

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра автоматического управления

М.А. Антипова, А.Т. Доманов

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию для студентов специальностей
53 01 03 «Автоматическое управление в технических системах»
и 53 01 07 «Информационные технологии
и управление в технических системах»
всех форм обучения

Минск 2005

УДК 681.5 (075.8)
ББК 32.965 я 7
А 72

Р е ц е н з е н т:
заведующий кафедрой информационных технологий
автоматизированных систем БГУИР,
доктор технических наук, профессор В.С. Муха

Антипова М.А.

А 72 Теория автоматического управления: Учебно-метод. пособие по курсовому проектированию для студ. спец. 53 01 03 «Автоматическое управление в технических системах» и 53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» всех форм обуч. / М.А. Антипова, А.Т. Доманов. – Мн.: БГУИР, 2005.–54 с.
ISBN 985-444-682-4

В пособии изложены основные методические указания для выполнения и защиты курсового проекта, рассмотрены функциональные схемы четырех различных систем автоматического управления (САУ), описаны принципы их работы. Для каждой из предложенных САУ сформированы варианты технических заданий, даны рекомендации по проектированию и расчету структурных схем, приведены примеры их получения и расчета основных параметров. Проанализированы вопросы синтеза корректирующих устройств.

УДК 681.5 (075.8)
ББК 32.965 я 7

ISBN 985-444-682-4

© Антипова М.А., Доманов А.Т., 2005
© БГУИР, 2005

СОДЕРЖАНИЕ

- 1 Основные методические положения
- 2 Тема и содержание заданий на курсовую работу
 - 2.1 Система стабилизации платформы с антенным блоком бортовой РЛС
 - 2.2 Система автоматического сопровождения объекта по азимуту
 - 2.3 Следящий электропривод металлорежущего станка с числовым программным управлением
 - 2.4 Система позиционного управления
- 3 Методические указания по расчету системы управления
 - 3.1 Расчет и анализ системы, состоящей из функционально необходимых элементов
 - 3.2 Формирование желаемой передаточной функции $K_{ж}(p)$ разомкнутой системы
 - 3.3 Синтез передаточных функций корректирующих устройств
 - 3.4 Исследование скорректированной системы

Литература

Приложение

1 ОСНОВНЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Курсовая работа является документом, который студент выполняет самостоятельно и защитой подтверждает свои знания, полученные в ходе изучения профилирующего курса «Теория автоматического управления».

Выполняя курсовую работу, студент систематизирует и углубляет свои знания по основным разделам курса, приобретает навыки в применении этих знаний для решения конкретных задач по теме курсовой работы и умение использовать в ней компьютерную технику, обучается четкому и ясному изложению результата работы в соответствии со стандартом ЕСКД при оформлении графической и текстовой документации курсовой работы.

Решение об оценке курсовой работы принимается на основе публичного доклада студента по теме работы, ответов на вопросы, а также полноты и качества представленной документации.

1.2 Темой задания является динамический расчет системы автоматического управления по заданным показателям качества и при известной функциональной схеме системы.

К основным этапам проектирования относятся:

- построение структурной схемы системы автоматического управления, состоящей из функционально необходимых элементов;
- анализ качества и устойчивости полученной системы;
- синтез желаемых динамических характеристик системы по заданным показателям качества;
- расчет и проектирование функциональных устройств коррекции динамических характеристик системы;
- оценка качества скорректированной системы автоматического управления;
- оформление графического материала и пояснительной записки.

Расчеты могут содержать и другие этапы, связанные с решением задач исследовательского характера.

1.3 Графическая часть курсовой работы должна соответствовать стандартам Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Основным документом графической части как результата курсовой работы является чертеж структурной схемы скорректированной системы, которая определяет основные функциональные части системы управления, их назначение и взаимодействие. Схему выполняют в соответствии с ГОСТ 2.701-84.

Функциональные части изображают в виде прямоугольников, а взаимодействие частей – в виде линий, соединяющих прямоугольники. На линиях стрелками с развалом 60 градусов указывают направление процессов, в которых они протекают в системе. Внутри прямоугольников вписывают передаточные функции соответствующих частей системы или статические характеристики нелинейных элементов.

Для повышения наглядности структурной схемы рекомендуется выделять штрихпунктирными линиями группы функциональных частей, выполняемых одним аппаратным средством, например микроЭВМ, или одним техническим устройством, например электродвигателем. Рекомендуется также наносить на структурную схему квалифицирующие символы физических величин и информационных признаков.

Прямоугольники, соединяющие их линии, стрелки на линиях, буквы и символы текстовой информации, другие элементы схемы вычерчивают отрезками одинаковой толщины.

Результаты расчета в виде диаграмм и графиков представляют на чертеже и оформляют по ГОСТ 2.319-81.

Оси абсцисс и ординат графиков и диаграмм вычерчивают сплошными одинарными линиями толщиной, равной толщине линий на структурной схеме. На концах осей стрелки не вычерчивают.

На осях строят равномерные или логарифмические шкалы. Масштабы шкал по осям следует выбирать из условия максимального использования всей площади графика или диаграммы.

Все графики и диаграммы снабжают координатной сеткой, соответствующей масштабности шкал по осям абсцисс и ординат. Толщину линий координатной сетки выбирают равной примерно половине толщины линий осей.

Графики, диаграммы, кривые на графиках и диаграммах необходимо вычерчивать только с помощью чертежных инструментов (линейки, циркуля, лекала и др). Толщина кривых на графиках и диаграммах должна быть приблизительно равной толщине осей.

Числовые значения масштаба шкал осей координат записывают левее оси ординат и ниже оси абсцисс. Буквенное обозначение и единицу величины, числовые значения которой отложены на шкале оси, пишут вместо последнего числа шкалы.

Рекомендуется оставлять на графиках и диаграммах краткие надписи, относящиеся к кривым и точкам или характеризующие условия проведения численных расчетов и исследований.

1.4 Пояснительная записка должна содержать титульный лист, аннотацию, содержание, техническое задание, предисловие, основные разделы курсовой работы, заключение, литературу и стандарты, использованные в работе.

Пояснительную записку к курсовой работе выполняют только рукописным способом и только черными, только синими или только фиолетовыми чернилами или соответствующей по цвету шариковой ручкой. Высота букв и цифр должна быть не менее 3,5 мм. Чертить иллюстрации (рисунки) следует шариковой ручкой с темной (синей или черной) пастой или только карандашом средней твердости при помощи чертежных инструментов.

1.5 Курсовая работа должна быть оформлена и сдана руководителю для проверки не позже чем за три недели до начала экзаменационной сессии.

Руководитель проверяет полноту выполнения задания, обоснованность применяемых методов расчета, соответствие полученных результатов исход-

ным данным и соответствие оформления курсовой работы требованиям ЕСКД. Замеченные недостатки руководитель указывает в графической и текстовой частях курсовой работы и резюмирует в краткой рецензии, помещаемой в пояснительной записке.

При наличии замечаний или небольших недостатков и недочетов, не требующих повторной проверки, руководитель допускает курсовую работу к защите. Однако указывает, какие дополнения и исправления должны быть сделаны до защиты.

Работы с существенными недостатками, а также небрежно оформленные к защите не допускаются и должны быть доработаны или переоформлены в соответствии с предъявляемыми требованиями и вторично представлены для проверки.

1.6 Защита курсовой работы состоит из доклада и ответов на вопросы. Продолжительность доклада 8 - 10 мин.

В своем докладе студент прежде всего излагает назначение системы автоматического управления, режимы и условия ее работы, требования, предъявляемые в техническом задании к качественным показателям системы, формулирует задачи, которые последовательно решаются в курсовой работе. Затем сообщает, какими соображениями он пользовался при выборе методик их решения, на каком основании применял те или иные инженерные расчеты и решения. Доклад должен закончиться общей оценкой полученных результатов, указанием их соответствия требованиям технического задания, а возможно, и соображениями о том, как можно улучшить качественные показатели системы и какие исследования следует провести.

После доклада студенту задают вопросы относительно выполненных расчетов, использованных при этом методик и рекомендаций, полученных им результатов и принятых решений. Вопросы могут касаться и тех разделов теории автоматического управления, к которым относится содержание курсовой работы. Цель вопросов – оценить степень понимания представляемой студентом работы и уровень самостоятельности ее выполнения.

Если доклад и ответы на вопросы создают ясное представление о знаниях студентом разделов теории автоматического управления, к которым относится содержание курсовой работы, о ее понимании и умении самостоятельно решать задачи по расчету и проектированию структурной схемы системы автоматического управления, а также об умении использовать современную методику и технику проектирования, то курсовая работа засчитывается и оценивается.

При неудовлетворительной защите студенту предоставляется время для дополнительной подготовки к защите, а на титульном листе указывается дата повторной защиты.

Если во время защиты создается негативное представление о самостоятельности выполнения курсовой работы студентом, то ему выдается дополнительное задание и защита назначается после его выполнения.

2 ТЕМЫ И СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

2.1 Система стабилизации платформы с антенным блоком бортовой РЛС

Радиолокационные системы, устанавливаемые на современных скоростных пассажирских самолетах и кораблях для повышения безопасности их полета и плавания в сложных метеорологических условиях, снабжают системами стабилизации платформы с антенным блоком РЛС (радиолокационной станции).

Платформа с антенным блоком представляет собой механический узел, закрепленный в двойном карданном подвесе (рисунок 2.1), положения осей которого φ_x и φ_y управляются с помощью двух идентичных следящих систем.

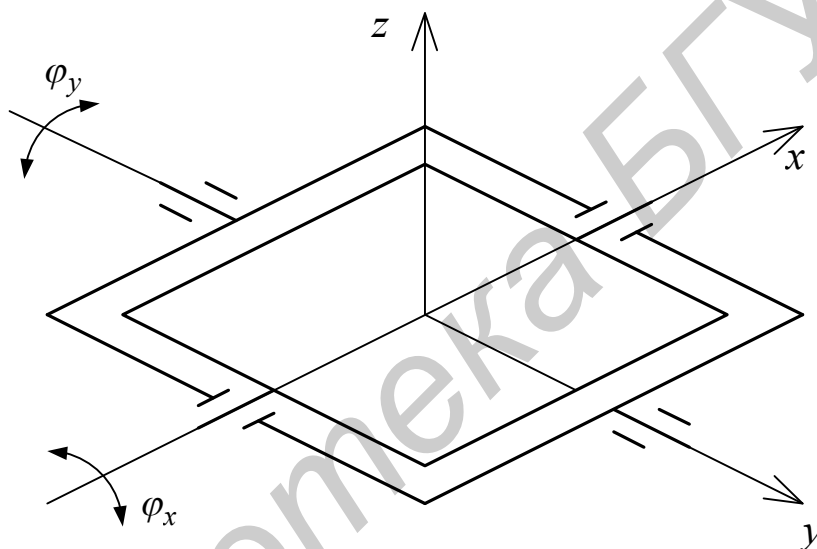


Рис. 2.1

На рисунке 2.2 приведена функциональная схема системы, осуществляющей поворот оси платформы на угол φ_x , противоположный изменению угла крена. На рисунке обозначены: ТС – вращающийся трансформатор – датчик крена корабля; ТЕ – вращающийся трансформатор – приёмник системы; А1 – устройство управления электроприводом платформы; А2 – электропривод; А3 – платформа с антенным блоком РЛС, закрепленная в карданном подвесе по оси x , совпадающей с направлением движения корабля; φ_k – угол крена корабля; φ_x – угол следящей оси системы. В идеальном случае $\varphi_x(t) = -\varphi_k(t)$.

Статор датчика ТС жестко соединен с корпусом корабля, а ротор нагружен физическим маятником. Собственные колебания маятника гасятся электромагнитным демпфером (на рисунке 2.2 не показаны).

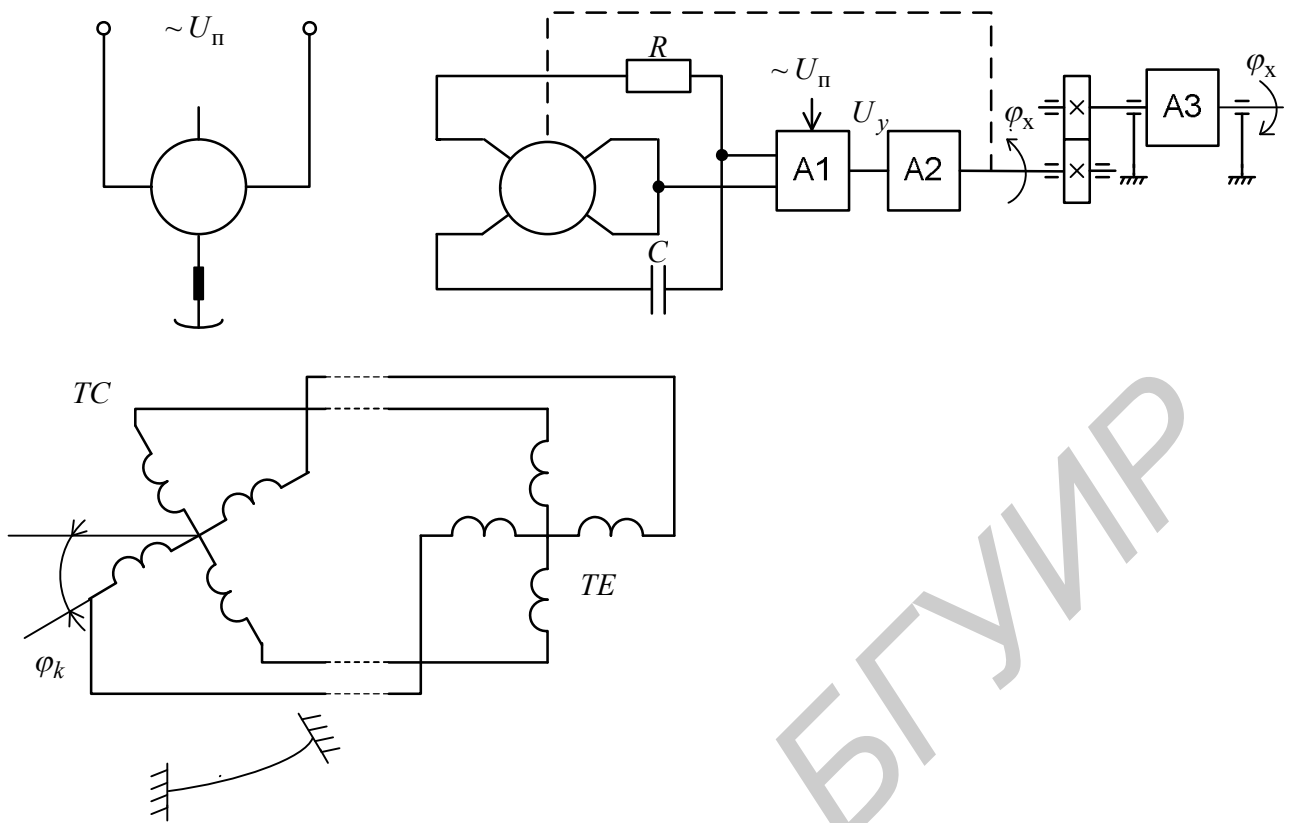


Рис. 2.2

Режим работы маятника ТС – амплитудный, индикаторный. Режим характеризуется следующими зависимостями:

$$U_n = U_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$U_{C1} = kU_m \sin \varphi_k \sin \omega t ; U_{C2} = kU_m \cos \varphi_k \sin \omega t . \quad (2.2)$$

Напряжения U_{C1} и U_{C2} подаются по линии синхронной связи на синусную и косинусную обмотки вращающегося трансформатора приемника ТЕ для создания на его роторных обмотках амплитудно-разностных напряжений:

$$U_{P1} = kU_m \sin(\varphi_k - \sin \varphi_x) \sin \omega t , \quad (2.3)$$

$$U_{P2} = kU_m \cos(\varphi_k - \varphi_x) \sin \omega t . \quad (2.4)$$

При $\omega RC = 1$ электрическая RC-цепь преобразует напряжения U_{P1} и U_{P2} в сигнал, фаза которого отображает рассогласование углов φ_k и φ_x :

$$U = k^2 U_m \sin[(\varphi_k - \varphi_x) + \omega t] . \quad (2.5)$$

Достоинствами схемы являются линейная зависимость фазы от рассогласования $\Delta\varphi = \varphi_k - \varphi_x$, высокая точность и стабильность преобразования.

Сигнал U поступает в устройство А1, которое содержит фазочувствительный преобразователь, корректирующее звено, линейный усилитель и формирует сигнал управления U_y приводом.

В приводе применяют как асинхронные двигатели переменного тока типа АДП, ДКМ и другие, так и двигатели постоянного тока типа ДПР, Д и т.п.

Двигатель, обрабатывая сигнал управления U_y , сообщает оси x угловое перемещение φ_x , противоположное углу крена корабля, осуществляя стабилизацию в плоскости горизонта платформы при кренах корабля.

Тема задания на курсовую работу. Спроектировать структурную схему системы автоматической стабилизации платформы с антенным блоком бортовой РЛС по функциональной схеме, изображенной на рисунке 2.2, исходным данным, представленным в таблице 2.1 и следующим техническим условиям: режим работы системы – качка по гармоническому закону с углом крена φ_k и периодом качки T_k . Технические данные двигателей и вращающихся трансформаторов приведены в таблицах А.1, А.2, А.5 приложения А.

