad (\text{П1.11})$$

$$K_o = \frac{1}{2} m_o [\dot{q}_1^2 + \dot{q}_3^2 + \dot{q}_4^2 + (l_2 + q_3) \dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 (\dot{q}_3 \sin q_2 + \dot{q}_2 (l_2 + q_3) \cos q_2)] \quad (\text{П1.12})$$

Потенциальная энергия манипуляционного механизма может быть вычислена по формуле

$$\dot{I} = g[m_4 r_4 + q_4(m_4 + m_o)], \quad (\text{П1.13})$$

где g - ускорение свободного падения.

Уравнение Лагранжа II рода содержит частные производные по обобщенным координатам и их производным функции Лагранжа. Запишем эти производные для проектируемой координаты манипулятора.

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_3} = \dot{q}_2^2 [(l_2 + q_3)(m_3 + m_4 + m_o) - m_3 r_3] + \dot{q}_1 \dot{q}_2 (m_3 + m_4 + m_o) \cos q_2, \quad (\text{П1.14})$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_3} \right) = \ddot{q}_1 (m_3 + m_4 + m_o) \sin q_2 + \ddot{q}_3 (m_3 + m_4 + m_o) + \dot{q}_1 \dot{q}_2 (m_3 + m_4 + m_o) \cos q_2, \quad (\text{П1.15})$$

$$\frac{\partial \dot{I}}{\partial \dot{q}_3} = 0. \quad (\text{П1.16})$$

Таким образом, обобщенная сила проектируемой координаты определяется выражением

$$F_3 = a_{31} \ddot{q}_1 + a_{33} \ddot{q}_3 - R_3(q_3, \dot{q}_2), \quad (\text{П1.17})$$

где $a_{31} = (m_3 + m_4 + m_o) \sin q_2$ и $a_{33} = (m_3 + m_4 + m_o)$ - компоненты симметричной матрицы инерционных характеристик; $R_3(q_3, \dot{q}_2) = \dot{q}_2^2 [(l_2 + q_3)(m_3 + m_4 + m_o) - m_3 r_3]$ - составляющая, обусловленная центробежной силой.

В выражении (П1.17) первое слагаемое характеризует влияние ускорения первой координаты в зависимости от углового положения руки манипулятора (второй координаты) на проектируемую степень подвижности. Второе слагаемое в чистом виде определяет динамическое усилие разгона или торможения проектируемой ИС, когда остальные звенья неподвижны.

Максимальное значение обобщенной силы F_3 возможно в случае:

– второе звено манипулятора совершает вращательное движение на максимальной скорости $\dot{q}_2$ проходя угловое положение $q_2 = 90^\circ$;

– в этот момент времени обе координаты q_1 и q_3 из крайнего максимального значения начинают движение в сторону начала координат с максимальными ускорениями $\ddot{q}_1$ и $\ddot{q}_3$ соответственно (см. рис. П1.1).

Из приведенного выше описания, очевидно, что центробежная сила, обусловленная движением второго звена, как и сила инерции, вызванная ускорением первого звена, противодействуют разгону третьего.

В целом при выполнении энергетических расчетов не обязательно моделировать реальные ситуации, которые могут возникнуть в процессе работы манипулятора, а можно просто сложить максимальные значения модулей слагаемых, входящих в выражение обобщенной силы проектируемой ИС. Главное при выборе двигателя – обеспечить требуемый запас мощности исполнительного двигателя необходимый для работы робота в любой, даже самой невероятной, ситуации. Однако следует помнить, что любое увеличение мощности исполнительного двигателя – увеличение его массогабаритных показателей, что крайне нежелательно.

Итак, перечислим значения параметров манипуляционной системы и параметров закона движения, необходимых для проектирования ИС: $m_0 = 5$ кг; $m_4 = 10$ кг; $m_3 = 12$ кг; $\Delta q_3 \in [0.3; 0.6]$ м; $t_{q3} = 1$ с; $T_{\ddot{o}} = 3$ с; $\ddot{q}_{1max} = \ddot{q}_{3max} = 1.5$ м/с²; $\dot{q}_{1max} = \dot{q}_{2max} = 0.5$ м/с; $l_2 = 0.2$ м; $r_3 = 0.5$ м. Подставим необходимые значения в (П1.17) и вычислим максимальное значение усилия F_{3max} , развиваемое ИС третьей степени подвижности

$$F_{3\max} = (m_3 + m_4 + m_o) \cdot \sin q_2 \cdot \ddot{q}_1 + (m_3 + m_4 + m_o) \cdot \ddot{q}_3 - \\ - \dot{q}_2^2 [(l_2 + q_3) \cdot (m_3 + m_4 + m_o) - m_3 \cdot r_3] = \\ = (12 + 10 + 5) \cdot 1.5 + (12 + 10 + 5) \cdot 1.5 + \\ + 0.5 [(0.2 + 0.3) \cdot (12 + 10 + 5) - 12 \cdot 0.5] \approx 85 \text{ (H)}$$

Для дальнейших расчетов следует определить параметры закона движения ИС, обеспечивающие заданное перемещение 0.3 метра за 1 с. Большое типовое перемещение можно отработать, минимизируя требуемую динамическую мощность двигателя, как показано в п.4.2.2

$$v_i = 1.5 \cdot q / t_q = 1.5 \cdot 0.3 / 1 = 0.45 \text{ (м/с)},$$

$$a_i = 4.5 \cdot q / t_q^2 = 4.5 \cdot 0.3 / 1 = 1.35 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Преобразование поступательного движения звена манипулятора во вращательное движение ротора двигателя обеспечивается винтовой передачей, для которой справедливы соотношения

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot q}{p \cdot k}, \quad \omega_i = \frac{2\pi \cdot v_i}{p \cdot k}, \quad \varepsilon_i = \frac{2\pi \cdot a_i}{p \cdot k}, \quad (\text{П1.18})$$

где p - шаг резьбы, k - число заходов винта.

В соответствии с формулой (4.5) радиус приведения винтовой передачи определяется выражением

$$\rho = \frac{p \cdot k}{2\pi}. \quad (\text{П1.19})$$

Учитывая значения $p = 0.01$ м и $k = 2$, по формуле (П1.18) вычислим параметры вращательного движения винта

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot q}{p \cdot k} = \frac{2\pi \cdot 0.3}{0.01 \cdot 2} = 94.25 \text{ (рад)}, \\ \omega_i = \frac{2\pi \cdot v_i}{p \cdot k} = \frac{2\pi \cdot 0.45}{0.01 \cdot 2} = 141.3 \text{ (рад/с)}, \\ \varepsilon_i = \frac{2\pi \cdot a_i}{p \cdot k} = \frac{2\pi \cdot 1.35}{0.01 \cdot 2} = 424 \text{ (рад/с}^2\text{)}.$$

Радиус приведения винтовой пары по формуле (П1.19) составляет

$$\rho = \frac{p \cdot k}{2\pi} = \frac{0.01 \cdot 2}{2\pi} = 0.00318 \text{ (м)}.$$

Оценить мощность исполнительного двигателя, достаточную для отработки программного перемещения с заданной скоростью и ускорением, можно по формуле (4.1). В рассматриваемом случае поступательной степени подвижности, работающей в горизонтальной плоскости, двигатель не нагружен статическим моментом, обусловленным работой сил тяжести. А значит, мощность двигателя определяется максимальным значением динамического момента манипуляционного механизма и динамическим моментом ротора двигателя

$$N_{\ddot{a} \max} = \left(M_{3 \max} + J_{\ddot{a}}^* \cdot \varepsilon_I \right) \cdot \omega_I, \quad (\text{П1.20})$$

где $M_{3 \max}$ - максимальный момент в винтовой паре, обеспечивающий усилие поступательного звена $F_{3 \max}$. Как показано в п. 4.2.2, момент инерции ротора двигателя, приведенный к выходному валу (винту), при большом типовом перемещении позиционной ИС принимают в 2 – 9 раз меньше, чем момент инерции манипуляционного механизма.

