

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

Факультет информационных технологий и управления

Кафедра систем управления

А. Т. Доманов, Д. Л. Бурак, Е. В. Тарасюк

***ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ***

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии
и управление в технических системах»*

Минск БГУИР 2019

УДК 681.518(076)

ББК 32.965я73

Д66

Рецензенты:

кафедра информационных технологий
Белорусского государственного университета (протокол №7 от 25.04.2018);

доцент кафедры управления информационными ресурсами
Академии управления при Президенте Республики Беларусь
кандидат технических наук, доцент Н. И. Белодед

Доманов, А. Т.

Д66 Теория автоматического управления. Курсовое проектирование :
учеб.-метод. пособие / А. Т. Доманов, Д. Л. Бурак, Е. В. Тарасюк. – Минск :
БГУИР, 2019. – 68 с. : ил.

ISBN 978-985-543-450-5.

Содержит три раздела и приложения. В разделе 1 рассмотрены особенности расчета и проектирования радиолокационных следящих систем, предназначенных для измерения текущих координат пролетающего в пространстве объекта по информации, содержащейся в ответных или в отраженных от объекта сигналах. В разделе 2 представлены методы и примеры расчетов и проектирования позиционных систем управления, которые в течение требуемого времени переводят объект в заданную позицию. В разделе 3 даны сведения о расчетах и проектировании следящих систем, используемых в металлорежущих станках и промышленных работах для перемещения режущего инструмента по программной траектории в процессе формообразования изделия. В приложениях приведены справочные материалы, которые можно использовать при статистических исследованиях.

УДК 681.518(076)
ББК 32.965я73

ISBN 978-985-543-450-5

© Доманов А. Т., Бурак Д. Л.,
Тарасюк Е. В., 2019
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
1 Угломерные следящие системы пеленгационной радиолокационной станции (РЛС).....	7
1.1 Назначение пеленгационной РЛС	7
1.2 Структурная схема угломерной следящей системы	8
1.3 Задание на проектирование	9
1.4 Требования к курсовому проекту.....	11
1.5 Практические указания по проектированию	12
1.6 Примеры расчетов по исходным данным.....	12
1.6.1 Анализ устойчивости системы, состоящей из функционально необходимых элементов	13
1.6.2 Синтез желаемой передаточной функции	13
1.6.3 Формулы расчета параметров желаемой передаточной функции	14
1.6.4 Синтез контура скорости	16
1.6.5 Расчет параметров регулятора	16
1.6.6 Моделирование контура скорости.....	17
1.6.7 Расчет основного контура следящей системы.....	19
1.6.8 Моделирование угломерной следящей системы.....	20
1.6.9 Расчет флуктуационной ошибки.....	21
1.6.10 Определение флуктуационных ошибок с помощью Matlab (Simulink).....	23
2 Системы автоматического управления по быстродействию.....	27
2.1 Область применения	27
2.2 Позиционная система управления поворотного стола	28
2.2.1 Поворотный стол	28
2.2.2 Структурная схема	28
2.3 Рабочий чертеж	30
2.4 Содержание основных разделов пояснительной записки	31
2.5 Задание на проектирование	31
2.6 Примеры расчетов по варианту 4 таблицы 2.1	32
2.6.1 Расчет профиля угловой скорости поворотного стола	32
2.6.2 Расчет параметров неизменяемой части системы.....	34
2.6.3 Расчет регулятора тока	34
2.6.4 Моделирование контура тока.....	35
2.6.5 Расчет параметров регулятора скорости.....	36
2.6.6 Расчет параметров регулятора положения стола	37
2.6.7 Проверка ошибки позиционирования	37
2.6.8 Исследование процессов в позиционной системе	38
2.7 Система позиционного управления транспортным роботом	39
2.7.1 Назначение робота	39
2.7.2 Система управления транспортным роботом.....	41
2.7.3 Задание на проектирование	42