Таблица 2.1 – Параметры и исходные данные задания на курсовое проектирование системы стабилизации платформы с антенным блоком бортовой РЛС

Параметр	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол крена φ_x , град	30	40	25	20	10	40	10	25	20	30
Период качки T_k , с	32	24	16	12	7	16	7	24	12	8
Электродвигатель привода	АДП-123Б					ДПР-62-0,3				
Статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя M_c , Н·м	12	8	6	8	10	8	6	8	10	10
Показатель колебательности, M	1,4		1,2		1,3		1,4		1,5	
Амплитуда ошибки δ_a , угл. мин	3	6	6	4	3	8	4	2	6	10
Вращающиеся трансформаторы: ТС ТЕ	СКТ-225-2Д СКТ-225-2П		СКТ-220-1Д СКТ-220-1П		СКТ-225-2Д СКТ-225-2П		СКТ-225-2Д СКТ-225-2П		СКТ-220-1Д СКТ-220-1П	

2.2 Система автоматического сопровождения объекта по азимуту

Система является составной частью мобильной РЛС и предназначена для измерения угла азимута движущегося объекта. В состав системы входит опорно-поворотное устройство (ОПУ) с силовыми передачами, предназначенными для поворота блока лазерной пеленгации РЛС по азимуту. Кинематическая схема приводов ОПУ и передачи азимутальному датчику информации о нахождении объекта по азимуту изображена на рисунке 2.3.

Азимутальный привод состоит из электродвигателя 1 с редуктором 2. Выходная шестерня 3 редуктора находится в зацеплении с колесом 4, закрепленном на валу 5 опорного-поворотного устройства. Вал жестко связан с платформой 6, на которой установлен блок лазерной пеленгации объекта А.

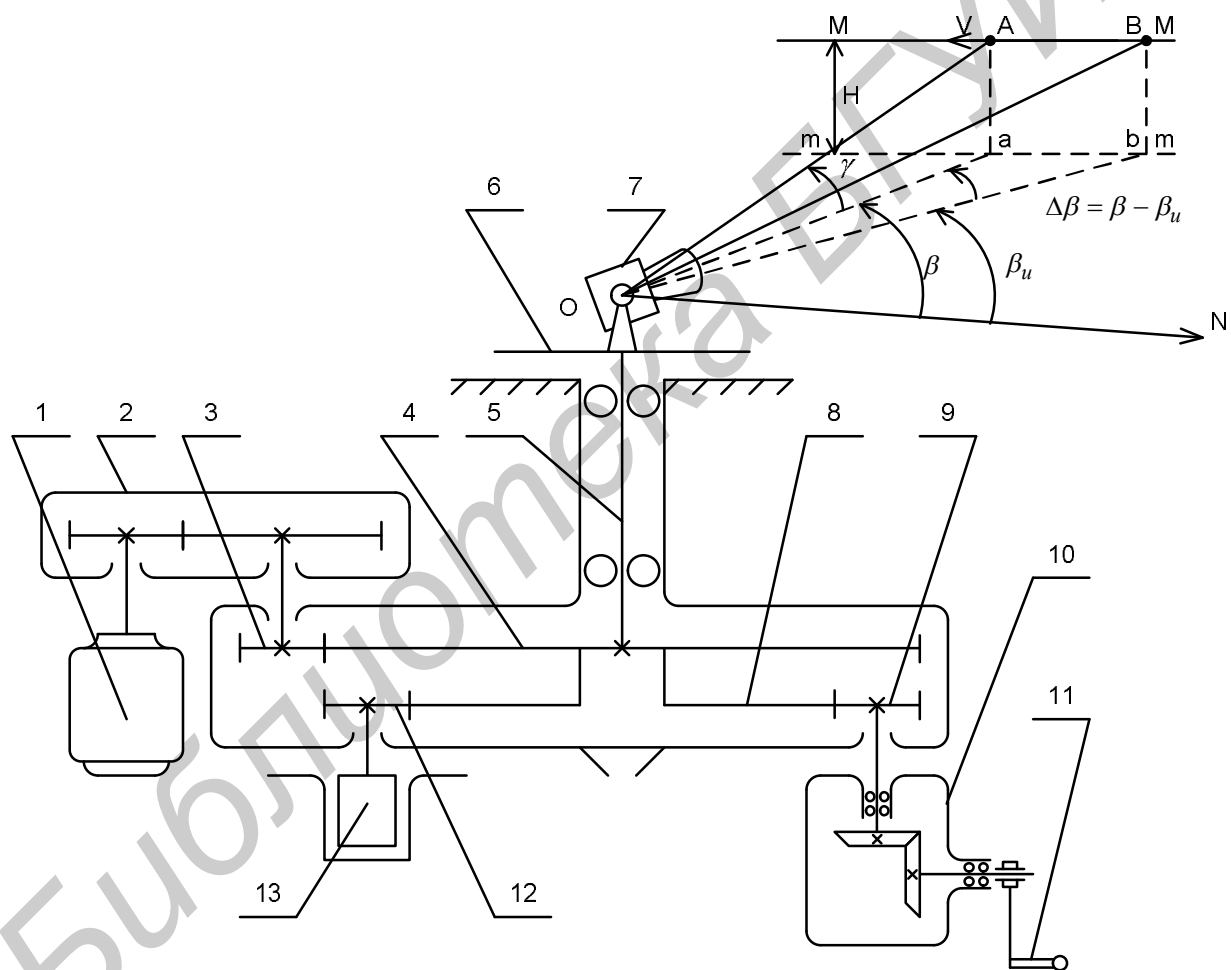


Рис. 2.3

В блоке с колесом 4 находится колесо 8, которое сопряжено с шестерней 9, передающей вращение на вал 5 от ручного привода 10. Ручной привод состоит из пары конических зубчатых колес и съемной рукоятки привода 11.

С колесом 8 сопряжена также люфтовывбирающая шестерня 12, которая поворачивает ось азимутального датчика для создания информации о величине измеренного угла азимута β_u .

На рисунке 2.3 изображены траектория MM прямолинейного движущегося объекта A , ее горизонтальная проекция mm , точка O – точка расположения фокуса оптической системы блока пеленгации 7 и направление ON магнитного меридиана. Движение характеризуется неизменной во времени высотой H и скоростью v .

При движении объекта его азимут β непрерывно меняется. Система сопровождения должна управлять приводом поворота платформы так, чтобы оптическая ось OB была направлена на объект. Ошибка сопровождения по азимуту $\delta_\beta = \beta - \beta_u$ не должна превышать допустимую величину δ_{don} . Начальное направление на объект устанавливается вручную по телевизору.

Функциональная схема системы управления показана на рисунке 2.4. Устройство $A1$ представляет собой четырехэлементный фотодетектор, на который проецируется узкий луч света, отраженный от объекта сопровождения при его подсвечивании. В идеальном случае луч обладает осевой симметрией. Диаметр d изображения луча на апертуре фотодетектора не превышает половины линейного размера l фотодетектора.

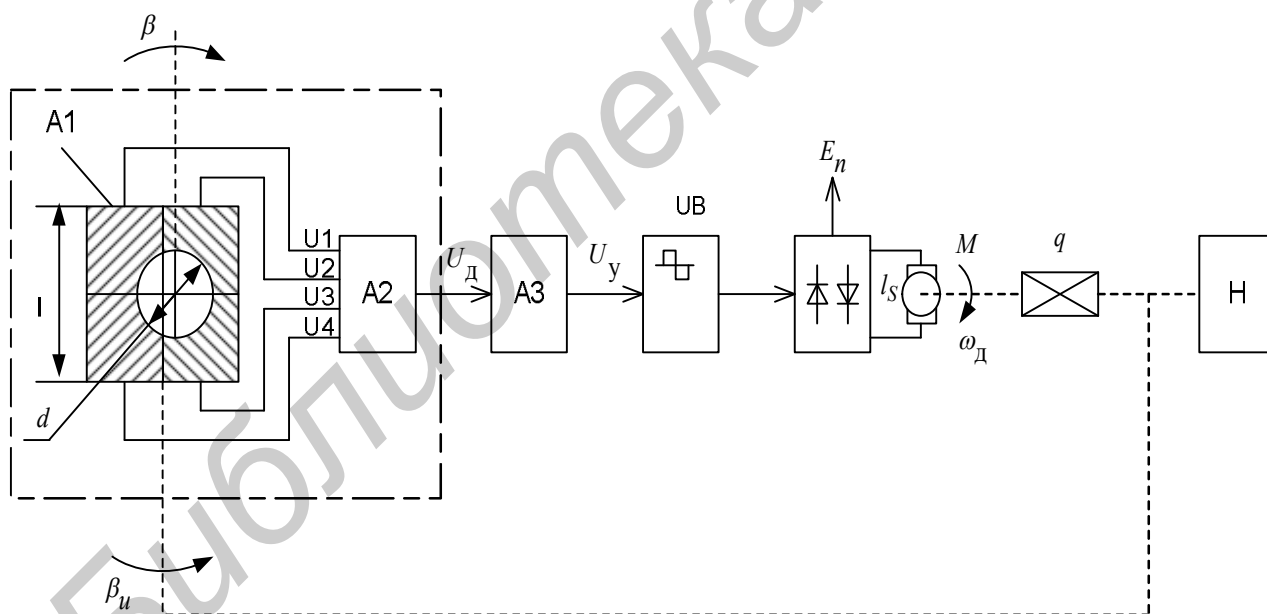


Рис. 2.4

Уровни сигналов ($U1, U2, U3, U4$) на выходах фотодетекторов пропорциональны яркости и площади засвечивания на их апертурах. Для приведенного на рисунке 2.4 случая $U1 < U2, U3 > U4$. Ясно, что суммарно-разностный сигнал $(U1+U4) - (U2+U3)$ содержит информацию о рассогласовании углов азимута δ_{don} .

Сигналы с выходов фотодетекторов имеют очень низкий уровень. Поэтому в устройстве А2 их предварительно усиливают, стробируют, обрабатывают и только затем формируют сигнал ошибки измерения азимута $U_{\delta} = U_{\delta}(\Delta\beta)$.

Зависимость $U_{\delta}(\Delta\beta)$ является характеристикой пеленгационного устройства и имеет вид, показанный на рисунке 2.5.

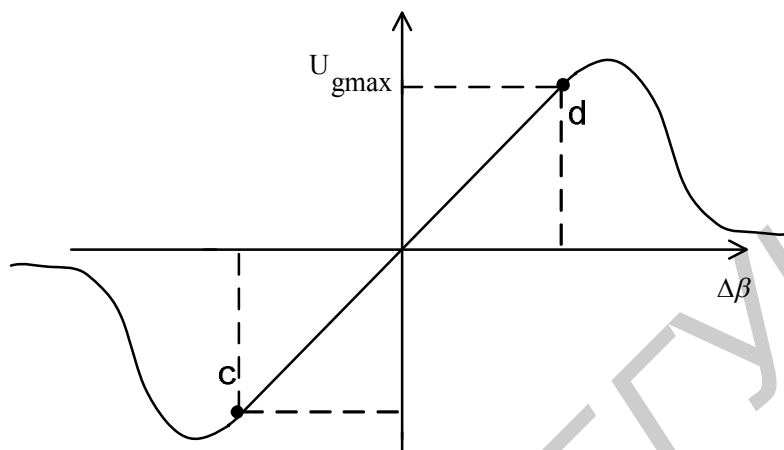


Рис. 2.5

На линейном участке cd характеристика описывается уравнением

$$U_{\delta} = K_{\delta}(\Delta\beta), \quad (2.6)$$

где $K_{\delta} = \left[\frac{dU_{\delta}(\Delta\beta)}{d\Delta\beta} \right]_{\Delta\beta=0}$ – крутизна пеленгационной характеристики.

В электроприводе используется двигатель постоянного тока серии ДПР или МИГ. Питание двигателя осуществляется от силового преобразователя на транзисторах, работающих в режиме переключений. Коммутация транзисторов несимметричная.

Задача сопровождения объекта с измерением угла азимута решается следующим образом. При азимутальном отклонении объекта А от оптической оси ОВ на угол $\Delta\beta$ в пеленгационном устройстве формируется пропорциональное отклонению напряжение U_{δ} . Это напряжение подается на вход устройства А3, где оно корректируется и усиливается. Сформированное устройством напряжение U_y преобразуется в последовательность широтно-модулированных сигналов, которые так воздействуют на силовой преобразователь, чтобы скорость двигателя М изменялась пропорционально $\Delta\beta$. Двигатель, через редуктор q поворачивая платформу с блоком пеленгации в направлении объекта, стремится уменьшить до нуля оптическую разность азимутальных углов $\Delta\beta$. При $\Delta\beta \cong 0$ датчик азимута 13 (см. рисунок 2.3) выдает информацию о значении угла ази-

мута объекта $\beta = \beta_u - \delta_{\text{доп}}$, где $\delta_{\text{доп}}$ – допустимая погрешность системы сопровождения.

Аналогично работает система сопровождения объекта по углу места γ (см. рисунок 2.3).

Тема задания на курсовую работу. Спроектировать структурную схему системы автоматического сопровождения объекта по функциональной схеме рисунка 2.4, исходным данным таблицы 2.2 и следующим техническим условиям:

- режим работы – кратковременное десятисекундное сопровождение объекта по азимуту;
 - закон изменения азимута: $\beta(t) = \Omega_H t + \varepsilon_H t^2$;
 - частота следования отраженных от объекта импульсов – 10...20 Гц.
- Технические данные двигателя приведены в таблице А.1 приложения А.

Таблица 2.2 – Параметры и исходные данные задания на курсовое проектирование системы сопровождения объекта по азимуту

Наименование параметра	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость изменения азимута $\frac{d\beta}{dt} = \Omega_H$, град/с	0,68	0,4	0,3	0,2	0,12	0,42	0,28	0,18	0,12	0,3
Допустимая ошибка сопровождения по азимуту δ , угл. с	20	16	12	10	16	16	12	8	10	12
Электродвигатель привода	ДПР 72-02					МИГ 25Б				
Передаточное отношение редуктора q	628			1 200		580			1 500	
Статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя M_c , Н·м	10			18			12			
Крутизна пеленгационной характеристики K_d , В/град.	5		10		8		5		10	
Ускорение объекта по азимуту, $\varepsilon_H \cdot 10^{-3}$, град/с ²	32	16	20	8	16	20	32	8	6	16

2.3 Следящий электропривод металлорежущего станка с числовым программным управлением

Проектируемый следящий электропривод предназначен для обеспечения высокой точности перемещения рабочего органа станка (стола, шпинделя, суппорта, ползуна и т.п.) по прямолинейным направляющим в процессе размерной обработки деталей.

Кинематическая схема электропривода показана на рисунке 2.6. Движение от электродвигателя 1 через редуктор 2 с передаточным отношением i_p передается на ходовой винт 3 и далее через гайку качения 4 на рабочий орган 5, который перемещается по направляющим 6. С ходовым винтом механически связан датчик перемещения 7.

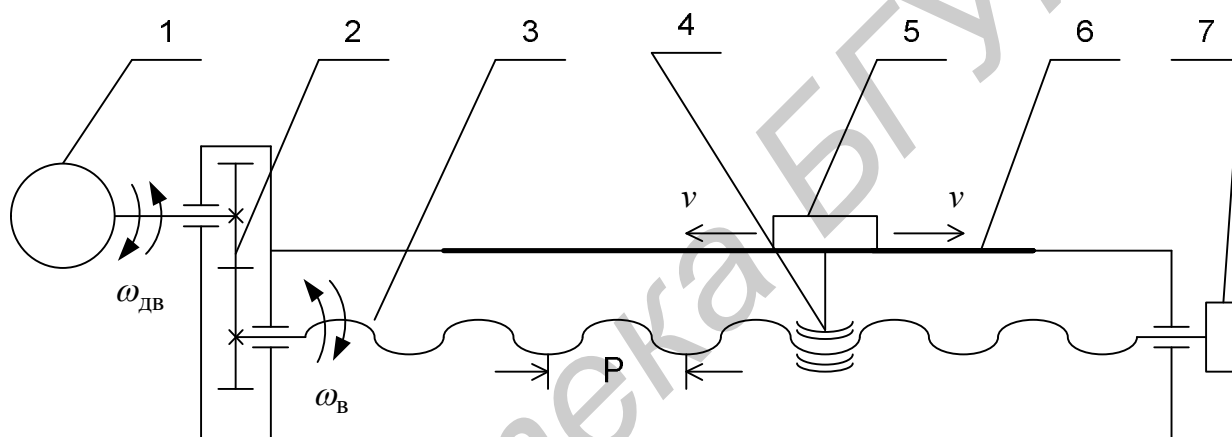


Рис. 2.6

В электроприводе тяжелых станков применяют высокомоментные электродвигатели серии ПБВ с возбуждением от постоянных магнитов или двигателя серии 2П, ПБС с электромагнитным возбуждением. Для питания электродвигателей используют тиристорный преобразователь. В малых станках используют малоинерционные двигатели серии ДК, ДПУ, ПЯ и другие с питанием от транзисторных преобразователей. Как правило, двигатель имеет встроенный тахогенератор.