С учетом радиуса приведения винтовой пары, инерционную характеристику манипуляционного механизма определяют компонента симметричной матрицы $a_{33} = (m_3 + m_4 + m_o)$ и $a_{31} = (m_3 + m_4 + m_o) \sin q_2$

$$J_I = (a_{33} + a_{31}) \cdot \rho^2. \quad (\text{П1.21})$$

$$J_I = 2 \cdot (m_3 + m_4 + m_o) \cdot \rho^2 = 54 \cdot 0.00318^2 = 0.0005454 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Тогда приведенный момент инерции ротора двигателя

$$J_{\ddot{a}}^* \approx 0.0001 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Максимальный момент винтовой пары рассчитаем по формуле

$$M_{3 \max} = F_{3 \max} \cdot \rho. \quad (\text{П1.22})$$

$$M_{3 \max} = 85 \cdot 0.00318 \approx 0.27 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

По формуле (П1.20) ориентировочно максимальное значение мощности исполнительного двигателя составляет

$$N_{\ddot{a} \max} = (0.27 + 0.0001 \cdot 424) \cdot 141.3 \approx 45 (\text{Вт}).$$

С учетом перегрузочной способности двигателя по моменту λ_i (не менее 3) диапазон мощностей, которому принадлежит требуемый двигатель, определяет неравенство

$$N_{\ddot{a} \max} > N_{\ddot{a} \hat{m}} > N_{\ddot{a} \min},$$

$$45 > N_{\ddot{a} \hat{m}} > 15.$$

Технические характеристики двигателей из заданного диапазона мощностей, приведенные в приложении 2, показаны в табл. П1.1.

Таблица П1.1

Тип двигателя	$N_{\ddot{a}}$, Вт	$\omega_{\ddot{a} \hat{m}}$, рад/с	$J_{\ddot{a}}$, кг·м ² ×10 ⁻⁶	$I_{\ddot{a} \hat{m}}$, А	λ_i
ДПР-72 Н1-02	18.8	472	7.8	1.0	4
ДПГ -122-02	16.0	628	8.0	1.2	4
ДП-35	25	314	8.5	1.9	3.6
ДПР-72 Н1-01	25.1	628	7.8	1.35	4
РІ6.02	23	419	30	2.8	6
РІ6.04	45	419	51	5.2	6.3
МИГ-40ДТ	40	628	2.9	2.73	5
ДПМ-0,25	37	157	20	1.0	7
ДП-40	40	314	19	2.9	4.5

Для предварительного выбора исполнительного двигателя воспользуемся критериями приемистости и энергоемкости, определяемые выражениями (4.6).

Приемистость нагрузки исполнительного привода можно вычислить по формуле (4.17)

$$4\ddot{I}_i = 4 \frac{\varepsilon_i}{\eta^2} (\dot{I}_{\hat{n}} + J \cdot \varepsilon_i) = 4 \frac{424}{0.8^2} \cdot 0.0005454 \cdot 424 = 612 \left(\frac{H\hat{i}}{\hat{n}^2} \right).$$

Энергоемкость нагрузки исполнительного привода пропорциональна его кинетической энергии:

$$\dot{Y}_i = J \cdot \omega^2 = 0.0005454 \cdot 141.3^2 = 10.84 (\ddot{A} \epsilon).$$

В табл. П1.2 приведем значения приемистости и энергоемкости двигателей из табл. П1.1.

Таблица П1.2

Тип двигателя	$N_{\ddot{a}}, \text{Вт}$	$M_{\ddot{a}i}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$M_{\ddot{a}\max}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\ddot{i}_{\ddot{a}}, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{н}^2}$	$\dot{Y}_{\ddot{a}}, \ddot{A} \epsilon$	
ДПР-72 Н1-02	18.8	0.0398	0.1593	3253	1.74	-
ДПГ -122-02	16.0	0.0255	0.1619	1298	3.16	-
ДП-35	25	0.0796	0.2861	9623	0.84	-
ДПР-72 Н1-01	25.1	0.0399	0.1600	3282	3.08	-
РІ6.02	23	0.0549	0.3289	3608	5.27	?
РІ6.04	45	0.1074	0.6769	8986	8.95	+
МИГ-40ДТ	40	0.0637	0.3179	34870	1.14	?
ДПМ-0,25	37	0.2357	1.65	136125	0.49	?
ДП-40	40	0.1274	0.5732	17293	1.87	?

Анализ параметров двигателей из табл. П1.2 показывает, что двигатель РІ6.04, обладающий 15-тикратным запасом по приемистости, с большой долей уверенности сможет компенсировать небольшой недостаток энергоемкости.

Двигатель РІ6.02 имеет недостаточную энергоемкость, но недогруженность по моменту, т.е. 5-тикратный запас по приемистости, возможно позволит ему реализовать требуемые параметры программного движения звена манипулятора. Последние три двигателя из табл. П1.2, а именно МИГ-40ДТ, ДПМ-0,25 и ДП-40 имеют малую энергоемкость, однако ее недостаток возможно может быть компенсирован значительными запасами приемистости.

Для дальнейшего анализа применения перечисленных двигателей в ИС необходимо выполнить их проверку по параметрам движения и на нагрев в цикле работы ПР. Предпочтительным из перечисленных двигателей является двигатель РІ6.02 имеющий наименьшую установочную мощность. Дви-

гатель ДПМ-0,25 интересен тем, что за счет малой номинальной скорости, его можно использовать без редуктора, т.е. непосредственно приводить в движение винтовую пару.

Энергетический расчет двигателя начинается с выбора передаточного числа редуктора, обеспечивающего согласование параметров движения двигателя со звеном манипулятора. При большом типовом перемещении позиционной ИС, оптимальное передаточное число редуктора определяется выражением (4.16), в которое в качестве q следует подставить значением изменения углового положения винта φ .

Далее следует выполнить проверку двигателей по параметрам движения, как это показано в п.4.5.4.

При выполнении условий согласования по формуле (4.3) следует рассчитать требуемое значение пускового момента и значение приведенного к валу двигателя момента статической нагрузки ИС. На основе полученных значений необходимо выполнить расчет среднеквадратичного момента в цикле работы ПР (4.19) и сравнить его с номинальным моментом двигателей. Приведем расчетные значения перечисленных величин рассматриваемых двигателей в табл. П1.3.

Таблица П1.3

Тип двигателя	$M_{\dot{a}i}$, Н·м	$i_{\dot{n}0} \quad t$	$\omega_{\dot{a} \, \dot{\delta} \dot{a} \dot{a}}$, рад/с	$\varepsilon_{\dot{a} \, \dot{\delta} \dot{a} \dot{a}}$, рад/с ²	$\dot{I}_1$, Н·м	$\dot{I}_{\dot{n} \dot{e} \dot{a}}$, Н·м	
PI6.02	0.0549	1.97	278	515	0.1721	0.0808	-
PI6.04	0.1074	1.55	219	1304	0.22	0.1032	+
МИГ-40ДТ	0.0637	2.61	369	1179	0.1139	0.0535	+
ДПМ-0,25	0.2357	-	141.3	2766	0.2528	0.1186	+
ДП-40	0.1274	1.35	191	1079	0.2249	0.1055	+

Анализ полученных значений показывает, что расчетное значение передаточного числа редуктора (двигатель ДПМ-0,25 применяется без редуктора), обеспечивает номинальную скорость звена манипулятора на скорости каждого из двигателей меньше номинальной $\omega_{\dot{a} \, \dot{\delta} \dot{a} \dot{a}} < \omega_{\dot{a} i \dot{n}}$.

Ускорение звена манипулятора, развиваемое каждым из двигателей при пуске с максимальным моментом, превышает требуемое значение ускорения $\varepsilon_i = 424 \text{ рад/с}^2$.

Проверку на нагрев не прошел только лишь двигатель РІ6.02, поскольку его среднеквадратичный момент в типовом цикле работы манипулятора превышает значение номинального момента. Остальные двигатели могут быть использованы в проектируемой ИС, поэтому для того, чтобы выбрать один из них рассмотрим их КПД, а также конструктивные особенности.

КПД двигателя можно определить в соответствии с выражением

$$\eta_{\ddot{a}\hat{a}} = \frac{N_{\ddot{a}\hat{a}}}{U_{\ddot{a}\hat{a}} \cdot I_{\ddot{a}\hat{a}}} \cdot 100\% = \frac{\dot{I}_{\ddot{a}\hat{a}} \cdot \omega_{\ddot{a}\hat{a}}}{U_{\ddot{a}\hat{a}} \cdot I_{\ddot{a}\hat{a}}} \cdot 100\%. \quad (\text{П1.23})$$

Приведем важнейшие параметры двигателей в табл.П1.4.