3 Следящие системы металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением.....	44
3.1 Назначение систем.....	44
3.2 Исходные данные на проектирование и общий порядок проектирования	45
3.3 Расчет и исследование следящей системы продольной подачи токарного станка	46
3.3.1 Кинематическая схема.....	46
3.3.2 Структурная схема следящей системы.....	46
3.3.3 Задание на проектирование	48
3.4 Примеры расчетов по варианту 0 таблицы 3.1	49
3.4.1 Расчет параметров неизменяемой части системы	49
3.4.2 Синтез регулятора тока	50
3.4.3 Компьютерные исследования контура тока.....	52
3.4.4 Синтез контура скорости	53
3.4.5 Компьютерные исследования контура скорости с подчиненным контуром тока.....	55
3.4.6 Синтез основного контура системы.....	57
3.4.7 Установившаяся ошибка	58
3.4.8 Компьютерные исследования	59
Приложение А (справочное) Интегралы, содержащие дробно-рациональные функции в операторной форме.....	62
Приложение Б (справочное) Моделирование случайного процесса, действующего на входе системы управления.....	63
Литература.....	68

ПРЕДИСЛОВИЕ

Изучение курса «Теория автоматического управления» и приобретение навыков анализа и синтеза систем управления заканчивается выполнением и защитой курсового проекта. При этом каждому студенту предоставляется возможность проявить свои знания, умения и творческие способности.

Проектирование – сложный и длительный процесс. Требуется рассмотрения и анализа большого числа решений и понимания факторов, ограничивающих принятие того или иного решения. К числу таких факторов относятся:

- 1) ограничения на изменения переменных величин;
- 2) внешние возмущения и помехи;
- 3) наличие нелинейностей типа насыщение, гистерезис, люфт;
- 4) технологический разброс и случайные изменения параметров и т. п.

Задача курсового проектирования состоит в том, чтобы по целевому назначению системы управления, ее структурной схеме и исходным данным рассчитать для каждого контура такой регулятор и обратную связь, которые в совокупности будут обеспечивать системе желаемое поведение в присутствии возмущений, помех и ограничений.

В общих чертах решение задачи начинают с анализа устойчивости, качества и синтеза самого низшего по рангу внутреннего контура системы, затем следующего промежуточного контура (если он существует в системе) и, наконец, главного контура управления. Решающую роль при этом играет расчет и исследования, выполняемые с помощью Matlab (Simulink) на персональных ЭВМ.

При инженерных расчетах обычно делают рабочие записи, начиная с составления общей схемы расчетов, определения порядка и сроков их выполнения, собственно расчетов и принимаемых решений и заканчивая результатами проверки выполнения технического задания по проекту. Так следует поступать и при выполнении курсового проекта.

При упорядоченных записях легко составить пояснительную записку, дать обоснованное заключение о правильности принятых решений и способах их реализации. Случайные записи без каких-либо пояснений всегда ведут к потере времени, ущербности содержания проекта и, как следствие, к неудовлетворительному публичному выступлению на защите проекта.

Важным вопросом является выбор темы для проектирования. С одной стороны, работа над темой должна развивать опыт и умение проектирования, а с другой – из-за ограниченного ресурса времени работа должна быть легко выполнимой и важной с точки зрения практического применения. С этих позиций наиболее подходящими для проектирования являются типовые системы автоматического управления. В данном учебно-методическом пособии приведены описания систем, получивших конкретное практическое применение, и содержание

заданий на их проектирование. Основные этапы анализа, предварительного синтеза и моделирования каждого контура системы частично проиллюстрированы примерами расчетов, которые можно использовать при выполнении курсового проекта.

Авторы благодарны студентам, чья работа над курсовыми проектами была важна для подготовки данного учебно-методического пособия, проверки методик и последовательности выполнения этапов проектирования.

Библиотека БГУИР

1 УГЛОМЕРНЫЕ СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ ПЕЛЕНГАЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ (РЛС)

1.1 Назначение пеленгационной РЛС

Пеленгационная РЛС предназначена для измерения текущих координат объекта, пролетающего в пространстве, по информации, содержащейся в принятых сигналах – отраженных объектом или ответных от объекта. Объектом может быть самолет, беспилотный летательный аппарат, искусственный спутник Земли, космический аппарат.

Измерения осуществляются в сферической системе координат, начало которой совмещено с опорной точкой « O_1 » антенны РЛС.

Структурная схема пеленгационной РЛС показана на рисунке 1.1. Она состоит из пеленгационного устройства и двух исполнительных устройств. Сплошная линия (С) указывает истинное направление на север.