Основными параметрами кинематической схемы являются шаг винта P , мм, и передаточное отношение редуктора i_p , которые связаны отношением

$$i_p = \frac{\omega_{d_{\max}} P}{v_{H_{\max}}}, \quad (2.7)$$

где $\omega_{d_{\max}}$ – допустимая угловая скорость вращения вала двигателя за счет кратковременного повышения напряжения на обмотке якоря, $v_{H_{\max}}$ – скорость ус-

коренных перемещений рабочего органа на холостом ходу при малом моменте сопротивления, обусловленном силами трения.

Формула (2.7) выражает условие согласования диапазона регулирования подач с диапазоном регулирования угловой скорости двигателя. Точность поддержания рабочей скорости подачи v_p должна удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Допустимые погрешности поддержания рабочей скорости подачи и коэффициента неравномерности перемещения

Отношение рабочей скорости к установившейся v_p/v_{yc}	Погрешность, %			Коэффициент неравномерности перемещения
	суммарная	моментная	реверса	
1,0	0,5	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	0,01
0,1	1,0	$\pm 0,25$	$\pm 0,25$	0,01
0,01	2,0	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	0,05
0,001	3,0	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	0,10
0,0001	5,0	$\pm 2,00$	$\pm 2,00$	0,15

Следящий электропривод станка с ЧПУ представляет собой сложную систему управления, расчет и проектирование которой осуществляют приближенно по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам. Причем задачу удастся упростить, если на начальном этапе проектирования исходить из того, что функциональная схема проектируемой системы известна. Например предположить, что схема содержит устройства коррекции как в канале ошибки слежения за перемещением рабочего органа станка, так и в цепи обратной связи по скорости двигателя, а затем отыскивать структурные схемы корректирующих устройств и оптимизировать их параметры. Вообще можно задаваться различными функциональными схемами проектируемого следящего электропривода, однако среди их разнообразия более совершенной является схема, построенная по принципу подчиненного регулирования переменных, показанная на рисунке 2.7.

Схема содержит три контура: тока, скорости и перемещения; показывает, как цифровое управление перемещением рабочего органа станка (нагрузки Н) сочетается с аналоговым регулированием скорости и тока (момента) электропривода.

Контур тока содержит силовой преобразователь А4, работающий в импульсном режиме; электрическую часть электродвигателя М; датчик тока UA; регулятор тока А2 и устройство управления А3 состоянием элементов силового преобразователя.

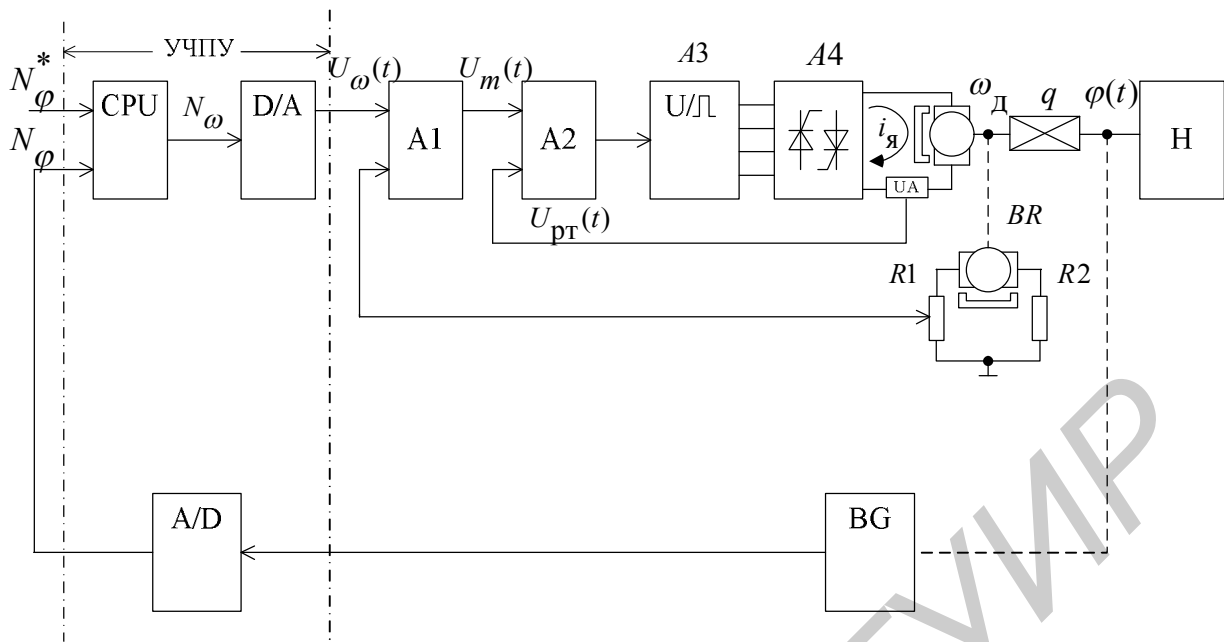


Рис. 2.7

Задающим воздействием для контура тока является сигнал $U_m(t)$ с выхода регулятора скорости А1.

В контур скорости входят контур тока, механическая часть электропривода, тахогенератор BR и регулятор скорости А1.

В состав цифрового контура управлением перемещением рабочего контура станка (нагрузки) входят микропроцессорная система CPU, цифроаналоговый преобразователь «код-напряжение», контур скорости, импульсный датчик перемещения нагрузки BG, преобразователь «перемещение-код».

Сигнал с датчика перемещения BG преобразуется в машинный код N_φ и поступает на вход микропроцессорной системы CPU. На второй ее вход поступает код N_φ^* программного (желаемого) перемещения. Микропроцессорная система УЧПУ осуществляет прием и обработку дискретной информации N_φ и N_φ^* , вычисляет код задания на перемещение $N_\varepsilon = N_\varphi - N_\varphi^*$; в соответствии с алгоритмом управления перемещением вычисляет код N_ω управляющего воздействия на контур скорости и выдает его на вход УЧПУ, где он преобразуется в физический сигнал $U_\omega(t)$.

Тема задания на курсовую работу. Спроектировать структурную схему следящего электропривода металлорежущего станка с ЧПУ по функциональной схеме рисунка 2.7, исходным данным таблицы 2.4 и следующим техническим условиям:

- время переходного процесса $t_{\text{пн}} \leq 0,2$ с для системы с двигателем серии ПБВ и $t_{\text{пн}} \leq 0,12$ с для системы с малоинерционным двигателем серии ДК и ДПУ;

– режим работы – перемещение рабочего органа станка с постоянной рабочей скоростью v_p ;

– перерегулирование $\sigma \leq 20\%$.

В задании может быть указан другой режим работы – перемещение рабочего органа по закону

$$s(t) = \begin{cases} A \sin \frac{2\pi}{T} t & \text{при } 0 \leq t \leq T, \\ 0 & \text{при } t > T, \end{cases} \quad (2.8)$$

где A – перемещение, например 0,08 м; T – время перемещения, например 20 с.

Технические данные электродвигателя приведены в таблице А.2 приложения А.

Таблица 2.4 – Параметры и исходные данные задания для расчета и исследования следящего электропривода станка с ЧПУ

Параметр	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, M_C , Н·м	7	8	8	10	2	8	6	6	12	4
Момент инерции нагрузки, приведенный к оси вала двигателя, J_H , кг·м ²	0,008		0,012		0,0004		0,0028		0,008	
Шаг ходового винта P , мм	10	20	20	10	10	10	20	5	10	20
Электродвигатель привода	ПБВ – 100L				ДПУ – 127-200			ДК – 3.5		
Скорость ускоренных перемещений v_y , м/с	0,1	0,14	0,12	0,167	0,1	0,08	0,14	0,1		0,167
Допустимое ускорение $a_{H \max}$, м/с ²	1,2	1,5	1,0	1,2	1,5	1,2	1,6	1,2	1,4	1,6
Максимальная рабочая скорость, $v_{p \max} \cdot 10^{-2}$, м/с	1,7	2,5	3,2	4,2	1,7	3,2	5,0	2,5	3,2	5,0
Минимальная рабочая скорость, $v_{p \min} \cdot 10^{-3}$, м/с	0,0167				0,024			0,0167		
Число дискрет датчика положения на оборот ходового винта N	2000		2500		5000		2500		5000	

Силовой преобразователь	Трехфазный тиристорный, схема мостовая	Транзисторный с ШИМ, схема мостовая
-------------------------	--	-------------------------------------

2.4 Система позиционного управления

Система предназначена для управления электроприводом колонны манипулятора при ее повороте в требуемую позицию. Кинематическая схема электропривода показана на рисунке 2.8.

Электропривод состоит из электродвигателя постоянного тока 1 и редуктора 2, выходная шестерня которого закреплена на оси 3 колонны манипулятора 4. Привод снабжен датчиком углового положения 5 колонны и тахогенератором 6.

Поворот колонны осуществляется в соответствии с графиком скорости Ω_k колонны, профиль которого изображен на рисунке 2.9. Время перемещения t_{Π} состоит из двух отрезков длительностью t'_{Π} и t''_{Π} , причем при обработке больших перемещений $t'_{\Pi} \gg t''_{\Pi}$.

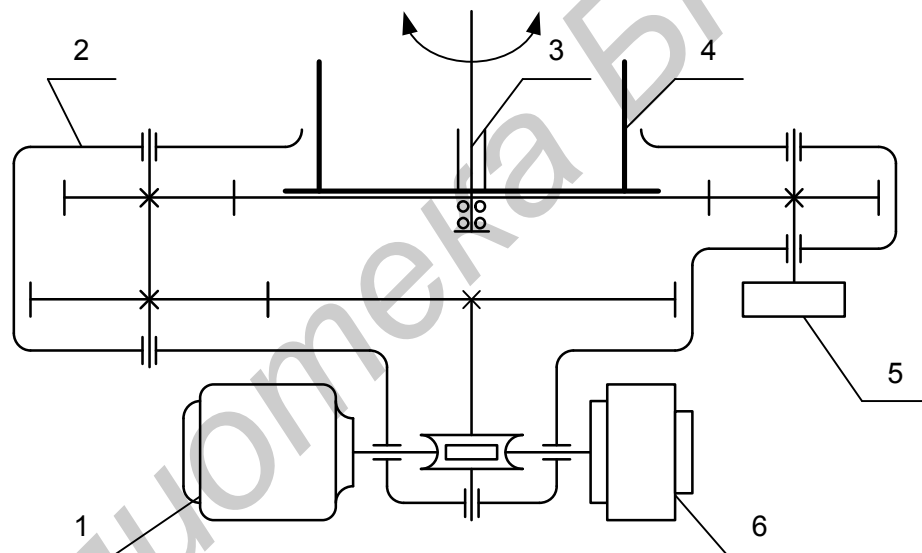


Рис. 2.8

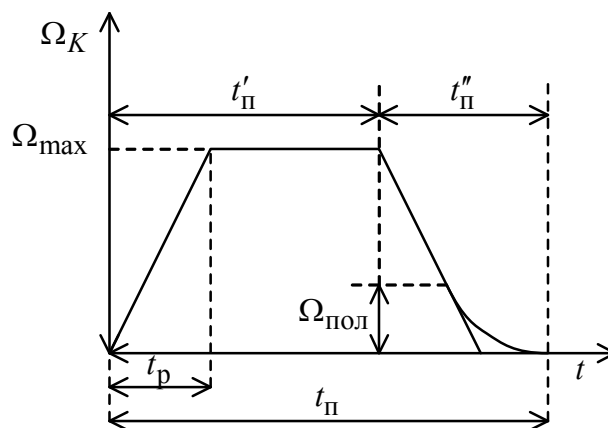


Рис. 2.9

На отрезке времени t'_{Π} система управления обеспечивает основную часть перемещения. На этом отрезке такие параметры движения, как допустимая угловая скорость Ω_{\max} и время разгона t_p (или допустимое ускорение ε_{\max}), служат основой для выбора мощности двигателя и передаточного отношения q редуктора. На втором отрезке времени длительностью t''_{Π} система управления обеспечивает быстрое, но плавное торможение и точную остановку колонны манипулятора в заданной позиции.

Требования к точности позиционирования колонны в момент остановки движения, к плавности торможения (без перебега за точку позиционирования), к точности поддержания угловой скорости Ω_{\max} и к длительности перемещения t_{Π} являются основными для расчета и проектирования системы позиционного управления.

Получить качественный процесс перемещения минимальной длительности t_{Π} без колебаний достаточно просто, если систему управления строить по принципу подчиненного регулирования переменных.

Функциональная схема системы подчиненного регулирования показана на рисунке 2.10, где обозначено: Н – нагрузка (колонна манипулятора), $\varphi_k(t)$ – угловое положение колонны, N_{φ} – код углового положения, N_{φ}^* – код требуемой позиции колонны. Функции регулятора угла поворота $\varphi_k(t)$ выполняет программа вычислительного устройства CPU. Регуляторы скорости ω_d и тока $i_{\text{я}}$ реализованы в устройстве А1 и А2 соответственно.

Устройство А3 регулирует среднее значение напряжения на обмотке якоря двигателя путем изменения отношения времени включенного и отключенного состояний транзисторов выходного каскада усилителя мощности А4.

В системе используются датчик тока UA, датчик угловой скорости BR и импульсный датчик перемещения BG.

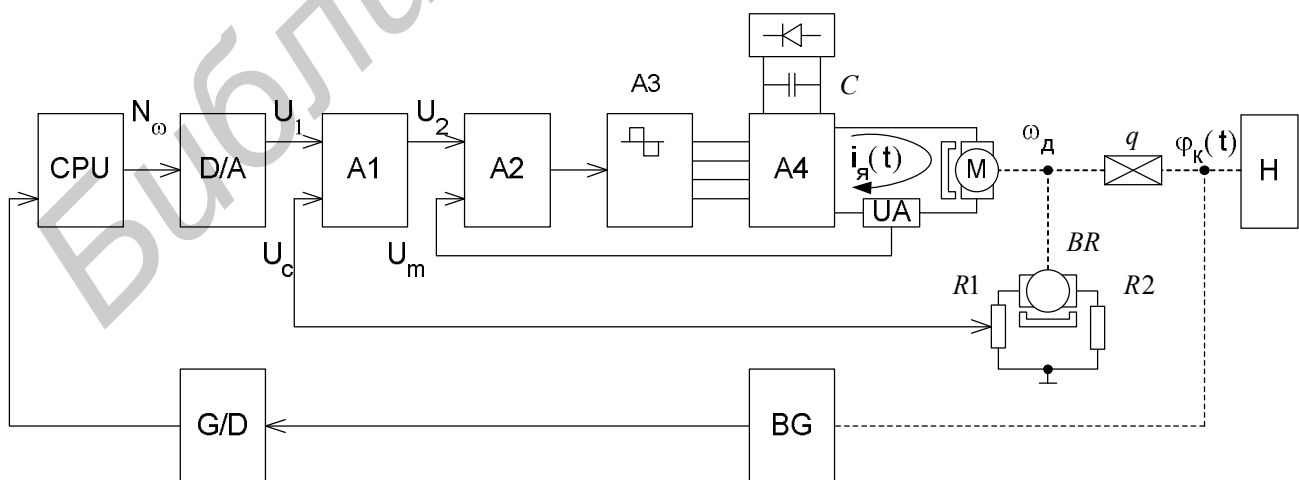


Рис. 2.10

Регулятор тока А2 играет в системе управления особую роль. В периоды разгона и торможения он удерживает ток i_a на верхнем допустимом пределе, обеспечивая наиболее полное использование движущего момента двигателя, а следовательно, и равноускоренное движение с минимальным временем разгона t_p и торможения t_T . В периоды движения с установившейся скоростью Ω_{\max} регулятор удерживает ток на необходимом минимальном уровне.

Система работает следующим образом. В соответствии с программой работы манипулятора на входе системы формируется код желаемой угловой позиции колонны $N_\varphi^* = [K_{д.п} \cdot \varphi^*(t)]$, где $K_{д.п}$ – коэффициент пропорциональности, численно равный коэффициенту преобразования датчика ВГ. В начальный момент движения сигналы с датчиков положения и скорости отсутствуют и система оказывается разомкнутой, а на входе регулятора тока формируется максимальный сигнал U_2 . Двигатель разгоняется равноускоренно.

По мере нарастания скорости двигателя сигнал U_c в обратной связи увеличивается и в момент, когда скорость достигает величины $\omega_d = q \cdot \Omega_{\max}$, где q – передаточное отношение редуктора, он становится равным сигналу U_1 . На выходе регулятора скорости сигнал U_2 быстро снижается до минимального уровня, соответствующего нулевому ускорению нагрузки, а система продолжает движение с равномерной скоростью Ω_{\max} .

В процессе движения увеличивается код N_φ действительного углового положения звена манипулятора. В момент, когда до желаемой позиции φ^* остается угол поворота $\Delta\varphi(t) = \varphi^* - \varphi(t)$, равный углу $\varphi_m(t)$ (его необходимо будет пройти при торможении), вычислительное устройство начинает снижать на входе регулятора скорости сигнал U_1 . При этом сигнал U_c оказывается больше U_1 , что соответствует началу торможения. На входе регулятора тока снова формируется максимальный сигнал U_2 , но противоположной по знаку сигналу U_2 в период разгона.

Когда звено манипулятора окажется в непосредственной близости от желаемой позиции, все регуляторы (положения, скорости и тока) работают в системе одновременно, обеспечивая требуемую точность позиционирования звена.