Таблица П1.4

Тип двигателя	$N_{\ddot{a}}, \text{ Вт}$	$M_{\ddot{a}\max}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$\eta_{\ddot{a}\hat{a}}, \%$	$U_{\ddot{a}\hat{a}}, \text{ В}$	$I_{\ddot{a}\hat{a}}, \text{ А}$	встроенный ТГ
РІ6.04	45	0.6769	36	24	5.2	+
МИГ-40ДТ	40	0.3179	54	27	2.73	-
ДПМ-0,25	37	1.65	61	60	1	+
ДП-40	40	0.5732	57	24	2.9	-

Анализ данных из табл. П1.4 показывает, что наименьшая установочная мощность в сочетании с наибольшими КПД и пусковым моментом, а также безредукторное соединение двигателя с винтовой парой степени подвижности манипулятора выделяет двигатель ДПМ-0,25, как наиболее перспективный.

Неизменяемая часть проектируемой ИС, кроме исполнительного двигателя, включает в себя преобразователь, а также цепи ОС.

В соответствии с рекомендациями п. 5.1. по формулам (5.5) и (5.6) можно определить параметры передаточной

функции, описывающей динамические свойства ШИП. В табл. П1.5 сведены значения параметров преобразователя.

Таблица П1.5

Параметр ШИП	Значение
1. Номинальное напряжение $U_{i\dot{i}}$, В	72
2. Номинальный ток $I_{i\dot{i}}$, А	1.07
3. Частота пульсаций $f_{i\dot{i}}$, кГц	5
4. Выходное сопротивление $R_{i\dot{i}}$, Ом	0.336
5. Коэффициент передачи $\hat{E}_{i\dot{i}}$	7.236
6. Постоянная времени $\hat{O}_{i\dot{i}} = \hat{O}_{\dot{o}}$, мс	0.2

Параметры цепи ОС по току можно определить в соответствии с рекомендациями п. 5.2. Расчетные значения параметров этой цепи приведены в табл. П1.6.

Таблица П1.6

Параметр цепи ОС по току	Значение
1. Номинальный ток шунта $I_{\ddot{a}\ddot{o}}$, А	1.5
2. Сопротивление шунта $R_{\ddot{o}}$, Ом	0.05
3. Коэффициент передачи $\hat{E}_i$	9.32
4. Постоянная времени $\hat{O}_i$, мс	0.3

Параметры цепи ОС по скорости можно определить в соответствии с рекомендациями п. 5.3. Расчетные значения параметров этой цепи приведены в табл. П1.7.

Таблица П1.7

Параметр цепи ОС по скорости	Значение
1. Коэффициент передачи $\hat{E}_{\omega}$	0.062
2. Постоянная времени $\hat{O}_{\omega}$, мс	3

Параметры двигателя рассчитаны в соответствии с рекомендациями п. 5.2 и показаны в табл. П1.8.

Таблица П1.8

Параметр якорной цепи и ДПТ	Значение
1. Полное сопротивление якорной цепи R_a , Ом	12.56
2. Индуктивность якорной цепи L_a , мГн	19.3
3. Коэффициент передачи ДПТ $K_{\dot{a}}$, рад/В·с	3.24
4. Постоянная времени $\dot{O}_a$, мс	1.5
5. Постоянная времени $\dot{O}_i$, мс	23

Таким образом, структурная схема неизменяемой части ИС, составленная в среде MATLAB, представлена на рис. П1.2.

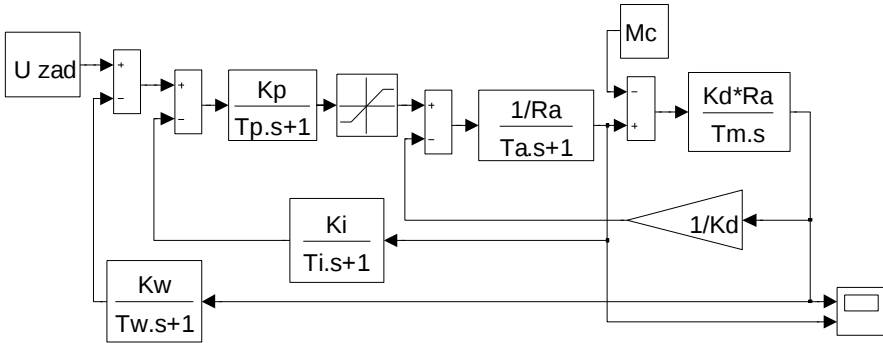


Рис. П1.2. Структурная схема неизменяемой части ИС

На выходе преобразователя в модели необходимо поставить нелинейный элемент, обеспечивающий ограничение питания двигателя номинальным напряжением ШИП $U_{\text{шп}}$.

На рис. П1.3 показаны изменения регулируемой координаты скорости полученной замкнутой системы. График 1 представляет собой переходной процесс, как реакцию на ступенчатое входное воздействие 10 В. График 2 это результат отработки данной системой трапецидального входного воздействия. На рис. П1.4 показаны изменения регулируемой координаты тока, графики 1 и 2 соответственно. В проведенном эксперименте возмущающее воздействие $M_c = 0$, т.е. данная замкнутая система работала на холостом ходу.

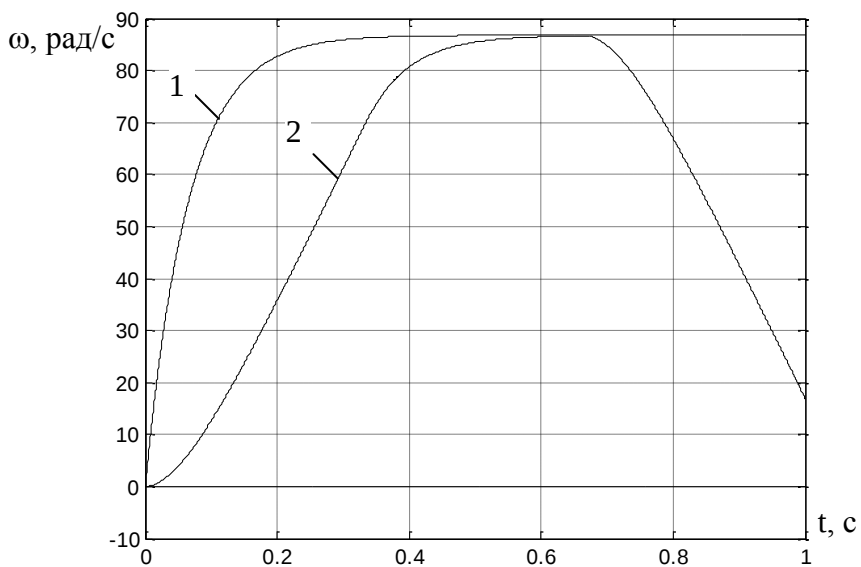


Рис. П1.3. Графики изменения скорости ДПТ на холостом ходу замкнутой системы

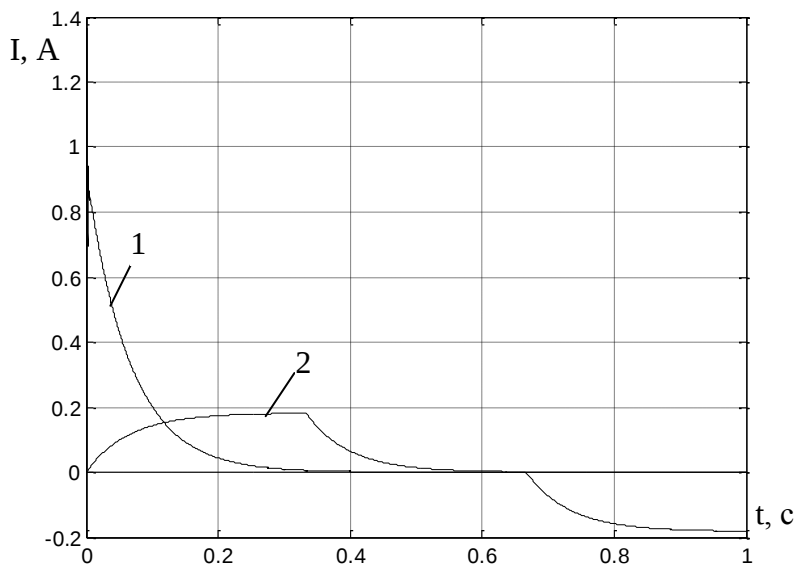


Рис. П1.4. Графики изменения тока ДПТ на холостом ходу замкнутой системы

Анализ полученных зависимостей показывает:

- значительное время переходного процесса не позволяет точно обрабатывать трапецеидальное входное воздействие, т.е. в момент времени 1 секунда система еще находится в движении, хотя по заданию обработка приращения координаты уже должна завершиться;

- установившееся значение скорости ДПТ не соответствует расчетной скорости $\omega_f = 141.3$ рад/с.