Тема задания на курсовую работу. Спроектировать структурную схему системы позиционного управления колонной манипулятора по функциональной схеме рисунка 2.10, исходным данным таблицы 2.5 и следующим техническим условиям:

- режим поворота колонны по графику на рисунке 2.9;
- длительность перемещения $t_{п}$ минимальна;
- датчик положения ВГ круговой импульсный ВЕ-178;
- крутизна характеристики тахогенератора ВР составляет 0,24 В·с/рад.

Технические данные двигателя приведены в таблице А.1 приложения А.

Таблица 2.5 – Параметры и исходные данные задания на разработку структурной схемы системы позиционного управления звеном манипулятора

Параметр	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Статический момент сопротивления нагрузки M_c , Н·м	–	–	–	–	–	28	30	16	32	24
Момент инерции нагрузки J_H , кг·м ²	38	36	18,6	38	32,6	3,8	3,0	3,2	2,8	3,6
Электродвигатель привода	СЛ – 569			СЛ – 261				СЛ – 569		
Максимальный угол поворота звена φ_{\max} , рад	1,5 7	2,1	3,14	3,66	4,2	1,57	2,1	2,1	1,57	3,14
Максимальная угловая скорость Ω_{\max} , с ⁻¹	1,0 5	1,57	2,1	1,05	1,57	2,1	1,57	1,47	1,57	2,1
Максимальное угловое ускорение ε_{\max} , с ⁻²	4,2	3,2	6,5	3,75	4,24	–	–	–	–	–
Время разгона t_p , с	–	–	–	–	–	0,42	0,73	1,3	0,6	0,43
Число дискрет датчика ВГ на оборот	2500		10000		5000		4000		2500	

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Расчет и анализ системы, состоящей из функционально необходимых элементов

Расчет начинают с построения структурной схемы, которая разрабатывается по функциональной, указанной в техническом задании на курсовую работу. При этом каждое функциональное устройство и функциональную часть схемы заменяют прямоугольником, в который записывают известное выражение передаточной функции. Примеры передаточных функций типовых функциональных элементов и формулы для расчета параметров приведены в приложении А.

Если передаточная функция какой-либо отдельной функциональной части системы отсутствует, то ее определяют на основании уравнений, отражающих принцип действия этой части. Уравнения записывают, используя технические данные, указанные в техническом паспорте или в справочной литературе.

По структурной схеме записывают передаточные функции $K(p)$, $K_{eg}(p)$, $K_{ум}(p)$ и рассчитывают погрешности $e_{ск}$, $e_{м}$ и $e = e_{ск} + e_{м}$ установившегося режима движения при $g(t) = \Omega_{н} \cdot t$. Как правило, погрешности значительно превышают допустимые значения, указанные в техническом задании. Чтобы обеспечить требуемую точность управления движением нагрузки с учетом момента сопротивления движению рассчитывают необходимый (желаемый) коэффициент усиления разомкнутой системы.

Коэффициент рекомендуется вычислять по формулам для следующих типовых режимов движения:

– вращение вала нагрузки с постоянной угловой скоростью $g(t) = \Omega_{н} \cdot t$

$$K_{жс} \geq \frac{\Omega_{н} + \left(\frac{1}{\beta q^2 \eta} \right) M_{н}}{e_{дон}}; \quad (3.1)$$

- движение вала нагрузки по гармоническому закону $g(t) = G \cdot \sin \omega_p \cdot t$

$$K_{жс} \geq \frac{\sqrt{2} \Omega_{н} + \left(\frac{1}{\beta q^2 \eta} \right) M_{н}}{e_{дон}}, \quad (3.2)$$

где $\Omega_{н} = G \cdot \omega_p$.

Затем уточняют коэффициент усиления предварительного усилителя и последовательно соединенных с ним устройств преобразования электрических сиг-

налов, определяют максимальное рассогласование, в пределах которого системе считают линейной. Для линейной системы записывают передаточную функцию разомкнутой системы $K(p)$, строят асимптотические ЛАЧХ $L(\omega)$, $\varphi(\omega)$ и оценивают устойчивость.

Если система устойчива, то посредством ее моделирования в среде Matlab устанавливают основные показатели качества: перерегулирование $\sigma\%$, время переходного процесса $t_{\text{пп}}$, показатель колебательности M и принимают обоснованное решение по синтезу корректирующих устройств.

Пример 3.1. Построить структурную схему системы управления, оценить ее устойчивость и качественные показатели, если даны функционально необходимые элементы системы: измерительный преобразователь рассогласования – потенциометрический на двух потенциометрах ПТП-1 ($\varphi_p = 6,1 \text{ рад}$, $R = 2,5 \text{ кОм}$, $P = 1 \text{ Вт}$, $\omega = 4$); асинхронный двухфазный электродвигатель ДИД-3ТА ($U_{\text{НОМ}} = 30 \text{ В}$, $\omega_{\text{ДНОМ}} = 607 \text{ с}^{-1}$, $M_{\text{НОМ}} = 56 \cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{\text{ПНОМ}} = 160 \cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{м}$, $J_{\text{Д}} = 24 \cdot 10^{-8} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$); редуктор привода ($q = 5200$, $\eta = 0,8$); допустимая среднеквадратическая ошибка измерительного преобразователя $e_{\text{И}} = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$; допустимая погрешность управления системы в установившемся режиме $e_{\text{У}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ при $M_{\text{Н}} = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $J_{\text{Н}} = 20 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $\Omega_{\text{Н}} = 0,12 \text{ рад/с}$.

Решение. Структурная схема, системы показанная на рисунке 3.1, построена путем замены каждого функционального элемента соответствующей передаточной функцией, рекомендуемой, например, в приложении А. Полагаем, что между измерительным преобразователем и двигателем включены безынерционные устройства преобразования и усиления с передаточной функцией $K_{\text{У}}(p) = K_{\text{У}}$.

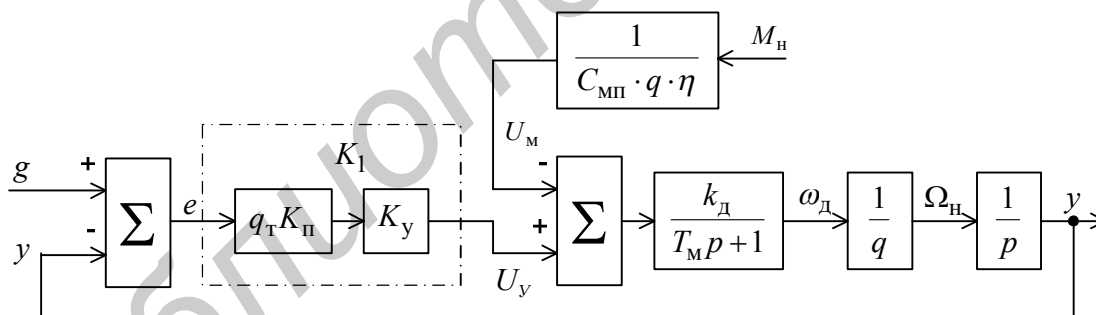


Рис. 1

Численные значения параметров схемы находим в следующей последовательности.

Определим передаточное число ускоряющего редуктора q_{T} . Для этого сначала найдем статическую ошибку потенциометра:

$$e_{\text{П}} = \frac{1}{57,3\omega} = \frac{1}{57,3 \cdot 4} = 4,36 \cdot 10^{-3} \text{ рад.} \quad (1)$$

Затем определяем среднеквадратическую ошибку измерительного преобразователя, состоящего из пары потенциометров:

$$e_{\text{ип}} = \sqrt{e_{\text{п}}^2 + e_{\text{п}}^2} = e_{\text{п}} \sqrt{2} = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ рад.} \quad (2)$$

Чтобы обеспечить требуемую точность не менее $1,74 \cdot 10^{-3}$ рад, необходимо иметь ускоряющий редуктор с передаточным числом $q_{\text{T}} = (6,17 \cdot 10^{-3} / 1,74 \cdot 10^{-3}) = 3,55$. Таким образом, принимаем $q_{\text{T}} = 4$.

Коэффициент преобразования потенциометра находим по формуле $K_{\text{п}} = 2 U_{\text{п}} / \varphi_{\text{р}}$, где $U_{\text{п}} \leq 1/2 \sqrt{PR} = 1/2 \sqrt{1 \cdot 2500} = 25$ В. Принимаем $U_{\text{п}} = 24$ В и определяем

$$K_{\text{п}} = \frac{2 \cdot 24}{6,1} = 7,87 \frac{\text{В}}{\text{рад}}. \quad (3)$$

Коэффициент передачи двигателя по моменту:

$$C_{\text{мп}} = \frac{M_{\text{п ном}}}{U_{\text{у ном}}} = \frac{160 \cdot 10^{-4}}{30} = 5,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{В}}. \quad (4)$$

Коэффициент демпфирования:

$$\beta = \frac{M_{\text{п ном}} - M_{\text{ном}}}{\omega_{\text{д ном}}} = \frac{(160 - 56) \cdot 10^{-4}}{607} = 0,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}. \quad (5)$$

Коэффициент передачи двигателя по скорости:

$$k_{\text{д}} = \frac{C_{\text{мп}}}{\beta} = \frac{5,3 \cdot 10^{-4}}{0,17 \cdot 10^{-4}} = 31 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{В}}. \quad (6)$$

Момент инерции на оси вала двигателя:

$$\begin{aligned} J &= 1,1 J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{н}}}{q^2} = 1,1 \cdot 24 \cdot 10^{-8} + \frac{20}{(5200)^2} = \\ &= 26 \cdot 10^{-8} + 74 \cdot 10^{-8} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Механическая постоянная времени привода системы:

$$T_{\text{м}} = \frac{J}{\beta} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{0,17 \cdot 10^{-4}} = 0,06 \text{ с}. \quad (8)$$

Напряжение трогания двигателя под нагрузкой:

$$U_{\text{тр}} \geq \frac{1}{C_{\text{мп}} \cdot q \cdot \eta} M_{\text{н}} = \frac{1,2}{5,3 \cdot 10^{-4} \cdot 5200 \cdot 0,8} = 0,54 \text{ В}. \quad (9)$$

Коэффициент усиления последовательно соединенных измерительного преобразователя и устройств преобразования и усиления электрических сигналов:

$$K_1 = q_T \cdot K_{\Pi} \cdot K_y = \frac{U_{\text{тр}}}{e_{\text{ип}}} = \frac{0,54}{1,74 \cdot 10^{-3}} = 310 \frac{\text{В}}{\text{рад}}. \quad (10)$$

Коэффициент усиления устройств преобразования и усиления электрических сигналов:

$$K_y = \frac{K_1}{q_T \cdot K_{\Pi}} = \frac{310}{4 \cdot 7,87} = 10. \quad (11)$$

Коэффициент усиления разомкнутой системы:

$$K_v = K_1 \cdot k_{\text{д}} \frac{1}{q} = \frac{310 \cdot 31}{5200} = 1,84 \text{ с}^{-1}. \quad (12)$$

Коэффициент усиления разомкнутой системы по моменту сопротивления нагрузки:

$$k_M = \frac{k_{\text{д}}}{\eta \cdot q^2 \cdot C_{\text{мп}}} = \frac{1}{\beta \cdot q^2 \cdot \eta} = \frac{1}{0,17 \cdot 10^{-4} \cdot (5200)^2 \cdot 0,8} = 0,27 \cdot 10^{-2} \frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}}. \quad (13)$$

Для найденных численных значений параметров преобразуем структурную схему к виду, представленному на рисунке 3.2.

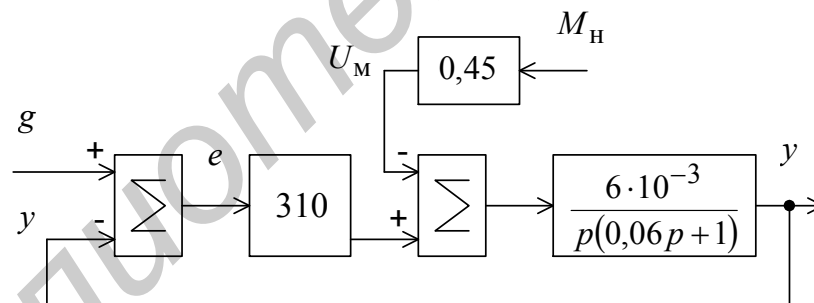


Рис. 2

В соответствии с этой схемой запишем передаточные функции: разомкнутой системы

$$K(p) = \frac{y(p)}{e(p)} = \frac{1,86}{p(0,06p + 1)}; \quad (14)$$

замкнутой системы по ошибке управления

$$K_{eg}(p) = \frac{e(p)}{g(p)} = \frac{1}{1 + K(p)} = \frac{p(1 + 0,06p)}{p(0,06p + 1) + 1,8}; \quad (15)$$

замкнутой системы по возмущению (моменту сопротивления нагрузки)

$$K_{\text{ум}}(p) = \frac{y(p)}{M_{\text{н}}(p)} = \frac{0,45 \cdot 6 \cdot 10^{-3} / p(0,06p + 1)}{1 + K(p)} = \frac{0,27 \cdot 10^{-2}}{p(0,06p + 1) + 1,8}. \quad (16)$$

Используя формулу (15), находим установившуюся ошибку системы по скорости при $y(t) = \Omega_{\text{н}} t = 0,12t$

$$\begin{aligned} e_{\text{ск}} &= \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot g(p) K_{\text{ег}}(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{0,12}{p^2} \frac{p(0,06p + 1)}{p(0,06p + 1) + 1,8} = \\ &= \frac{0,12}{1,8} = 6,7 \cdot 10^{-2} \text{ рад.} \end{aligned} \quad (17)$$

Аналогично используя формулу (15), определяем установившуюся ошибку системы, обусловленную моментом сопротивления нагрузки:

$$\begin{aligned} e_{\text{м}} &= \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot M_{\text{н}}(p) \cdot K_{\text{ум}}(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{1,2}{p} \frac{0,27 \cdot 10^{-2}}{p(0,06p + 1) + 1,8} = \\ &= \frac{1,27 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2}}{1,8} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ рад.} \end{aligned} \quad (18)$$

Суммарная погрешность установившегося режима движения:

$$e = e_{\text{ск}} + e_{\text{м}} = 6,7 \cdot 10^{-2} + 0,18 \cdot 10^{-2} = 6,9 \cdot 10^{-2} \text{ рад,} \quad (19)$$

что значительно превышает допустимую погрешность $e_{\text{доп}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ рад.

Чтобы обеспечить заданную точность, увеличим коэффициент усиления разомкнутой системы, численное значение которого рассчитаем по формуле

$$K_{\text{ж}} \geq \frac{\Omega_{\text{н}} + k_{\text{м}} M_{\text{н}}}{e_{\text{доп}}} = \frac{0,12 + 0,27 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2}{1,4 \cdot 10^{-3}} = 88 \text{ с}^{-1}. \quad (20)$$

Уточняем коэффициент усиления устройств преобразования и усиления электрических сигналов:

$$K_{\text{у}} = \frac{K_{\text{ж}} \cdot q}{q_{\text{т}} \cdot K_{\text{п}} \cdot k_{\text{д}}} = \frac{88 \cdot 5200}{4 \cdot 7,87 \cdot 31} = 470. \quad (21)$$

Определяем максимальное рассогласование (ошибку e_{max}), при котором систему можно считать линейной:

$$e_{\text{max}} = \frac{U_{\text{д ном}}}{q_{\text{т}} \cdot K_{\text{п}} \cdot k_{\text{д}}} = \frac{30}{4 \cdot 7,87 \cdot 31} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ рад.} \quad (22)$$

Следовательно, в переходном процессе перерегулирование не должно превышать численное значение

$$\sigma \leq \frac{e_{\max} - e_{\text{доп}}}{e_{\max}} 100\% = \frac{2 \cdot 10^{-3} - 1,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} 100\% = 42\% . \quad (23)$$

Оценим запас устойчивости по фазе и показатели качества системы в переходном режиме. С этой целью по передаточной функции

$$K(p) = \frac{88}{p(0,06p + 1)} \quad (24)$$

построим асимптотическую АЧХ $L(\omega)$ и $\varphi(\omega) = -90^\circ - \text{arctg } 0,06\omega$ (рисунок 3).

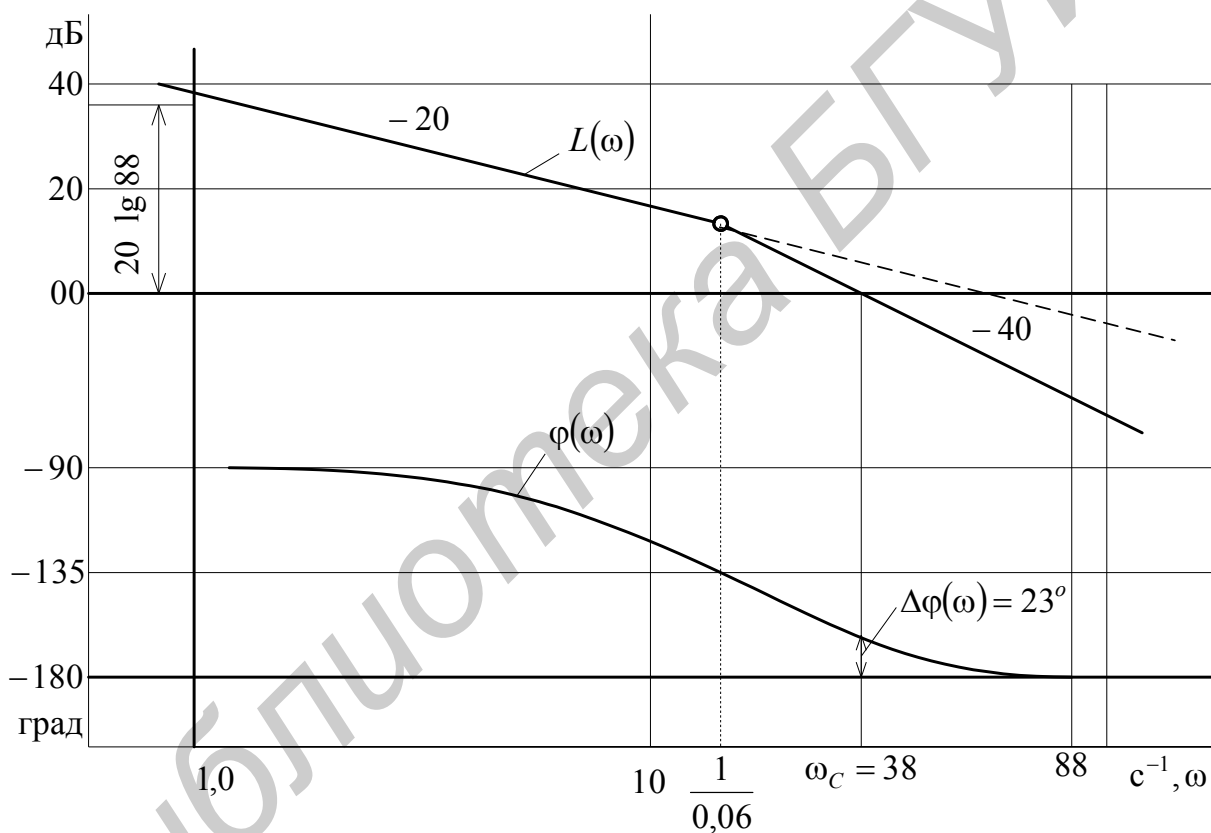


Рис. 3

Из рисунка видно, что система устойчива, однако обладает низким запасом устойчивости по фазе ($\Delta\varphi = 23$ град). Кроме этого, ось нулевого усиления на частоте $\omega_c = 38 \text{ с}^{-1}$ пересекает асимптота $L(\omega)$, имеющая наклон минус 40 дБ/дек. Эти факты указывают на то, что в системе существует колебательный затухающий процесс. Параметры переходного процесса $t_{\text{п}}$, σ % и M оцениваются путем моделирования системы в среде Matlab. Результат моделирования – переходной процесс нескорректированной системы – представлен на рисунке 4.

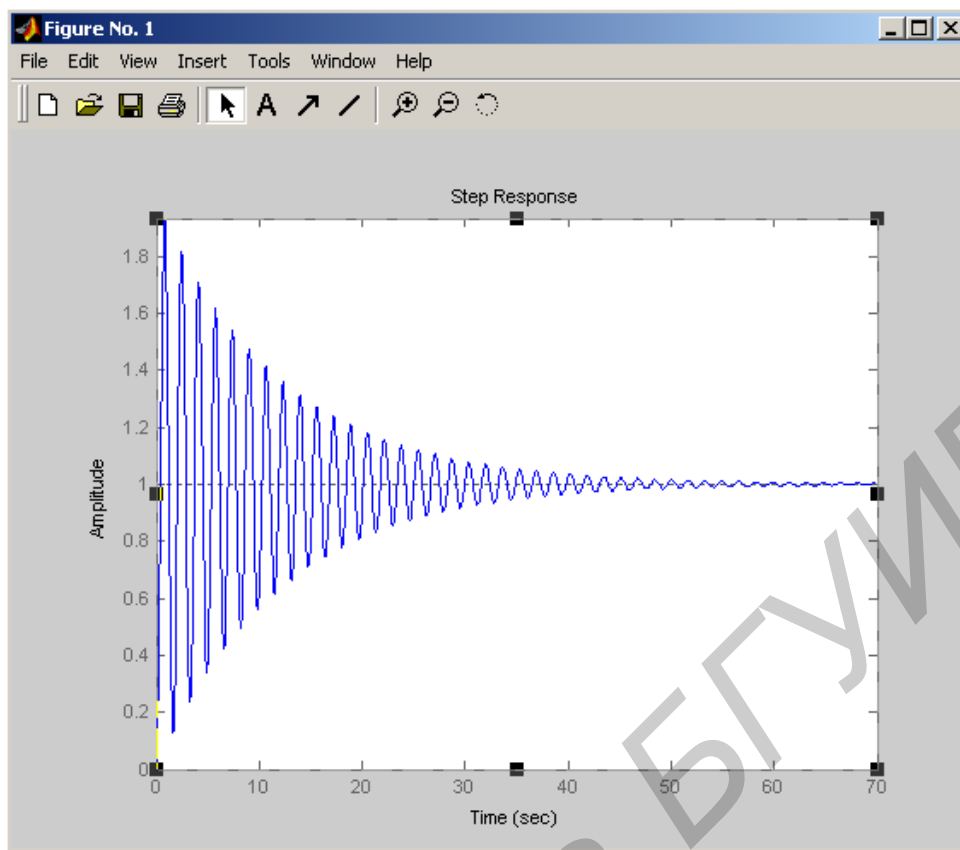


Рис. 4

3.2 Формирование желаемой передаточной функции $K_{\text{ж}}(p)$ разомкнутой системы

Передаточная функция $K_{\text{ж}}(p)$ определяется видом передаточной функции проектируемой системы $K(p)$, состоящей из функционально необходимых элементов, характером задающего воздействия $g(t)$ и показателями качества проектируемой системы.

Вид желаемых передаточных функций для типовых систем управления с астатизмом первого порядка, представленных в курсовых работах, приведен в таблице 3.1, а в таблице 3.2 – соотношения между качественными показателями желаемой системы. В техническом задании указаны отдельные показатели. При необходимости можно использовать и другие показатели таблицы 3.2.

Расчет параметров $K_{\text{ж}}(p)$ производят по желаемым асимптотическим или обратным логарифмическим частотным характеристикам.

Таблица 3.1 – Передаточные функции $K(p)$ и соответствующие им желаемые передаточные функции $K_{\text{ж}}(p)$

$K(p)$	$K_{\text{ж}}(p)$
$K(p) = \frac{K_{\text{ж}}}{p(T_{\text{М}}p+1)}, \quad K_{\text{ж}} > \frac{1}{T_{\text{М}}}$	$K_{\text{ж}}(p) = \frac{K_{\text{ж}}(T_2p+1)}{p(T_1p+1)(T_3p+1)}$
$K(p) = \frac{K_{\text{ж}}}{p(T_{\text{я}}T_{\text{М}}p^2 + T_{\text{М}}p+1)}$ или $K(p) = \frac{K_{\text{ж}}}{p(T'_1p+1)(T'_2p+1)}$	$K_{\text{ж}}(p) = \frac{K_{\text{ж}}(T_2p+1)}{p(T_1p+1)(T_3p+1)(T_4p+1)}$
$K(p) = \frac{K_{\text{ж}}}{p(T_{\text{сп}}p+1)(T_{\text{я}}T_{\text{М}}p^2 + T_{\text{М}}p+1)}$ или $K(p) = \frac{K_{\text{ж}}}{p(T_{\text{сп}}p+1)(T'_1p+1)(T'_2p+1)}$	$K_{\text{ж}}(p) = \frac{K_{\text{ж}}(T_2p+1)}{p(T_1p+1)(T_3p+1)(T_4p+1)(T_5p+1)}$

Таблица 3.2 – Соотношения между качественными показателями для передаточных функций $K_{\text{ж}}(p)$

M	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$\sigma, \%$	18,8	20,3	26,5	32,0	37,2
b	2,2	3,0	3,6	4,2	5,1
$\Delta\varphi(\omega_c), \text{град}$	55,0	50,0	46,0	42,0	39,0
$\omega_{\varepsilon} \cdot t_{\text{пп}}$	7,75	6,3	5,85	5,6	5,45
$\omega_{\varepsilon} \cdot T_2$	3,32	2,45	2,08	1,87	1,73

При выполнении курсового проекта можно использовать и другие методики построения желаемых характеристик, в том числе автоматизированный расчет на ЭВМ, или упрощенную методику расчета параметров по приведенным ниже формулам. Формулы получены на основе известных связей параметров $K_{\text{ж}}(p)$ с параметрами желаемой асимптотической ЛЧХ $L_{\text{ж}}(\omega)$, показанной на рисунке 3.1:

$$K_{\text{ж}} = \frac{\Omega_{\text{н max}} + \left(\frac{1}{q}\right)k_{\text{М}}M_{\text{с}}}{e_{\text{max}}}, \quad (3.3)$$

$$T_1 = \frac{K_{\text{ж}} \cdot e_{\text{max}}}{e_{\text{н max}}}, \quad T_2 = \sqrt{\frac{e_{\text{max}}}{e_{\text{н max}}} \cdot \frac{M}{M-1}}, \quad (3.4)$$

$$T_3 \cong 0,1T_2, \quad T_4 = \frac{T_3}{\alpha}, \quad (3.5)$$

где $2 < \alpha < 5$. Конкретное значение α выбирают таким образом, чтобы высокочастотная асимптота $L_{ж}(\omega)$ совпадала с высокочастотной асимптотой $L(\omega)$.

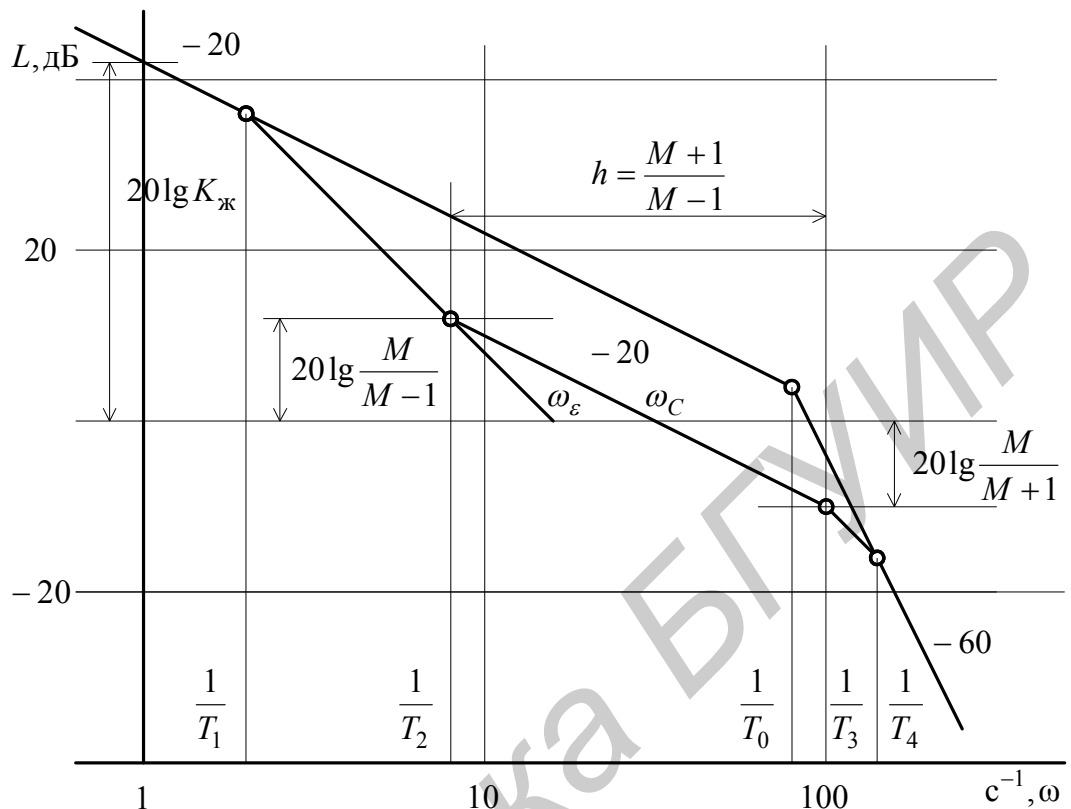


Рис. 3.1

Если ограничено время переходного процесса, то можно использовать следующие выражения:

$$\omega_c \geq \frac{b \cdot \pi}{t_m}, \quad T_1 = \frac{K_{жс}}{\omega_c^2} \cdot \frac{M}{M-1} \quad (3.6)$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_c} \cdot \frac{M}{M-1}, \quad T_3 \cong 0,1 \cdot T_2, \quad T_4 = \frac{T_3}{a}. \quad (3.7)$$

Пример 3.2. Сформировать желаемую передаточную функцию $K_{ж}(p)$ для системы с передаточной функцией

$$K(p) = \frac{K}{p(T_я T_M p^2 + T_M p + 1)}, \quad (1)$$

где $K = 32 \text{ c}^{-1}$, $T_я = 0,008 \text{ с}$, $T_M = 0,02 \text{ с}$. На систему действует момент сопротивления нагрузки, пересчитанный к валу двигателя $M_c = 0,175 \text{ Н·м}$. Коэффициент передачи двигателя

по моменту $k = 55,6 \text{ рад/Н·м}$. Передаточное число редуктора $q = 232$. В установившемся режиме движения с постоянной скоростью $\Omega_{p \max} = 0,2 \text{ рад/с}$ при $M_c = 0,175 \text{ Н·м}$. Система должна обеспечить погрешность $e_{\max} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$, не более. В переходном режиме $t_{\text{пн}} \leq 0,2 \text{ с}$ и $\sigma \leq 20 \%$.

Решение. По таблице 3.1 для выражения (1) выбираем желаемую переходную функцию:

$$K_{\text{ж}}(p) = \frac{K_{\text{ж}}(T_2 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}. \quad (2)$$

Находим желаемый коэффициент усиления

$$K_{\text{ж}} = \frac{\Omega_{\text{н max}} + \left(\frac{1}{q}\right) k_{\text{м}} M_{\text{с}}}{e_{\max}} = \frac{0,2 + \left(\frac{1}{232}\right) 55,6 \cdot 0,175}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 97,8 \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

Принимаем $K_{\text{ж}} = 100 \text{ с}^{-1}$.

Частота среза при $\sigma \leq 20 \%$:

$$\omega_c = \frac{b \cdot \pi}{t_{\text{нн}}} = \frac{3\pi}{0,2} = 47,1 \text{ с}^{-1}. \quad (4)$$

Принимаем $\omega_c = 50 \text{ с}^{-1}$.

Значению $\sigma = 20 \%$ соответствует показатель колебательности $M = 1,2$. Поэтому

$$T_1 = \frac{K_{\text{жс}} \cdot M}{\omega_c^2 \cdot (M - 1)} = \frac{100}{50^2} \cdot \frac{1,2}{1,2 - 1} = 0,24 \text{ с}; \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_c} \cdot \frac{M}{M - 1} = \frac{1}{50} \cdot \frac{1,2}{1,2 - 1} = 0,12 \text{ с}; \quad (6)$$

$$T_3 \cong 0,1 \cdot T_2 = 0,1 \cdot 0,12 = 0,012 \text{ с}. \quad (7)$$

Из условия $K_{\text{ж}}(p) = K(\omega)$ при $\omega \geq 1/T_4$ находим

$$T_4 = \frac{T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}} \cdot T_2}{T_1 \cdot T_3} = \frac{0,008 \cdot 0,02 \cdot 0,12}{0,24 \cdot 0,012} = 0,0067 \text{ с}. \quad (8)$$

Следовательно,

$$K_{\text{ж}}(p) = \frac{100(0,12p + 1)}{p(0,24p + 1)(0,012p + 1)(0,0067p + 1)}. \quad (9)$$

3.3 Синтез передаточных функций корректирующих устройств

При синтезе необходимо стремиться к тому, чтобы корректирующие устройства обеспечивали наиболее близкие к желаемым динамические свойства проектируемой системы; поддерживали эти свойства неизменными при изменении параметров функционально необходимых элементов, например T_M (J_M) электропривода; содержали минимальное число звеньев и были физически реализуемыми. На этом этапе необходимо разрабатывать несколько вариантов корректирующих устройств и анализировать их с целью наилучшего выбора.

Вариант 1. Использование последовательных корректирующих устройств в прямой цепи системы управления.

В этом случае записывают $K_{ж}(p) = K_{ку}(p) \cdot K(p)$, находят передаточную функцию корректирующего устройства

$$K_{ку}(p) = K_{ж}(p) / K(p) \quad (3.8)$$

и анализируют ее. Если техническая реализация звеньев передаточной функции $K_{ку}(p)$ не вызывает затруднений, а параметры системы стабильны, то приступают к проектированию принципиальной схемы коррекции и расчету ее параметров.

Вариант 2. Совместное использование последовательного корректирующего устройства и корректирующего устройства в цепи обратной связи по скорости.