Эти выводы подтверждаются графиком обработки перемещения, полученным с учетом радиуса приведения винтовой передачи и показанным на рис. П1.5. Вместо заданного перемещения 0.3 м координата изменила положение на 0.18 м, т.е. всего 60 % пути.

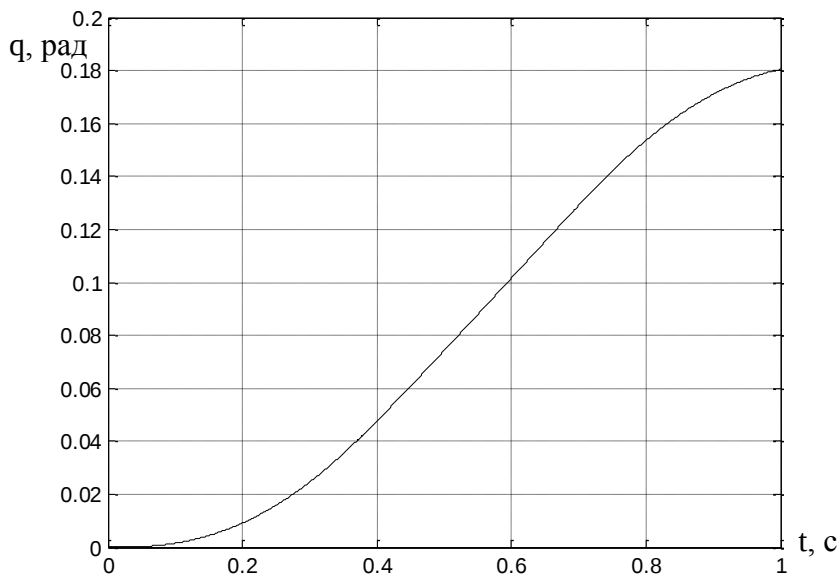


Рис. П1.5. График изменения обобщенной координаты ИС на холостом ходу замкнутой системы

Таким образом, для требуемых быстродействия и точности следует скорректировать динамические и статические свойства полученной системы, а частности, контуров тока и скорости.

В соответствии с п.6.1 параметры ПИ-регулятора, обеспечивающие настройку контура тока на модульный оптимум, показаны в табл. П1.9.

Таблица П1.9

Параметр контура тока	Значение
1. Наибольшая постоянная времени в контуре T_a , мс	1.5
2. Малая некомпенсируемая постоянная времени в контуре $T_{\mu i} = T_i + T_i$, мс	0.5
3. Коэффициент передачи регулятора $\beta_{\delta\delta}$	0.2865
4. Постоянная времени регулятора $\tau_{\delta\delta}$, мс	1.5

Переходной процесс по управлению в контуре тока с ПИ-регулятором, показанный на рис. П1.6, соответствует требуемой настройке на модульный оптимум.

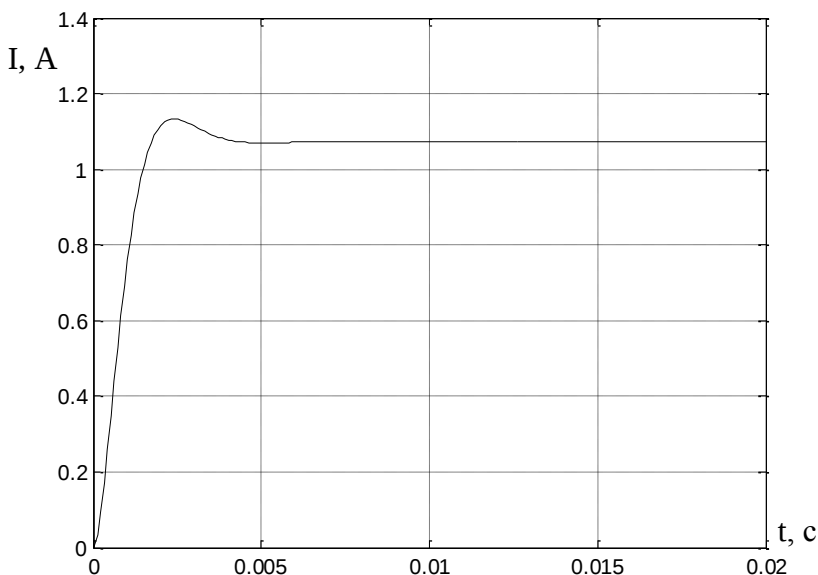


Рис. П1.6. Переходной процесс в контуре тока, настроенном на модульный оптимум

В соответствии с п.6.2 для обеспечения настройки контура скорости на модульный оптимум необходим П-регулятор с параметрами, показанными в табл. П1.10.

Таблица П1.10

Параметр контура скорости	Значение
1. Наибольшая постоянная времени в контуре T_l , мс	23
2. Малая некомпенсируемая постоянная времени в контуре $T_{\mu\omega} = 2T_{\mu i} + T_{\omega}$, мс	4
3. Коэффициент передачи регулятора $\beta_{\delta\tilde{n}}$	13.07

Переходная характеристика по управлению в контуре скорости с П-регулятором, показанная на рис. П1.7, соответствует требуемой настройке на модульный оптимум.

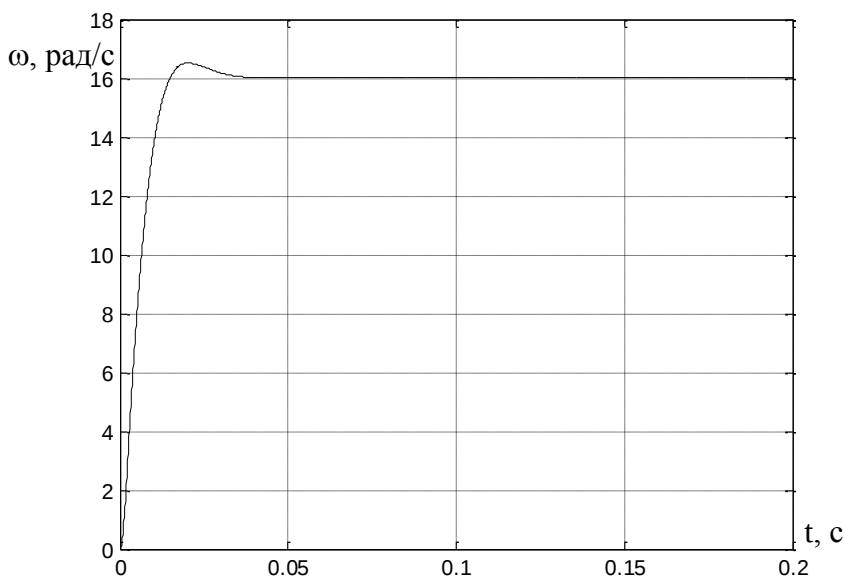


Рис. П1.7. Переходный процесс в контуре скорости, настроенном на модульный оптимум

Далее следует исследовать отработку программного движения по заданной координате, двухконтурной ИС, структурная схема которой разработана в среде MATLAB и представлена на рис. П1.11.