Этот способ применяют, если техническая реализация последовательного корректирующего устройства $K_{ку}(p)$ затруднена. Например, при

$$K(p) = \frac{K_{ж}}{p(T_я T_M p^2 + T_M p + 1)} \quad \text{и} \quad K_{ж}(p) = \frac{K_{ж}(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)} \quad \text{имеем}$$
$$K_{ку}(p) = \frac{K_{ж}(p)}{K(p)} = \frac{(T_2 p + 1)(T_я T_M p^2 + T_M p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}, \quad (3.9)$$

где $T_я'$ и T_M' – постоянные времени корректирующего устройства, численно равные постоянным времени электродвигателя. Ясно, что реализовать корректирующее устройство с передаточной функцией (3.9) крайне сложно.

Структурная схема скорректированной системы должна иметь вид, показанный на рисунке 3.2, где $k_1 K_1(p)$ – передаточная функция последовательного корректирующего устройства, реализуемого в виде фильтра; $k_{о.с} K_{о.с}(p)$ – передаточная функция корректирующей обратной связи с коэффициентом усиле-

ния $k_{o.c}$; $k_2 K_2(p)$ – передаточная функция звеньев системы с коэффициентом усиления k_2 , охваченных обратной связью.

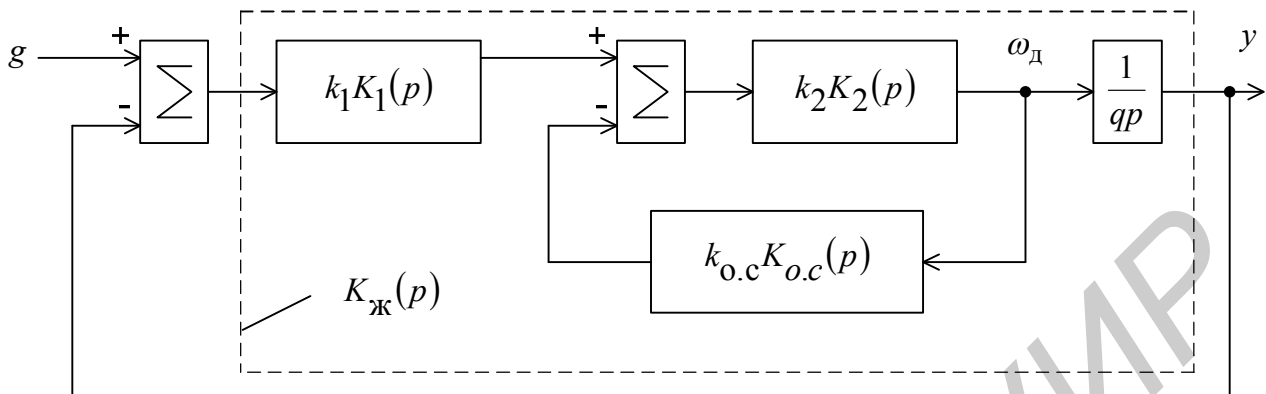


Рис. 3.2

Согласно схеме

$$K_{\text{ж}}(p) = k_1 K_1(p) \frac{k_2 K_2(p)}{1 + k_{o.c} k_2 K_2(p) K_{o.c}(p)} \cdot \frac{1}{qp}. \quad (3.10)$$

Представляя $K_{\text{ж}}(p)$ в виде

$$K_{\text{ж}}(p) = \frac{\left(\frac{k_1}{q}\right) k_2 (T_2 p + 1)}{p (T_1 p + 1) (T_3 p + 1) (T_4 p + 1)}, \quad (3.11)$$

где $\left(\frac{k_1}{q}\right) k_2 = K_{\text{ж}}$, и, приравнявая правые части выражений (3.10) и (3.11), находим

$$K_1(p) = \frac{(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)}, \quad (3.12)$$

$$\frac{k_2 K_2(p)}{1 + k_{o.c} k_2 K_2(p) K_{o.c}(p)} = \frac{1}{(T_3 p + 1) (T_4 p + 1)}. \quad (3.13)$$

Определить $k_2 K_{o.c}(p)$ можно методом обратных ЛЧХ или с помощью программ на ЭВМ. В том случае, когда

$$k_2 K_2(p) = \frac{k_2}{T_{\text{я}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1}, \quad (3.14)$$

передаточная функция корректирующей обратной связи имеет вид

$$k_{o.c}K_{o.c}(p) = k_{o.c}(1 + T_{o.c}p), \quad (3.15)$$

где $k_{o.c}$ и $T_{o.c}$ определяют по формулам

$$k_{o.c} = \frac{1}{k_2} \left(\frac{T_я T_M}{T_3 T_4} - 1 \right), \quad (3.16)$$

$$T_{o.c} = T_M \left(\frac{T_я(T_3 + T_4) - T_3 T_4}{T_я T_M - T_3 T_4} \right). \quad (3.17)$$

Вариант 3. Последовательная коррекция с помощью регуляторов в следящих системах программного управления.

Расчет регуляторов ведется в следующей последовательности – сначала регулятор тока, затем скорости и положения.

В регуляторе тока реализуют пропорционально-интегральный закон управления. Передаточная функция регулятора:

$$K_{p.t}(p) = K_{p.t} \frac{T_{p.t}p + 1}{T_{p.t}p}, \quad (3.18)$$

где $K_{p.t}$ и $T_{p.t}$ вычисляют по формулам

$$T_{p.t} = T_я; K_{p.t} = \frac{T_я C_e \omega_{д ном}}{K_{д.т} K_{с.п} (0,01 \dots 0,03) I_{я ном}}. \quad (3.19)$$

В формуле (3.19) $K_{д.т} = (U_{д.т} \cdot M_{д ном}) / (I_{я ном} \cdot M_{д max})$; $U_{д.т} = 10$ В – нормированное напряжение датчика.

Контур тока обладает, как правило, высоким быстродействием, поэтому при дальнейших расчетах следует полагать его передаточную функцию $K_{к.т}(p) = 1/K_{д.т}$.

В регуляторе скорости реализуют пропорционально-интегральный закон управления с целью ослабить влияние момента M_c на точность управления скоростью двигателя или пропорциональный закон, если влияние M_c мало.

При

$$K_{p.c}(p) = K_{p.c} \frac{T_{p.c}p + 1}{T_{p.c}p} \quad (3.20)$$

передаточная функция контура скорости имеет вид

$$K_{к.с}(p) = \frac{1}{K_{д.с}} \cdot \frac{T_{р.с}p + 1}{T_{р.с}^2 p^2 + T_{р.с}p + 1}, \quad (3.21)$$

где $K_{д.с} = U_{д.с}/\omega_{д \max}$ – коэффициент обратной связи по скорости; $U_{д.с} = 10$ В – нормированное напряжение.

Введем коэффициент β , который рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{T_m}{T_{р.с}} \cdot \frac{K_{д.м.}}{K_{д.с}} \cdot \frac{\beta}{C_m K_{р.с}}. \quad (3.22)$$

Полагаем, что

$$\alpha T_{р.с}^2 p^2 + T_{р.с}p + 1 = (T_3 p + 1)(T_4 p + 1), \quad (3.23)$$

и находим

$$\alpha = \frac{T_3 T_4}{(T_3 + T_4)^2}, \quad T_{р.с} = T_3 + T_4, \quad (3.24)$$

откуда

$$K_{р.с}(p) \geq \frac{T_m(T_3 + T_4)}{T_3 T_4} \cdot \frac{K_{д.т.}}{K_{д.с}} \cdot \frac{B}{C_m}. \quad (3.25)$$

Следовательно,

$$K_{к.с}(p) = \frac{1}{K_{д.с}} \cdot \frac{(T_3 + T_4)p + 1}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}. \quad (3.26)$$

Передаточную функцию регулятора положения $K_{р.п}$ находим из равенства

$$K_{р.п}(p) \frac{1}{K_{д.с}} \cdot \frac{(T_3 + T_4)p + 1}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)} \cdot \frac{1}{qp} = \frac{K_{ж}(T_2 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}, \quad (3.27)$$

где

$$K_{р.п}(p) = K_{р.п} \frac{(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)[(T_3 + T_4)p + 1]}, \quad (3.28)$$

$$K_{р.п} = K_{ж} \cdot K_{д.с} \cdot q. \quad (3.29)$$

3.4 Исследование скорректированной системы

Правильность выбора корректирующих устройств и расчета их параметров проверить путем моделирования структурной схемы скорректированной системы управления в среде Matlab. Наблюдая в системе переходной процесс на единичное ступенчатое воздействие $g(t) = 1[t]$ при $M_c = 0$, определить основные показатели качества и сравнить их с заданными в техническом задании. При расхождении показателей более чем на 10 % уточнить структуру и параметры корректирующих устройств.

Оценить ошибки установившегося режима движения при $g(t) = \Omega_n \cdot t \cdot 1[t]$ и $M_c(t) = M_c \cdot 1[t]$, при $g(t) = G \sin \omega_p t$.

Определить элемент структуры, нелинейная характеристика которого может оказать существенное влияние на поведение системы. Составить структурную схему элемента и включить ее в структурную схему скорректированной системы. Оценить влияние нелинейного элемента при больших начальных расстройках на устойчивость и качество переходного процесса,

При дискретной реализации корректирующих устройств в схему моделирования вводится элемент задержки с передаточной функцией

$$e^{-pT} = \frac{1 - p \frac{T}{2}}{1 + p \frac{T}{2}}. \quad (3.30)$$

При этом необходимо наблюдать переходной процесс в системе для различных периодов дискретизации T и определить значение этого параметра, при котором система сохраняет показатели качества в заданных пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский В.А., Попов Е.А. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975.
2. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1985.
3. Руководство по проектированию систем автоматического управления/ Под ред. В.А. Бесекерского.– М.: Высш.шк., 1983.
4. Сольнищев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления. – М.: Высш. шк., 1991. – 355 с.
5. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Control System Toolbox. Matlab 5 для студентов/ Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 287 с.
6. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
7. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / Под общ. ред. Е.А. Санковского. – Мн: Выш.шк., 1973.
8. Руководство по дипломному проектированию для студентов специальности «Автоматическое управление в технических системах»: В 3 ч. Ч.1. Общие требования к пояснительной записке/ Сост. А.Т. Доманов, Н.И. Сорока. – Мн.: БГУИР, 2003. – 43 с.
9. Коровин В.Г. и др. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами: Учеб.пособие для вузов / В.Г. Коровин, Г.И. Прокофьев, Л.Н. Рассудов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 352 с.
10. Смирнова В.И., Разинцев В.И. Проектирование и расчет автоматизированных приводов: Учебник для сред. спец. учеб. заведений. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

А.1 Электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Структурная схема электропривода с передачей вращательного движения нагрузки приведена на рисунке А.1, где обозначено: $U_{я}$ – напряжение на обмотке якоря; E – противоЭДС двигателя; $R_{я}$ – активное сопротивление обмотки якоря; $T_{я} = L_{я}/R_{я}$ – электромагнитная постоянная времени цепи якорной обмотки; $I_{я}$ – ток, протекающий в обмотке якоря; $C_{м} = M_{д\text{ном}}/I_{я\text{ном}}$ – коэффициент момента двигателя; $C_{е} = (U_{я} - R_{я}I_{я})/\omega_{д\text{ном}}$ – коэффициент противоЭДС; $M_{д}$ – вращающий момент, развиваемый двигателем; $M_{с} = \frac{M_{н}}{q\eta}$ – статический момент сопротивления нагрузки движению, приведенный к валу двигателя; $J = 1,2J_{д} + J_{н}/q^2$ – момент инерции вращающихся частей двигателя, редуктора и нагрузки, приведенный к оси вала двигателя; q – передаточное число редуктора, связывающего вал двигателя с валом нагрузки; $\varepsilon_{д}$ и $\omega_{д}$ – угловое ускорение и скорость вала двигателя; $\Omega_{н}$ и $\varphi_{н}$ – угловая скорость и угол поворота вала нагрузки (управляемые переменные).

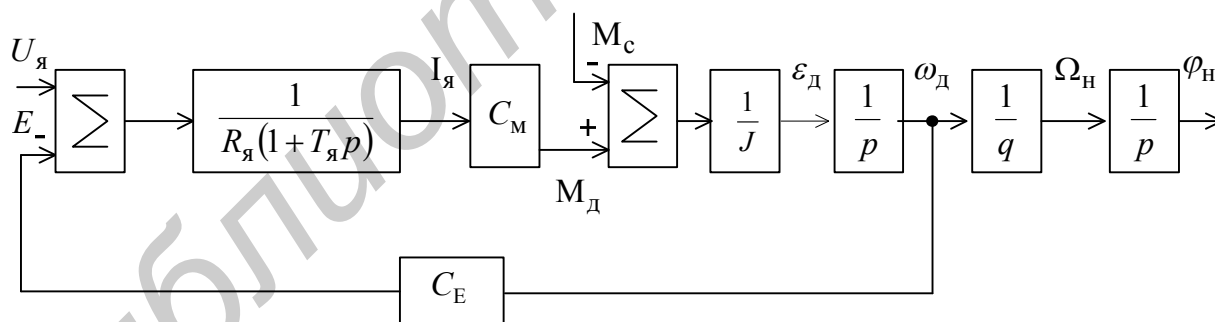


Рис.А.1

Для аналитических расчетов структурную схему преобразуют к виду, изображенному на рисунке А.2, и по номинальным данным двигателя определяют:

- коэффициент преобразования двигателя по скорости

$$k_{д} = 1/C_{е} ; \tag{A.1}$$

- коэффициент преобразования двигателя по моменту

$$k_{м} = 1/\beta ; \tag{A.2}$$

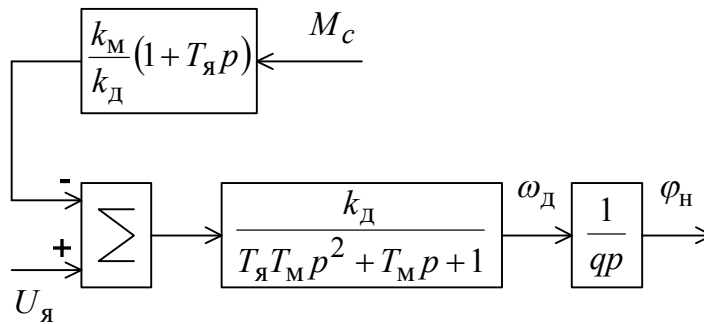


Рис. А.2

- механическую постоянную времени

$$T_M = J/\beta; \quad (\text{A.3})$$

- напряжение трогания двигателя под нагрузкой

$$U_{\text{тр}} = (k_M/k_D)M_c. \quad (\text{A.4})$$

Номинальные данные электродвигателей постоянного тока приведены в таблицах А.1 и А.2.

Сопоставляют постоянные времени T_M и $T_я$. Если $T_я \leq 0,1T_M$, то полагают $T_я = 0$. Если $T_M \geq 4T_я$, то знаменатель передаточной функции разлагают на множители

$$T_я T_M p^2 + T_M p + 1 = (T_{д1} p + 1)(T_{д2} p + 1) \quad (\text{A.5})$$

и находят численные значения постоянных времени $T_{д1}$ и $T_{д2}$.

Передаточное число редуктора q (если оно не указано в задании) определяют по формулам:

для привода с высокомоментным двигателем

$$q = \frac{\omega_{\text{дmax}}}{\Omega_{\text{нmax}}} \quad \text{или} \quad q = \frac{\omega_{\text{дmax}}}{V_{\text{нmax}}}; \quad (\text{A.6})$$

для привода с другим типом электродвигателя

$$q = \frac{\omega_{\text{дном}}}{\Omega_{\text{нmax}}}, \quad q = \frac{\omega_{\text{дном}}}{V_{\text{нmax}}} \quad (\text{A.7})$$

или

$$q = \sqrt{\frac{M_H + J_{H^{\epsilon_H}}}{J_{\delta^{\epsilon_H}}}} \quad (\text{A.8})$$

Таблица А.1 – Технические данные двигателей постоянного тока

Параметр	Тип электродвигателя				
	СЛ-569	СЛ-621	ДПР-62-03	ДПР-72-03	МИГ 25Б
Номинальный момент $M_{д ном}$, Н·м	0,465	0,687	0,02	0,04	0,04
Номинальная угловая скорость $\omega_{д ном}$, с ⁻¹	377	250	628	628	590
Номинальное напряжение $U_{я ном}$, В	110	110	12	12	12
Номинальный ток $I_{я ном}$, А	1,96	2,08	1,5	1,3	3,2
Максимальный момент $M_{д max}$, Н·м	0,91	1,23	0,225	0,382	
Момент инерции $J_{д}$, кг·м ²	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$6,62 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$0,68 \cdot 10^{-6}$
Сопротивление обмотки якоря $R_{я}$, Ом	3,6	3,0	0,83	1,77	
Индуктивность якоря $L_{я}$, Гн	$30 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	–	–	

Таблица А.2 – Технические данные высокомоментных электродвигателей

Параметр	Тип электродвигателя			
	ДК1-3,5	ДПУ-127-220	ПБВ-100L	ПБВ-112М
Номинальный момент $M_{д ном}$, Н·м	3,5	2,1	10,5	17,5
Номинальная угловая скорость $\omega_{д ном}$, с ⁻¹	105	105	105	60
Номинальное напряжение $U_{я ном}$, В	65	30	56	47
Номинальный ток $I_{я ном}$, А	7,5	11	24	29
Максимальный момент $M_{д max}$, Н·м	21	21	90	104
Момент инерции $J_{д}$, кг·м ²	0,0028	0,0028	0,013	0,042
Сопротивление обмотки якоря $R_{я}$, Ом	1,15	0,8	0,14	0,12
Электромагнитная постоянная времени $T_{я}$, с	0,0035	0,0027	0,0068	0,0073
Электрохимическая постоянная времени $T_{м}$, с	0,015	0,015	0,0076	0,01

Примечания: 1. Максимальная угловая скорость электродвигателей $\omega_{д\max}=210\text{ с}^{-1}$.
 2. Двигатели оснащены тахогенератором постоянного тока.

А.2 Электропривод с двухфазным асинхронным двигателем

Структурная схема электропривода приведена на рисунке А.3, где обозначено: U_y – напряжение управления; $C_{м.п} = M_{п\text{ном}}/U_{y\text{ном}}$ – коэффициент пропорциональности между пусковым моментом и амплитудой напряжения на обмотке управления; $M_c = M_n/(q \cdot \eta)$ – приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки; $\beta = (M_{п\text{ном}} - M_{н\text{ном}})/\omega_{д\text{ном}}$ – коэффициент демпфирования; $J = 1,1J_d + J_n/q^2$ – момент инерции на оси вала двигателя; $q = \omega_{д\text{ном}}/\Omega_{н\text{max}}$ – передаточное число редуктора.

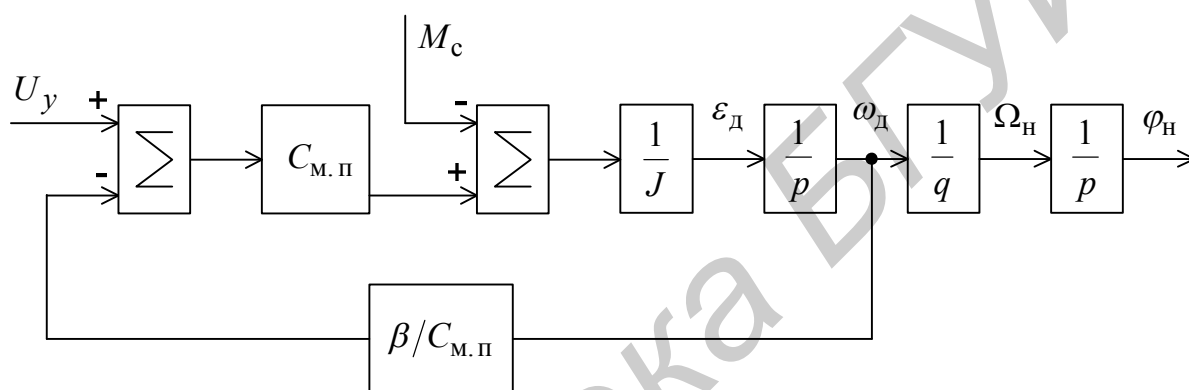


Рис. А.3

Преобразованная структурная схема, используемая при аналитических расчетах, изображена на рисунке А.4.

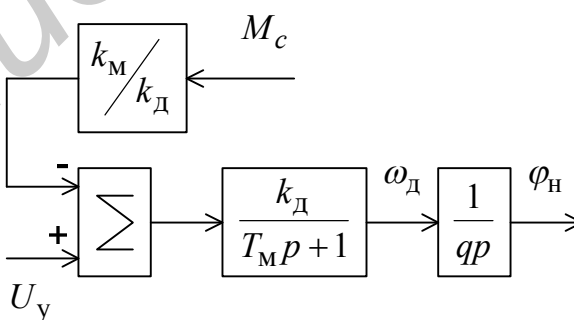


Рис. А.4

Параметры схемы определяют по номинальным данным двигателя:

– коэффициент преобразования двигателя по скорости

$$k_d = C_{м.п} / \beta; \quad (A.9)$$

– коэффициент преобразования двигателя по моменту

$$k_m = 1/\beta; \quad (A.10)$$

– напряжение трогания двигателя

$$U_{тр} = (k_m/k_d)M_c; \quad (A.11)$$

– механическая постоянная

$$T_m = J/\beta. \quad (A.12)$$

Технические данные двухфазных асинхронных двигателей, указанных в заданиях на курсовую работу, приведены в таблице А.3.

Таблица А.3 – Технические данные двухфазных асинхронных двигателей

Параметр	Тип электродвигателя			
	ДИД-3ТА	ДИД-5ТА	АДП-123Б	АДП-263А
Частота сети f , Гц	400	400	400	500
Номинальный момент $M_{д ном}$, Н·м	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$14,5 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$
Номинальная угловая скорость $\omega_{д ном}$, с ⁻¹	607	628	628	628
Номинальное напряжение управления $U_{у ном}$, В	30	30	110	275
Пусковой момент номинальный $M_{п ном}$, Н·м	$16 \cdot 10^{-3}$	$22 \cdot 10^{-3}$	$22,2 \cdot 10^{-3}$	$60 \cdot 10^{-3}$
Момент инерции ротора J_d , кг·м ²	$24 \cdot 10^{-8}$	$250 \cdot 10^{-8}$	$120 \cdot 10^{-8}$	$120 \cdot 10^{-8}$

А.3 Силовой преобразователь электрической энергии

Для питания двигателя постоянного тока применяют силовой преобразователь, работающий в импульсном режиме. Причем в приводе с низковольтным напряжением питания двигателя мощностью до 0,5 кВт применяют транзисторный широтно-импульсный преобразователь, а в приводе с высоковольтным на-

пряжением питания двигателя мощностью свыше 0,5 кВт – тиристорный преобразователь.

В общем случае структурную схему импульсного силового преобразователя можно представить в виде, показанном на рисунке А.5, где U – сигнал управления преобразователем энергии источника силового питания двигателя; $U_{\text{ср}}$ – среднее значение импульсов напряжения на обмотке якоря двигателя; $k_{\text{сп}}$ – коэффициент преобразователя; $e^{-p\tau}$ – множитель, учитывающий запаздывание изменения среднего значения напряжения $U_{\text{ср}}$ относительно момента изменения сигнала управления U .

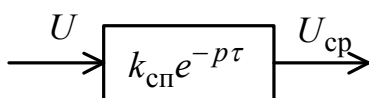


Рис. А.5

В транзисторных широтно-импульсных преобразователях $\tau = 1/f_k$, где f_k – частота коммутации транзисторов. Чтобы снизить вредное влияние запаздывания, частоту коммутации повышают до 2...10 кГц. При этом в полосе пропускания системы управления, которая может достигать 100 Гц, множитель $e^{-p\tau} \approx 1$, а поведение двигателя в динамическом режиме при импульсном управлении не отличается от поведения двигателя при непрерывном управлении.

Учитывая сказанное, передаточную функцию транзисторного широтно-импульсного преобразователя при расчетах представляют в виде

$$W_{\text{сп}}(p) = k_{\text{сп}}, \quad (\text{А.13})$$

где $k_{\text{сп}}$ – коэффициент передачи силового преобразователя, численное значение которого рассчитывают для номинального режима работы по формуле

$$k_{\text{сп}} = \gamma \frac{U_{\text{я ном}}}{U_{\text{ун}}}. \quad (\text{А.14})$$

Здесь $\gamma = t_{\text{п}}/T_k$ – скважность (коэффициент заполнения) импульсов; $t_{\text{п}}$ – длительность импульсов; T_k – период коммутации; $U_{\text{ун}}$ – унифицированный сигнал управления. При несимметричной коммутации транзисторов $\gamma = 1$, при симметричной $\gamma = 0,5$.

При расчетах рекомендуется принимать $\gamma = 1$, $U = U_{\text{ун}} = 10 \text{ В}$.

В тиристорных силовых преобразователях при соединении тиристоров по мостовой схеме

$$\tau = \frac{1}{2mf}, \quad (\text{A.15})$$

где f – частота питающей сети, а m – число фаз, используемых в схеме преобразования. При $m = 3$ и $f = 50$ Гц запаздывание $\tau = 3,3$ мс, т.е. одного порядка с электромагнитной постоянной времени $T_{\text{я}}$ двигателя. Чтобы учесть влияние запаздывания на поведение двигателя в динамическом режиме, целесообразно воспользоваться подстановкой

$$e^{-p\tau} \approx \frac{1}{1 + p\tau} \quad (\text{A.16})$$

и записывать передаточную функцию в виде

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{k_{\text{ТП}}}{1 + p\tau}. \quad (\text{A.17})$$

Здесь

$$k_{\text{ТП}} = \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{ун}}} \cos \alpha, \quad (\text{A.18})$$

где α – фазовый угол смещения импульса управления относительно точки естественной коммутации тиристора. В номинальном режиме работы $\alpha \approx 0$, следовательно, $\cos \alpha = 1$, $U_{\text{ср}} = U_{\text{я ном}}$ и

$$k_{\text{ТП}} = \frac{U_{\text{я ном}}}{U_{\text{ун}}}, \quad (\text{A.19})$$

где $U_{\text{ун}} = 10$ В – унифицированный сигнал управления преобразователем при номинальном режиме его работы.

А.4 Измерительный преобразователь рассогласования на потенциометрах

Принципиальная схема преобразователя показана на рисунке А.6, а на рисунке А.7 – его структурная схема.

Потенциометры РС и RE имеют равные диапазоны рабочих углов $\varphi_{\text{р}}$ и один класс точности. Погрешность потенциометра определяется числом витков w обмотки реостата на дуге один градус.

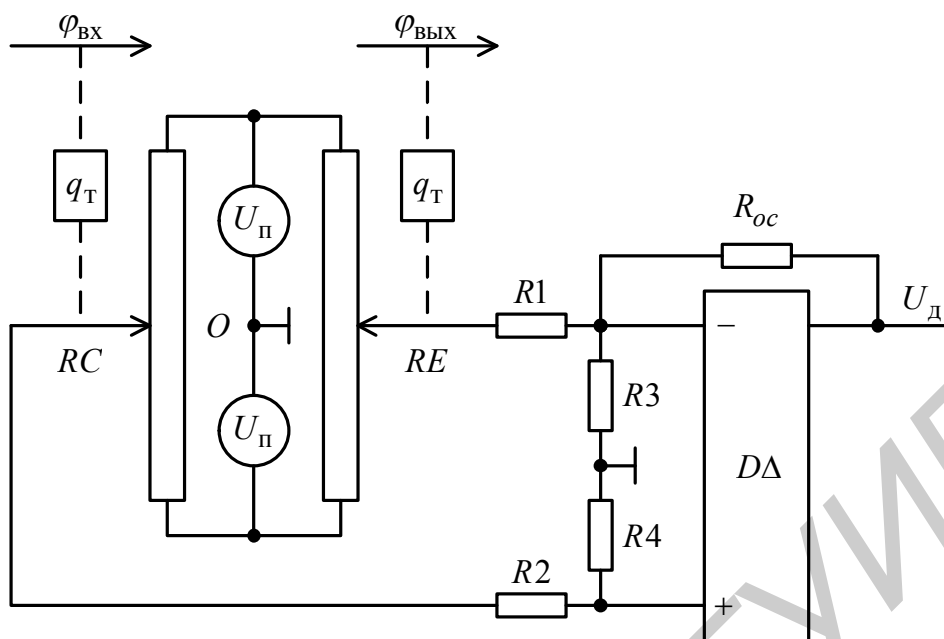


Рис. А.6

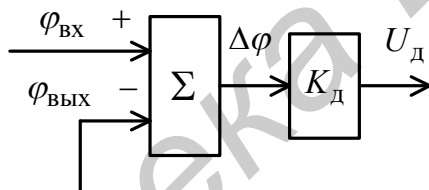


Рис. А.7

Погрешность измерителя оценивают по формуле

$$\delta_{\text{и}} = \frac{1}{q_{\text{т}}} \sqrt{\delta_{\text{RC}}^2 + \delta_{\text{RE}}^2}, \quad (\text{A.20})$$

где δ_{RC} и δ_{RE} – погрешности потенциометра-датчика (RC) и потенциометра-приемника (RE); $q_{\text{т}}$ – передаточное отношение повышающих редукторов.

Коэффициент преобразования вычисляют по формуле

$$K_{\text{д}} = q_{\text{т}} \frac{2U_{\text{п}}}{\varphi_{\text{р}}}, \quad (\text{A.21})$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания, В:

$$U_{\Pi} = \frac{1}{2} \sqrt{PR}. \quad (\text{A.22})$$

В последнем выражении обозначено: P – допустимая мощность рассеяния, Вт, R – сопротивление реостата, Ом.

Технические данные потенциометров, необходимые для расчетов, приведены в таблице А4.

Пример. Измерительный преобразователь должен обеспечить погрешность измерения $\delta_{\Pi} = 0,05$ градуса. Преобразователь построен на потенциометрах с параметрами: $\varphi_p = 350$ градусов, $R = 2,6$ кОм, $P = 1$ Вт, $\omega = 6$.

Решение. Погрешность потенциометра $\delta_{\Pi} = \frac{1}{6} = 0,167$ градуса.

Определяем передаточное отношение повышающего редуктора:

$$q_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\delta_{RC}^2 + \delta_{RE}^2}}{\delta_{\Pi}} = \frac{\sqrt{0,167^2 + 0,167^2}}{0,05} = 4,71. \quad (1)$$

Принимаем $q_{\Gamma} = 5$.

Находим требуемое напряжение для питания потенциометров:

$$U_{\Pi} \leq \frac{1}{2} \sqrt{PR} = \frac{1}{2} \sqrt{1 \cdot 2500} = 25 \text{ В} \quad (2)$$

и коэффициент преобразования:

$$K_{\Delta} = q_{\Gamma} \frac{2U_{\Pi}}{\varphi_p} = 5 \frac{2 \cdot 25}{350} = 0,714 \frac{\text{В}}{\text{град}} = 40 \frac{\text{В}}{\text{рад}}. \quad (3)$$

Максимально допустимый угол поворота задающей оси:

$$\varphi_{\text{вх max}} \leq 0,7 \frac{\varphi_p}{2q_{\Gamma}} = 0,7 \frac{350}{2 \cdot 5} = 24 \text{ градуса}, \quad (4)$$

где $0,7$ – коэффициент запаса, учитывающий возможное перерегулирование выходной оси системы управления и связанный с потенциометром-приемником измерительного преобразователя.

Таблица А.4 – Технические данные потенциометров

Тип потенциометра	ПТП-1	ПТП-2	ПП	ПЛ-1	ПК
1	2	3	4	5	6
Диапазон измерения рабочего угла φ_p , град.	350	350	320	320	Не ограничен
Сопротивление реостата R , кОм	0,2-20,0	0,2-32,0	0,1-4,0	0,5-15	1,6

Продолжение таблицы А.4

1	2	3	4	5	6
Допустимая мощность рассеяния P , Вт	1	2	5	2	3
Число витков обмотки на дуге 1 град, ω	2-8	2-12	1-3	-	2,63
Максимальная частота вращения n_{II} , об/мин	100	100	100	200	100
Необходимый вращающий момент M_{II} , Н·мм	2,6-16,5	2,9-21,5	2	2,5	6

А.5 Измерительный преобразователь рассогласования на вращающихся трансформаторах

Функциональная схема измерительного преобразователя на двух вращающихся трансформаторах, один из которых (датчик ТС) работает в режиме СКВТ, а второй (приемник ТЕ) – в амплитудно-разностном режиме, показана на рисунке А.8.