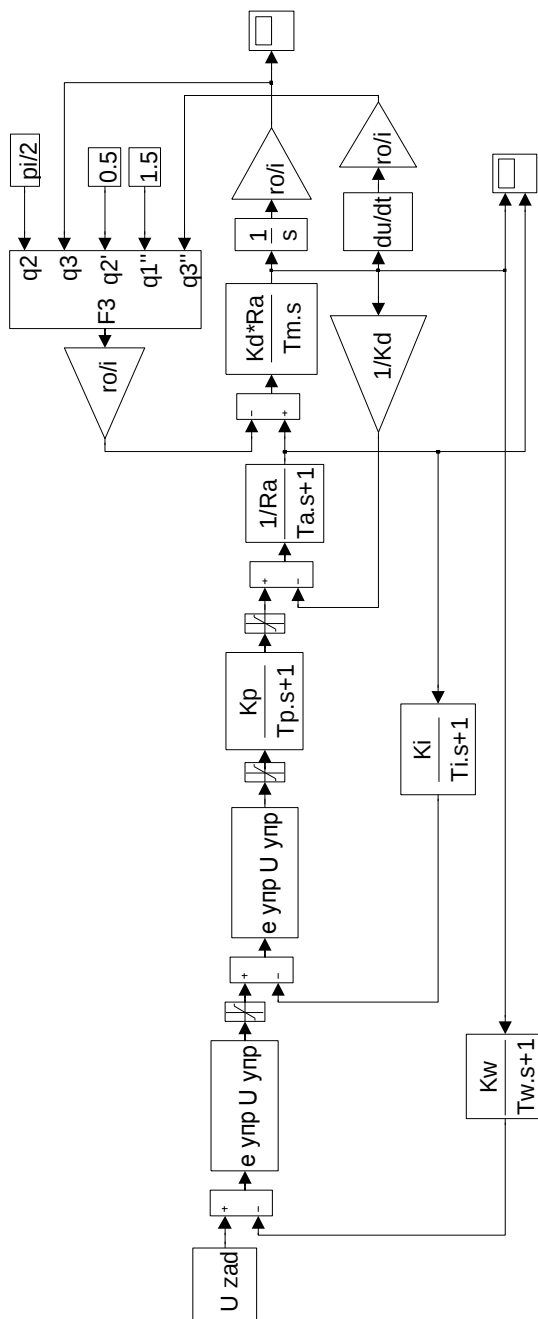


Рис. П.1.1.11. Структурная схема ИС поступательной степени подвижности

На этой схеме выходы регуляторов тока скорости ограничены значениями напряжения питания ± 14 В. Момент нагрузки обеспечивается блоком, вычисляющим обратную задачу динамики в соответствии с выражением (П1.17). В качестве значений обобщенной координаты q_2 и ее производной, а также второй производной координаты q_1 взяты их максимальные значения. Передаточный механизм ПР выполнен в виде блока, учитывающего радиус приведения винтовой передачи ρ и, в общем случае, передаточного числа редуктора i .

Прежде чем выполнять с моделью эксперименты, следует рассчитать ограничения, наложенные на регулируемые координаты тока и скорости.

Напряжение ограничения координаты тока можно вычислить по формуле

$$U_{i\ddot{\alpha}\delta i} = \hat{E}_i \cdot I_{c0}, \quad (\text{П1.24})$$

где I_{c0} - значение тока стопорения, которое не должно превышать максимально допустимое значение тока двигателя.

Максимальное значение тока якорной цепи при пуске двигателя, исходя из переходного процесса контура тока, настроенного на МО (рис. П1.6), имеет значение 1.14 А. В соответствии с формулой (П1.24) напряжение, соответствующее этому значению тока равно 10.62 В. Поэтому выход регулятора скорости, который является сигналом задания контура тока ограничим полученным значением.

В связи с ограничением выходного напряжения регулятора скорости переходной процесс при настройке контура на модульный оптимум более затянут по времени, поскольку пуск двигателя происходит при постоянном токе, как показано на рис. 1.12.

Напряжение ограничения координаты скорости, т.е. напряжение задания ИС, можно вычислить по формуле

$$U_{i\ddot{\alpha}\delta\omega} = \hat{E}_\omega \cdot \omega_l \cdot i, \quad (\text{П1.25})$$

где $\omega_i = 141.3$ рад/с, а $i=1$, т.к. рассматриваемый вариант ИС не имеет редуктора.

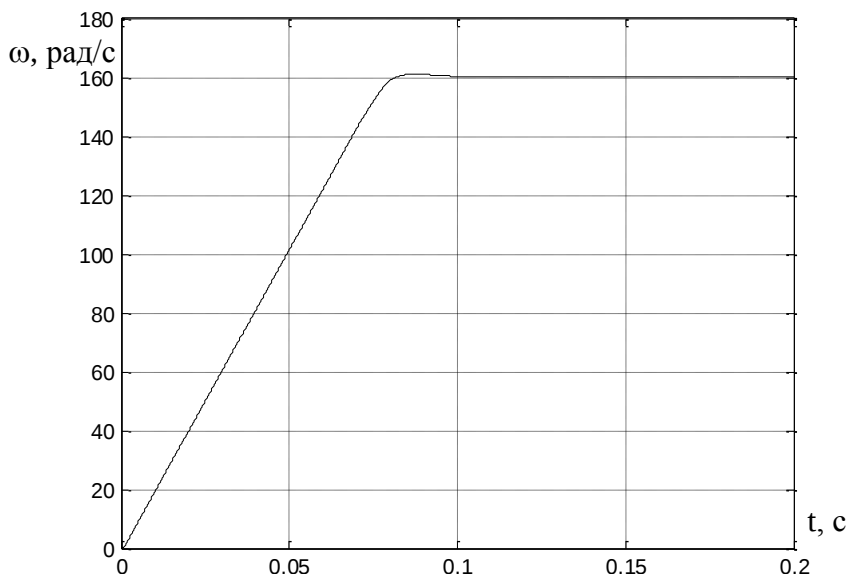


Рис. 1.12. Переходной процесс по скорости при пуске ДПТ в системе, настроенной на МО с ограничением по току

В соответствии с формулой (П1.25) напряжение, соответствующее этому значению скорости равно 8.82 В. Поэтому сигнал задания контура скорости ограничим полученным значением, т.е. сигнал задания программного движения ИС принимает вид, как показано на рис. 1.13.

Итак, подавая данный сигнал на вход замкнутой ИС, оптимизированной по быстродействию, с учетом нагрузки, получим графики изменения скорости (рис. 1.14), тока (рис. 1.15) и обобщенной координаты (рис. 1.16).

Анализ полученных зависимостей показал, что установившееся значение скорости ДПТ практически достигнуто и отличается на 1 % от значения, требуемого заданием.

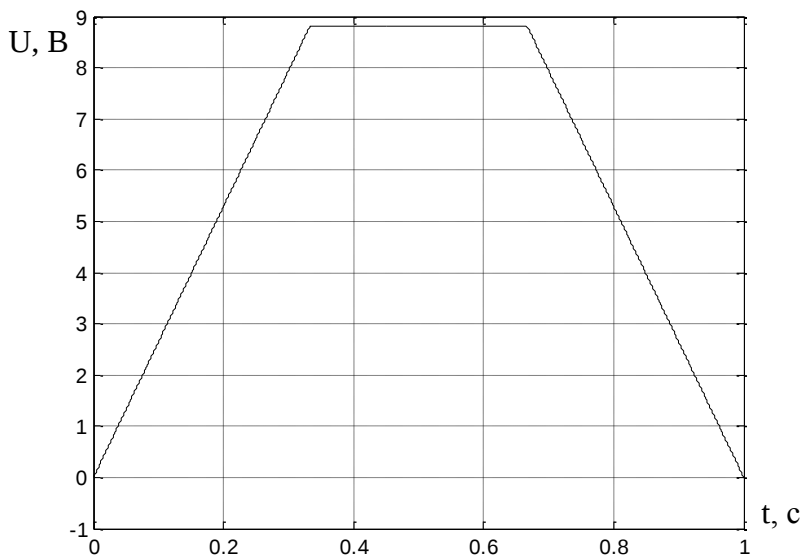


Рис. 1.13. Сигнал задания ИС, с учетом ограничения по скорости

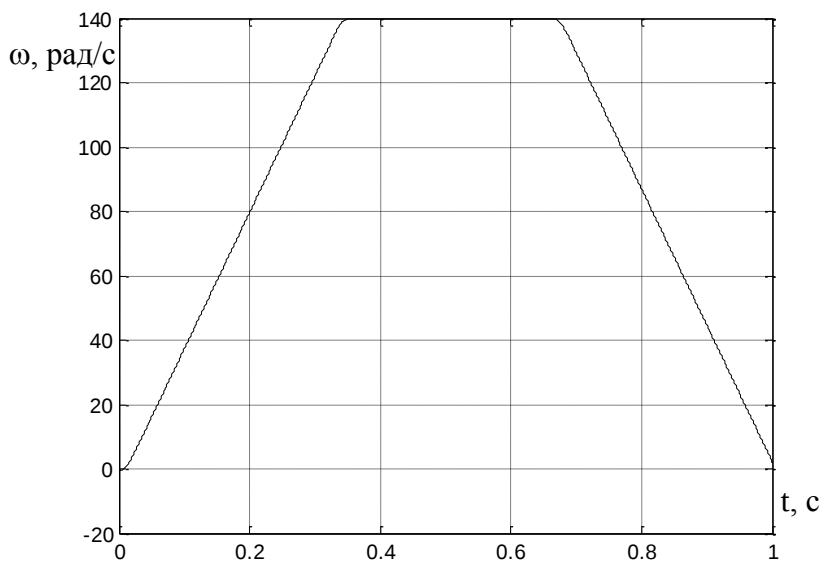


Рис. 1.14. График изменения скорости ДПТ в процессе отработки программного движения ИС