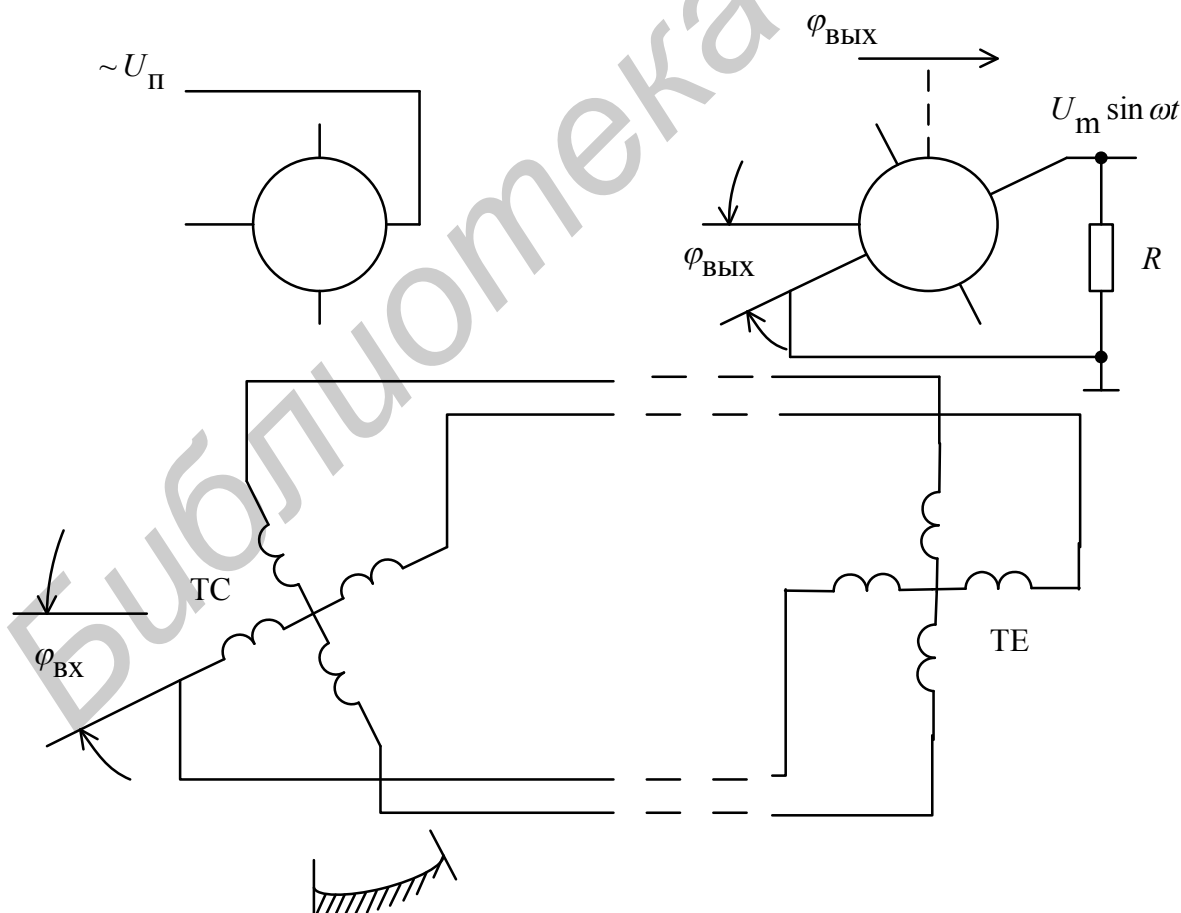


Рис. А.8

Амплитуда выходного напряжения приемника:

$$U_m = U_{\Pi} k_{TC} k_{TE} \sin(\varphi_{ВХ} - \varphi_{ВЫХ}), \quad (A.23)$$

где U_{Π} – амплитуда напряжения питания датчика ТС, В; k_{TC} и k_{TE} – коэффициенты трансформации вращающихся трансформаторов датчика ТС и приемника ТЕ соответственно; $\varphi_{ВХ} - \varphi_{ВЫХ} = e$ – рассогласование (ошибка) системы управления осью $\varphi_{ВЫХ}$.

При углах рассогласования удовлетворяющих условию $|e| \leq 20$ град. $\sin e \approx e$ и амплитуда напряжения U_d оказывается связанной с e пропорциональной зависимостью:

$$U_d = K_d \cdot e, \quad (A.24)$$

где K_d – коэффициент преобразования (чувствительность), численно равный $U_{\Pi} k_{TC} k_{TE}$, В/рад.

По формулам (A.23) и (A.24) на рисунке А.9 построена структурная схема преобразователя.

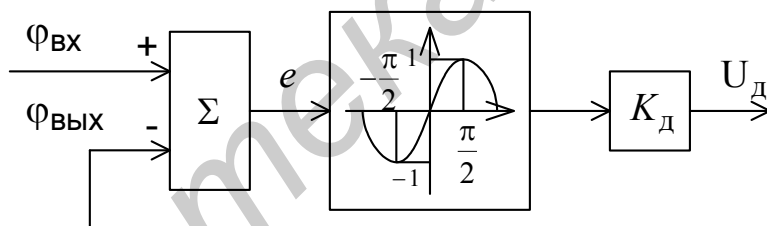


Рис. А.9

Погрешность измерительного преобразователя будет определяться по формуле

$$\delta_{И} = \sqrt{\delta_{ТС}^2 + \delta_{ТЕ}^2}, \quad (A.25)$$

где $\delta_{ТС}$, $\delta_{ТЕ}$ – погрешности датчика ТС и приемника ТЕ соответственно.

Технические данные вращающихся трансформаторов, необходимые для расчета коэффициента преобразования K_d и погрешности измерительного преобразователя $\delta_{И}$, приведены в таблице А.5.

Таблица А.5 – Технические данные вращающихся трансформаторов

Вращающийся трансформатор ВТ	Тип ВТ	Поз. обозначение	Напряжение питания $U_{\text{п}}$, В	Коэффициент трансформатора $R_{\text{Т}}$	Погрешность, угл. мин
СКТ-220-1	ВТДП-Д	ТС	36	0,22	1 кл ± 10
	ВТДП-П	ТЕ		0,56	2 кл ± 20
СКТ-225-2	ВТДП-Д	ТС	36	1,00	1 кл ± 5
	ВТДП-П	ТЕ		1,00	2 кл ± 10
БСКТ-220-11	ВТДП-Д	ТС	36	0,56	1 кл ± 20
	ВТДП-П	ТЕ		0,83	2 кл ± 30
ВТМ-1В	СКВТ	ТС	26	1,00	± 15
	ВТДП-П				
ВТ-5	СКВТ	ТС	60	0,53	± 3,0
	ВТДП-Д				
	ВТДП-П			0,96	
БСКТ-1065	ВТДП-Д	ТЕ	36	0,56	± 2,0

Пример. В измерительном преобразователе (см. рисунок А.9) используются вращающиеся трансформаторы СКТ-225-2 второго класса точности. Напряжение питания трансформатора-датчика ТС $U_{\text{п}} = 36$ В, коэффициент трансформации $k_{\text{ТС}} = k_{\text{ТЕ}} = 1$, допустимые статические ошибки $\delta_{\text{ТС}} = \delta_{\text{ТЕ}} = \pm 10$.

Решение. Определим коэффициент преобразования:

$$K_{\text{д}} = U_{\text{п}} k_{\text{ТС}} k_{\text{ТЕ}} = 36 \frac{\text{В}}{\text{рад}}$$

и статическую ошибку измерения:

$$\delta_{\text{и}} = \sqrt{\delta_{\text{ТС}}^2 + \delta_{\text{ТЕ}}^2} = \sqrt{10^2 + 10^2} = 14 \text{ угл. мин.}$$

А.6 Цифровой измерительный преобразователь рассогласования с индукционным датчиком

Функциональная схема преобразователя с индукционным датчиком, работающего в режиме СКВТ, показана на рисунке А.10.

Напряжения $U_{1\text{ТС}}$ и $U_{2\text{ТС}}$ с датчика ТС подаются на аналоговые входы устройств А1 и А2, а на их цифровые входы – коды $N_1 = N_0 \cos \varphi_{\text{вх}}$ и $N_2 = N_0 \sin \varphi_{\text{вх}}$ с регистров RG1 и RG2, где $\varphi_{\text{вх}}$ – заданное вычислителем СР угловое положение нагрузки; N_0 – масштабный код, который соответствует значению синуса или косинуса, равному единице.

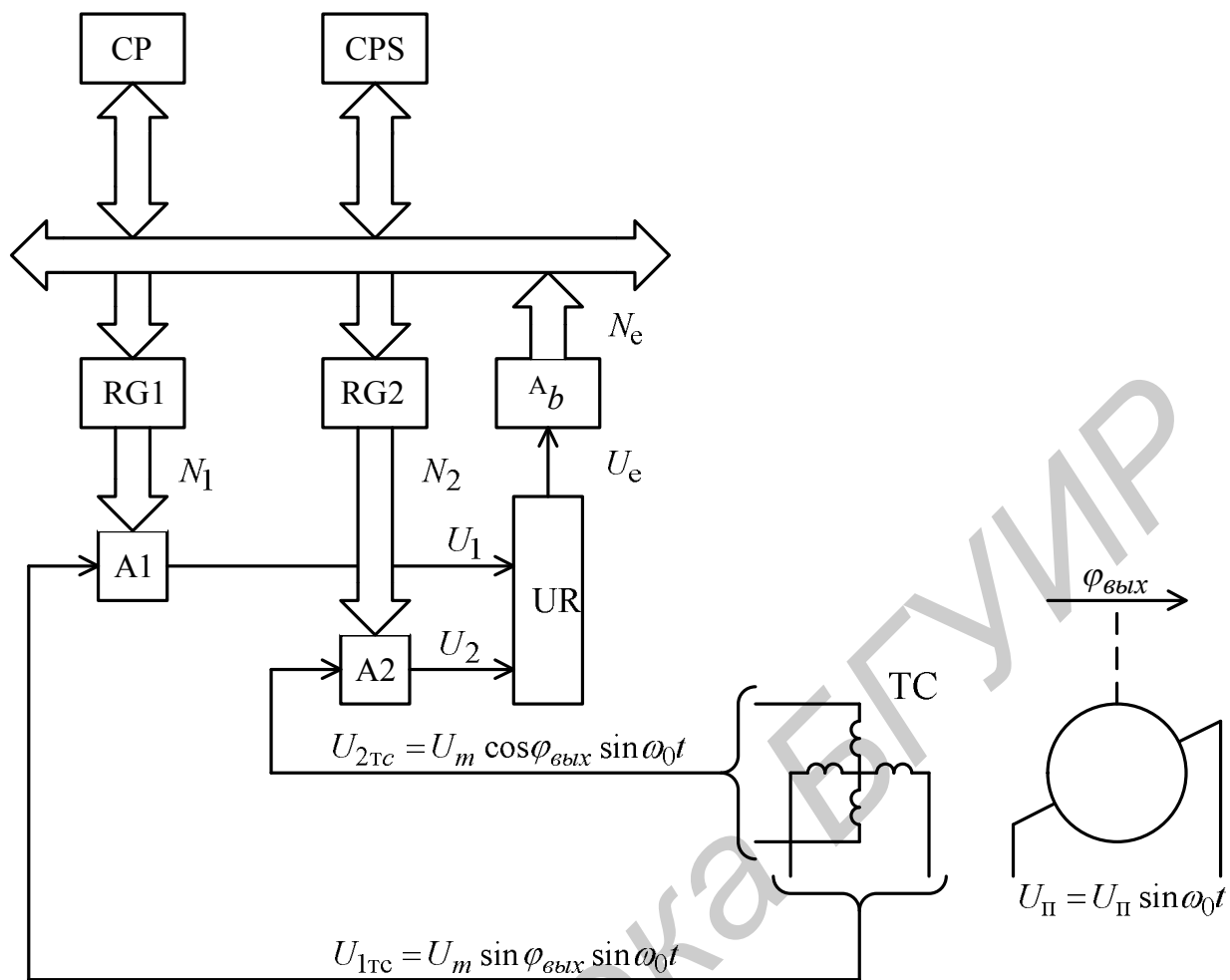


Рис. А.10

Устройства А1 и А2 перемножают величины U_{1TC} и N_1 , U_{2TC} и N_2 с учетом их знаков, масштабируют результаты перемножения и формируют сигналы:

$$U_1 = U_{1TC} \frac{N_1}{N_0} = U_m \sin \varphi_{\text{ВЫХ}} \cos \varphi_{\text{ВХ}} \sin \omega_0 t; \quad (\text{A.26})$$

$$U_2 = U_{2TC} \frac{N_2}{N_0} = U_m \cos \varphi_{\text{ВЫХ}} \sin \varphi_{\text{ВХ}} \sin \omega_0 t, \quad (\text{A.27})$$

которые подаются на демодулятор UR. В демодуляторе сигналы детектируются, а затем вычитаются. В результате на выходе демодулятора формируется напряжение:

$$U_e = |U_1| - |U_2| = U_m k_{\text{ДМ}} \sin(\varphi_{\text{ВХ}} - \varphi_{\text{ВЫХ}}), \quad (\text{A.28})$$

где $k_{\text{ДМ}}$ – коэффициент преобразования демодулятора.

Обычно рассогласование $e = \varphi_{\text{ВХ}} - \varphi_{\text{ВЫХ}}$ – величина малая (меньше одного градуса). Поэтому полагаем, что $\sin e \approx e$, и переписываем формулу (А.28) в виде

$$U_e = K_{\text{ИП}} \cdot e; \quad e = \varphi_{\text{ВХ}} - \varphi_{\text{ВЫХ}}, \quad (\text{А.29})$$

здесь $K_{\text{ИП}}$ – коэффициент измерительного преобразователя, который вычисляется по формуле

$$K_{\text{ИП}} = U_{\text{П}} \cdot k_{\text{ДМ}} \cdot k_{\text{Т}}. \quad (\text{А.30})$$

Согласно уравнению (А.29), структурную схему цифрового измерительного преобразователя с индукционным датчиком перемещения можно представить в виде аналогового эквивалента измерительного преобразователя с коэффициентом преобразования $K_{\text{ИП}}$, как показано на рисунке А.11.

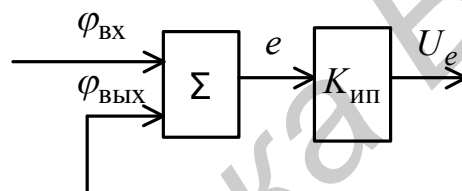


Рис. А.11

Пример. Рассчитать коэффициент преобразователя $K_{\text{ИП}}$ цифрового измерительного преобразователя (рисунок А.11) с ТС ВТМ-1М ($U_{\text{П}} = 26 \text{ В}$, коэффициент трансформации $k_{\text{Т}} = 1,0$) и демодулятором с $k_{\text{ДМ}} = 0,637$.

Решение.

$$K_{\text{ИП}} = k_{\text{Т}} U_{\text{П}} k_{\text{ДМ}} = 1 \cdot 26 \cdot 0,637 = 16,6 \frac{\text{В}}{\text{рад}}.$$

А.7 Микропроцессорное устройство управления

Функциональная схема устройства показана на рисунке А.12. Его основными элементами являются аналого-цифровой преобразователь А/Д, вычислитель СР и цифроаналоговый преобразователь Д/А.

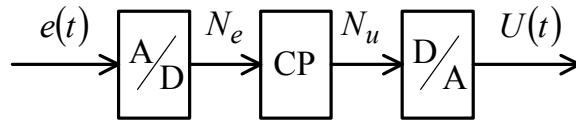


Рис. А.12

Аналого-цифровой преобразователь вначале осуществляет дискретизацию аналогового сигнала $e(t)$, преобразуя его в последовательность разноуровневых импульсов – выборку $e(nT)$ с одинаковым временным интервалом между импульсами. Затем мгновенное точное значение амплитуды каждого импульса с заданной точностью заменяют на приблизительное значение-отсчет $e[nT]$. Наконец, каждый отсчет шифруют, т.е. ставят ему в соответствие кодовое слово N_e .

Вычислитель по определенной программе $D(p)$ принимает закодированную информацию, обрабатывает ее, формирует кодовое слово управления N_u и выдает его на цифроаналоговый преобразователь.

В цифроаналоговом преобразователе декодер преобразует каждое кодовое слово N_u в амплитудно-модулированный импульс-отсчет $U[nT]$, а экстраполятор путем сглаживания отсчетов во временной области вырабатывает непрерывный во времени аналоговый сигнал управления $U(t)$.

Декодер современного ЦАП и шифратор АЦП обладают высокой разрешающей способностью и быстродействием, поэтому их считают безынерционными и описывают передаточными функциями усилительного звена с коэффициентами усиления, близкими к единице. При расчетах коэффициенты обычно полагают равными единице.

Точность восстановления сигнала управления $U(t)$ экстраполятором определяется количеством используемых предыдущих импульсов-отсчетов $U(nT)$. С их увеличением точность возрастает, однако возрастает и задержка времени на восстановление сигнала, что создает значительные трудности в обеспечении устойчивости системы управления. По этой причине в курсовой работе полагают, что экстраполятор осуществляет простейшую операцию – преобразует импульсы-отсчеты $U(nT)$ в последовательность прямоугольных импульсов длительностью T . Передаточная характеристика этого экстраполятора (обычно его называют фиксатором нулевого порядка) имеет вид

$$K_0(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p}. \quad (\text{А.31})$$

Учитывая сказанное, структурную схему представляют так, как показано на рисунке А.13, где $W(z)$ – функция цифрового регулятора, выполняемая микропроцессором в виде программы.

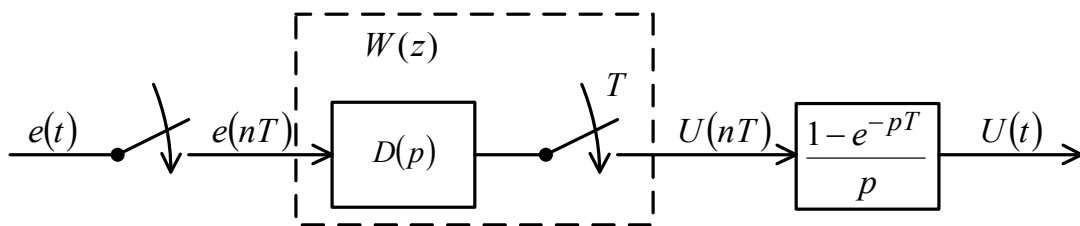


Рис. А.13

Функция $W(z)$ и период квантования T неизвестны. Их находят в процессе синтеза системы управления, а на начальном этапе проектирования при построении структурной схемы системы, состоящей из функционально необходимых элементов, полагают $W(z) = 1$.

Библиотека БГУИР

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Антипова Марина Александровна,
Доманов Александр Тимофеевич

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию для студентов специальностей
53 01 03 «Автоматическое управление в технических системах»
и 53 01 07 «Информационные технологии
и управление в технических системах»
всех форм обучения

Редактор Н.А. Бебель
Корректор Н.В. Гриневич

Подписано в печать 29.12.2004.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл.печ. л. 3,37.
Уч.-изд. л. 2,6.	Тираж 200 экз.	Заказ 221.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П.Бровки, 6.