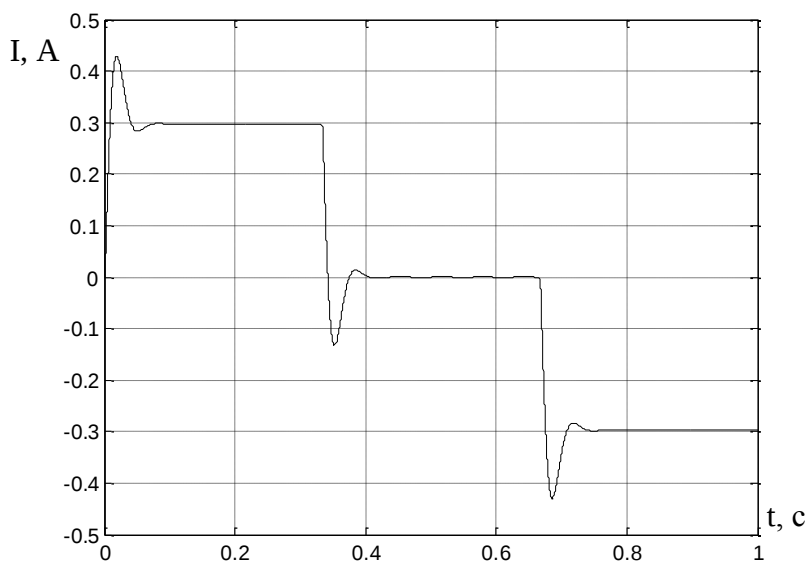


Рис. 1.15. График изменения тока якорной цепи в процессе отработки программного движения ИС

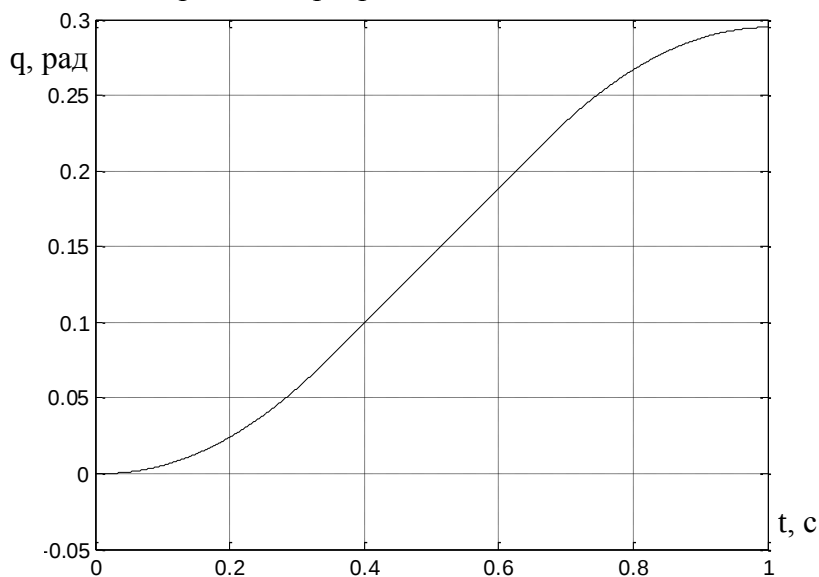


Рис. 1.16. График изменения обобщенной координаты в процессе отработки программного движения ИС

Пусковые токи при разгоне и торможении не превышают значения 0.45 А, что составляет ~ 40 % от максимального. Перемещение в момент времени 1 секунда, как видно из рис. 1.15, составляет 0.292 м, что на ~ 2.5 % меньше заданного. А из рис. 1.13. видно, что перемещение еще не закончено, поскольку скорость исполнительного двигателя отлична от нуля. Погрешность позиционирования уменьшится, но время на перемещение будет больше заданного, что недопустимо.

Настройка ИС на модульный оптимум показала, что астатизма только лишь по управлению недостаточно, поскольку статические и динамические нагрузки приводят к увеличению времени позиционирования и дают значительную погрешность.

В связи с этим, можно применить настройку контура скорости, обеспечивающую астатизм по управлению второго порядка и не менее первого по возмущению, т.е. симметричный оптимум. Для этого необходимо увеличить порядок интегрирования в контуре скорости, а значит вместо П-регулятора поставить ПИ-регулятор. Сохраним значение коэффициента передачи регулятора скорости прежним и вычислим значение постоянной времени $\tau_{\delta\tilde{n}}$ по формуле (6.5):

$$\tau_{\delta\tilde{n}} = 4T_{\mu\omega} = 4 \cdot 4 = 16 \text{ (мс)}.$$

Переходной процесс по скорости ИС настроенной на симметричный оптимум с учетом токоограничения показан на рис. 1.17.

Проанализируем графики изменения скорости (рис. 1.18), тока (рис. 1.19) и обобщенной координаты (рис. 1.20) настроенной на СО системы:

- установившееся значение скорости ДПТ достигает значения, требуемого заданием;
- пусковые токи при разгоне и торможении не превышают 0.87 А, что составляет ~ 70 % от максимального значения;
- ошибка позиционирования равна 0.

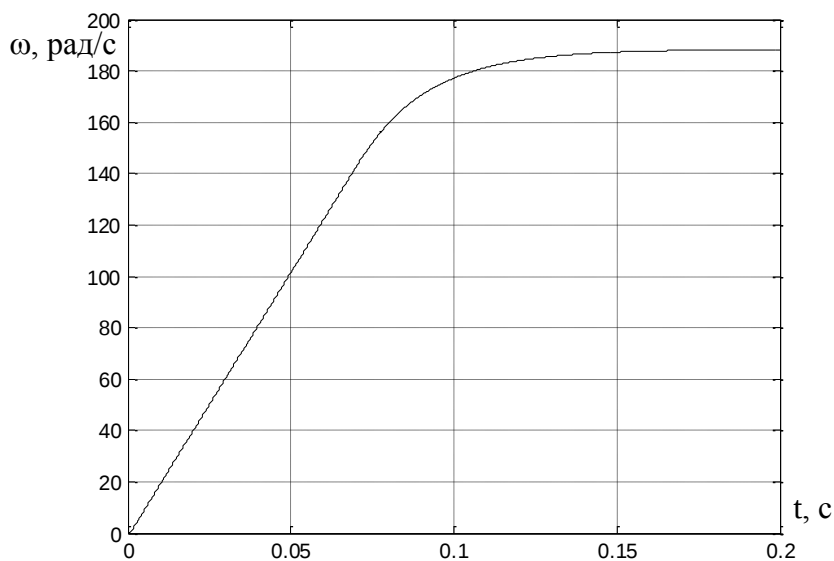


Рис. 1.17. Переходной процесс по скорости ИС с настройкой на СО и токоограничением

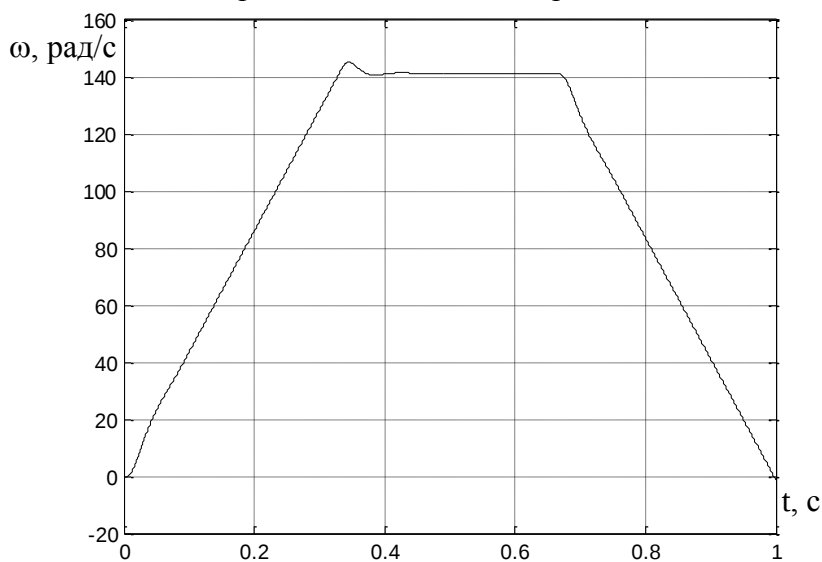


Рис. 1.18. График изменения скорости ДПТ в процессе отработки программного движения ИС настроенной на СО

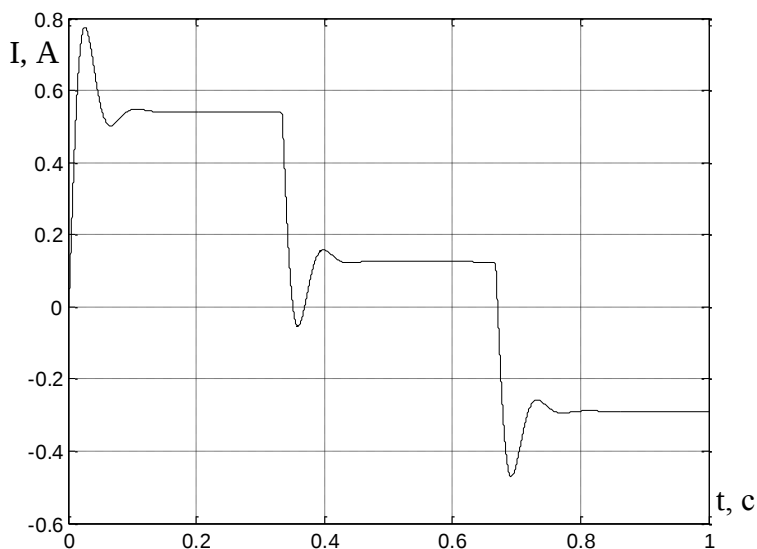


Рис. 1.19. График изменения тока якорной цепи в процессе отработки программного движения ИС, настроенной на СО

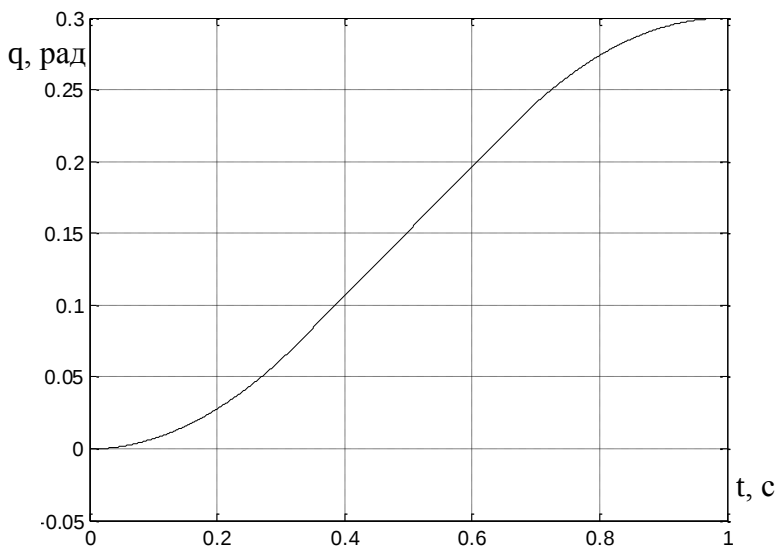


Рис. 1.20. График изменения обобщенной координаты в процессе отработки программного движения ИС, настроенной на СО

Таким образом, в процессе проектирования разработана исполнительная система поступательной степени подвижности робота НЦТМ-01, которая в соответствии с заданием обеспечивает типовое перемещение звена манипулятора на 0.3 м за 1 секунду. В состав ИС входит:

- двигатель постоянного тока ДПМ-0,25 с параметрами $N_{\dot{a}}=37$ Вт, $M_{\ddot{a}\max}=1.65$ Н·м, $U_{\ddot{a}i}=60$ В, $I_{\ddot{a}i}=1$ А, имеет встроенный тахогенератор;

- широтно-импульсный преобразователь с параметрами $U_{\ddot{i}i}=72$ В, $I_{\ddot{i}i}=1.07$ А, $f_{\ddot{i}}=5$ кГц;

- датчик тока – шунт с параметрами $U_{\emptyset i}=75$ мВ, $I_{\emptyset i}=1.5$ А.

К преимуществу разработанной системы можно отнести безредукторное исполнение, а также обеспечение астатизма по возмущению за счет настройки контура скорости на симметричный оптимум.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В РОБОТОТЕХНИКЕ

Таблица П2.1

Двигатели с полым немагнитным якорем

Тип двигателя	$N_{\dot{a}}$, Вт	$\omega_{\dot{a}} \text{ } \ddot{m}$, рад/с	$J_{\dot{a}}$, кг·м ² ×10 ⁻⁶	$I_{\dot{a}} \text{ } \ddot{m}$, А	$R_{\ddot{y}}$, Ом
ДПР-32 Н1-01	1.9	942	0.2	0.14	37
ДПР-42 Н1-01	4.7	942	0.57	0.29	13
ДПР-52 Н1-01	9.4	942	1.7	0.53	3.6
ДПР-62 Н1-01	12.6	942	3.6	1.0	2.1
ДПР-72 Н1-02	18.8	472	7.8	1.0	2.9
ДПР-72 Н1-01	25.1	628	7.8	1.35	1.7
ДПГ -122-02	16.0	628	8.0	1.2	4.0
ДПГ-222-02	40.0	628	7.0	2.5	2.7
ДПГ-312-02	60.0	628	9.0	4.0	1.2
ДПГ-322-02	90.0	628	11.5	5.1	0.8
ПРИМЕЧАНИЕ: для всех двигателей $U_{\dot{a}} \text{ } \ddot{m} = 27 \text{ В}$, перегрузочная способность по моменту $\lambda_i = 4$.					

Таблица П2.2

Двигатели серий РІ и РС с пазовым якорем

Тип двигателя	$N_{\dot{a}}$, Вт	$n_{\dot{a}} \text{ } \ddot{m}$, об/мин	$J_{\dot{a}}$, кг·м ² ×10 ⁻³	$U_{\dot{a}} \text{ } \ddot{m}$, В	$I_{\dot{a}} \text{ } \ddot{m}$, А	$R_{\ddot{y}}$, Ом	λ_i
1	2	3	4	5	6	7	8
РІ6.02	23	4000	0.030	24	2.8	2.1	6
РІ6.04	45	4000	0.051	24	5.2	0.64	6.3
РІ6.06	65	4000	0.072	24	6.7	0.45	6.7
РС6.02	45	5000	0.030	32	3.4	1.54	6.1
РС6.04	90	5000	0.051	32	4.8	0.64	6.8

Продолжение табл. П2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
PC6.06	128	5000	0.072	60	4	1.40	8.7
PI8.03	80	4000	0.15	48	3.7	1.10	5.4
PI8.06	160	4000	0.25	48	7	0.40	5
PI8.09	190	4000	0.35	48	9.7	0.20	5
PI8.13	300	4000	0.45	48	11.2	0.23	5
PC8.04	125	4000	0.21	77	3.6	1.83	4.7
PC8.10	230	4000	0.42	79	6	0.71	5.6
PC8.13	340	4000	0.53	109	5.8	1.10	5.3
PI10.03	150	3000	0.6	80	4.7	1.16	5.1
PI10.04	205	3000	0.8	80	6.2	0.72	5
PI10.04.06	160	1500	0.8	60	5.1		5
PI10.04.13	160	1500	0.8	135	2.5		3.2
PI10.06	280	3000	1.1	80	8	0.38	5.6
PI10.08	400	3000	1.35	80	10	0.22	3.6
PC10.13	495	3500	2.2	110	11.4	0.21	6.8
ЗPI12.06	350	2000	2.2	55	12.5	0.22	8
ЗPI12.09	470	2000	2.9	80	12.5	0.26	8
ЗPI12.12	625	2000	3.7	110	12.5	0.30	8
ЗPI12.18	695	2000	5.1	155	12.5	0.53	8

Таблица П2.3

Двигатели с гладким цилиндрическим якорем

Тип двигателя	$N_{\dot{a}}$, Вт	$\omega_{\dot{a} \dot{m}}$, рад/с	$J_{\dot{a}}$, кг·м ² ×10 ⁻⁶	$U_{\dot{a} \dot{m}}$, В	$I_{\dot{a} \dot{m}}$, А	$R_{\dot{y}}$, Ом
1	2	3	4	5	6	7
МИГ-10Б	10	628	0.25	12	1.4	2.5
МИГ-25Б	25	628	0.68	12	3.2	0.9
МИГ-60Б	60	628	3.6	27	3.0	1.5
МИГ-90Б	90	628	7.9	27	4.1	0.7
МИГ-40ДТ	40	628	2.9	27	2.73	2.2
МИГ-90ДТ	90	628	11.0	27	4.6	0.73

Продолжение табл. П2.3

1	2	3	4	5	6	7
МИГ-180ДТ	180	628	17.0	27	9.2	0.33
МИГ-370ДТ	370	628	48.0	27	17.0	0.12
МИГ-550ДТ	550	628	145	110	6.2	1.2
МИГ-90А	90	314	20.0	27	4.7	0.94
МИГ-180А	180	314	39.0	27	9.2	0.4
МИГ-400А	400	314	160	60	8.3	0.76
МИГ-600	600	314	430	110	6.5	1.4
ПРИМЕЧАНИЕ: перегрузочная способность по моменту $\lambda_i = 5$.						

Таблица П2.4

Двигатели с цилиндрическим пазовым якорем

Тип двигателя	$N_{\bar{a}}$, Вт	$n_{\bar{a}i} / n_{\bar{a}max}$, об/мин $\times 10^2$	$J_{\bar{a}}$, кг·м ² $\times 10^{-3}$	$U_{\bar{a}m}$, В	$I_{\bar{a}m}$, А	λ_i
ДПМ-0,25	37	15/25	0.02	60	1.0	7
ДПМ-0,5	75	15/25	0.05	110	1.0	7
ДПМ-0,2	120	15/25	0.1	60	4.5	7
ДПМ-1,6	250	15/25	0.2	110	4.5	7
ДПМ-2,5	370	15/25	0.25	110	7.0	7
ДПМ-5,2	750	15/25	0.49	110	13.5	7
ДПМ-7,2	1100	15/25	0.8	110	17.0	7
4ДПУ-75	75	20	0.21	50	4.5	7
4ДПУ-220	220	20	2.8	90	11.0	10
4ДПУ-450	450	20	4.9	150	11.0	10
ПБВ100МГУЗ	750	10/20	11.0	60	14.0	10
ПБВ100ГУЗ	1100	10/20	16.0	60	20.2	10
ПБВ112МГУЗ	1500	7.5/20	37.0	80	19.8	10
ПБВ112ГУЗ	2200	7.5/20	54.0	110	20.0	10

Таблица П2.5

Двигатели серий ДП и ВЭМ с пазовым якорем

Тип двигателя	$N_{\dot{a}}$, Вт	$n_{\dot{a}i} / n_{\dot{a}max}$, об/мин $\times 10^3$	$J_{\dot{a}}$, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ $\times 10^{-3}$	$U_{\dot{a}m}$, В	$I_{\dot{a}m}$, А	λ_i
ДП-35	25	3/4	0.0085	24	1.9	3.6
ДП-40	40	3/4	0.019	24	2.9	4.5
ДП-50	50	3/4	0.0256	24	4.2	5.8
ДП-60	90	3/4	0.06	24	5.3	7.5
ВЭМ-110УЗ	550	1/2	8.5	80.2	8.4	10
ВЭМ-120УЗ	750	1/2	13.0	68	14.2	10
ВЭМ-130УЗ	1100	1/2	19.0	96.6	13.6	10

Таблица П2.6

Двигатели с дисковым гладким якорем

Тип двигателя	$N_{\dot{a}}$, Вт	$n_{\dot{a}m}$, об/мин	$J_{\dot{a}}$, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ $\times 10^{-3}$	$U_{\dot{a}m}$, В	$I_{\dot{a}m}$, А	λ_i
ПЯ-250Ф	250	3000	0.292	36	10.0	10
ДПУ-160	180	3000	0.275	36	7.0	10
ДПУ-200	550	3000	0.78	92	7.4	4
ДПУ-240	1100	3000	1.94	122	11.0	5

ФОРМА ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

Министерство образования и науки Российской Федерации
Воронежский государственный технический университет
Факультет автоматизации и роботизации машиностроения
Кафедра робототехнических систем

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине "Исполнительные системы роботов"

Тема: "Исполнительная система одной степени подвижности
трехкоординатного манипулятора. Вариант _____"

Расчетно-пояснительная записка

Разраб. студент(ка) гр. РС - ____
(инициалы и фамилия)

Руководитель
(инициалы и фамилия)

Члены комиссии
(инициалы и фамилия)

(инициалы и фамилия)

Нормоконтролер
(инициалы и фамилия)

Защищен _____ Оценка _____
(Дата)

ВОРОНЕЖ 20__

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Грехов и др.; под. ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2001. 352 с.
2. Андрееенко С.Н. Проектирование приводов манипуляторов / С.Н. Андрееенко, М.С. Ворошилов, Б.А. Петров. – Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
3. Андрющенко В.А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие / В.А. Андрющенко. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990. 256 с.
4. Башарин А.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ: учеб. пособие для вузов / А.В. Башарин, Ю.В. Постников. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. 512 с.
5. Башарин А.В. Управление электроприводами: учеб. пособие / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. 392 с.
6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. 576 с.
7. Бурдаков С.Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: учеб. пособие / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев. – М.: Высш. шк., 1986. 264 с.
8. Воробьев Е.И. Механика промышленных роботов: учеб. пособие в 3 кн. Кн. 1. Кинематика и динамика / Е.И. Воробьев, С.А. Попов, Г.И. Шевелева. – М.: Высш. шк., 1988. 304 с.
9. Вукобратович М. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами: пер. с англ. / М. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчански. – М.: Мир, 1989. 376 с.
10. Жиль Ж. Теория и техника следящих систем: пер. с франц. / Ж. Жиль, М. Пелегрен, П. Декольн. – М.: Машиностроение, 1961. 315 с.

11. Зенкевич С.Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учебник / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.
12. Каган В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений / В.Г. Каган. – М.: Энергия, 1975. 240 с.
13. Кенио Т. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами : пер. с англ. / Т.Кенио, С. Нагамори. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 258 с.
14. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: справочник Ю.Г. Козырев. – М.: Машиностроение, 1988. 392 с.
15. Коловский М.З. Основы динамики промышленных роботов / М.З. Коловский, А.В. Слоущ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 240 с.
16. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателями постоянного тока. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.
17. Лебедев А.М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / А.М. Лебедев, Р.Т. Орлова, А.В. Пальцев. – М.: Энергоатомиздат. 1988. 324 с.
18. Мамедов В.М. Управление электроприводами постоянного тока: учебное пособие / В.М. Мамедов. – Воронеж: ВПИ, 1983. 132 с.
19. Манипуляционные системы роботов / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Машиностроение, 1989. 472 с.
20. Мелкозеров П.С. Энергетический расчет систем автоматического управления и следящих приводов / П.С. Мелкозеров. – М.: Энергия, 1968. 145 с.
21. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. Т.4: Теория оптимизации систем автоматического управления / под. ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.

22. Поздняков О.И. Электропривод промышленных роботов: учеб. пособие. О.И. Поздняков. – М.: Из-во МПИ, 1990. 116 с.
23. Программирование и разработка промышленных роботов / С.С. Аншин, А.В. Бабищ и др.; под общ. ред. Я.Л. Шифрина, П.Н. Белянина. – М.: Машиностроение, 1989. 186 с.
24. Промышленная робототехника / Под ред. Я.А. Шифрина. – М.: Машиностроение, 1982. 415 с.
25. Ревнёв С.С. Основы моделирования технических систем: учеб. пособие / С.С. Ревнёв, В.А. Трубецкой, Ю.С. Слепокуров. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. 115 с.
26. Сафонов Ю.А. Электроприводы промышленных роботов / Ю.А. Сафонов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.
27. Следящие приводы: в 2 кн. / под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Энергия, 1975. Кн.2. 384 с.
28. Справочник по промышленной робототехнике: в 2 кн. / под ред. Ш. Нофа. – М.: Машиностроение, 1989. Кн. 1. 480 с.
29. СТП ВГТУ 004-2003.
30. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. Кн. 1. 383 с.
31. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. 304 с.
32. Тун А.Я. Тахогенераторы для систем управления электроприводами / А.Я. Тун. – М.-Л.: Энергия, 1966. 112 с.
33. Филонов И.П. Теория механизмов, машин и манипуляторов / И.П. Филонов, П.П. Анципорович, В.К. Акулич. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. 656 с.
34. Фу К. Робототехника: пер. с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М.: Мир, 1989. 624 с.
35. Ястребов А.М. Системы управления движением робота / А.М. Ястребов, А.М. Филатов. – М.: Машиностроение, 1979. 176 с.

Учебное издание

Трубецкой Виктор Александрович
Медведев Владимир Алексеевич
Ревнёв Станислав Сергеевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ РОБОТОВ

В авторской редакции

Подписано к изданию 20.09.2010.
Уч.-изд. л. 6,0. «С»

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14