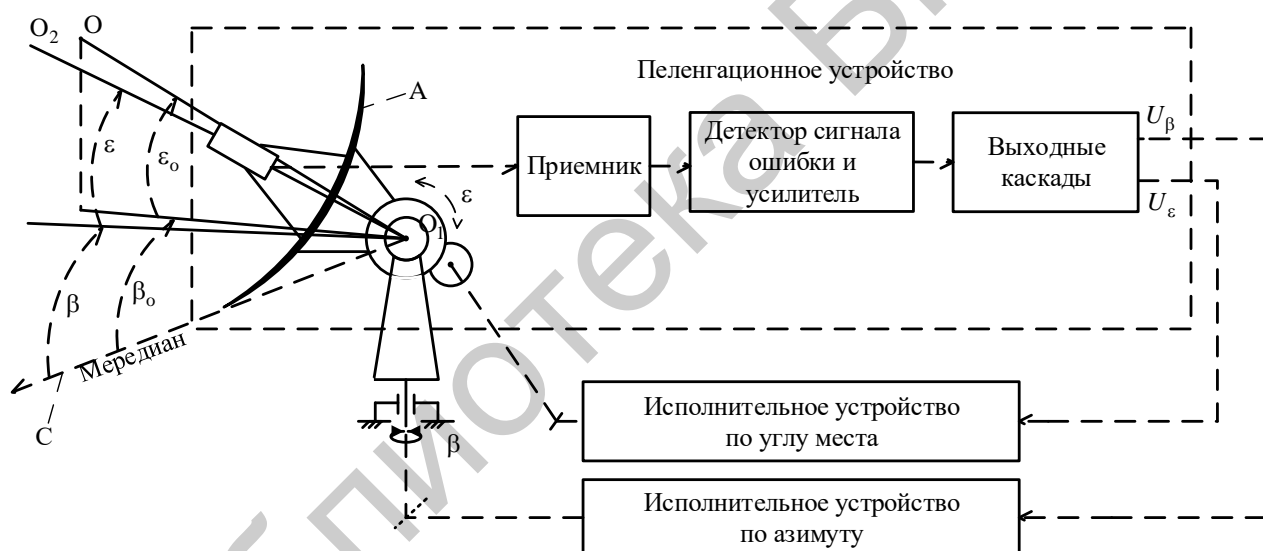


Рисунок 1.1 – Структурная схема пеленгационной РЛС, работающей в режиме сопровождения объекта по азимуту и углу места

Пеленгационное устройство определяет отклонение направления (O_1O_2) оси антенной системы А от непрерывно меняющегося во времени направления (O_1O) на пролетающий объект и преобразует это отклонение в сигналы управления U_β и U_ϵ , пропорциональные сигналам рассогласования отклонений по азимуту и углу места:

$$U_\beta = K_\beta(\beta_0 - \beta); \quad U_\epsilon = K_\epsilon(\epsilon_0 - \epsilon),$$

где K_β и K_ϵ – коэффициенты пропорциональности.

Сигналы U_β и U_ε поступают на исполнительные устройства, которые изменяют угловые положения антенны РЛС так, чтобы ошибки сопровождения объекта по азимуту ($\beta_0 - \beta$) и углу места ($\varepsilon_0 - \varepsilon$) были настолько малы, насколько это возможно по тактико-техническим требованиям. Обычно полагают, что поведение каждого исполнительного устройства не зависит от воздействий, оказываемых на другое исполнительное устройство. В этом случае угломерные следящие системы можно рассматривать как независимые.

Известны различные виды угломерных следящих систем. Друг от друга они отличаются принципом работы пеленгационного устройства и реализацией исполнительного устройства. Однако независимо от принципа построения каждой системе присущи и общие особенности.

Во-первых, в этих системах обратная связь замыкается через пространство и объект, который облучается антенной, и этой же антенной принимаются отраженные или ответные сигналы от объекта, т. е. она является искусственно организованной с целью получить ошибки рассогласования целевых направлений (O_1O_2) и (O_1O) по азимуту и углу места.

Во-вторых, источником задающего воздействия является сам объект, движение которого заранее неизвестно, известными могут быть лишь начальные координаты и момент времени, с которого должен начинаться процесс слежения. Наконец, отраженные от объекта сигналы всегда смешаны с естественными помехами пространства и помехами, умышленно создаваемыми противником.

В настоящее время имеется обширная литература по следящим системам пеленгационных РЛС, в частности [1–3] и др., некоторые издания из которых являются первоисточниками.

1.2 Структурная схема угломерной следящей системы

Схема сопровождения по азимуту показана на рисунке 1.2. Она построена по схеме электромашиный усилитель – двигатель постоянного тока с тахометрической обратной связью. По такой схеме построена и система сопровождения по углу места.

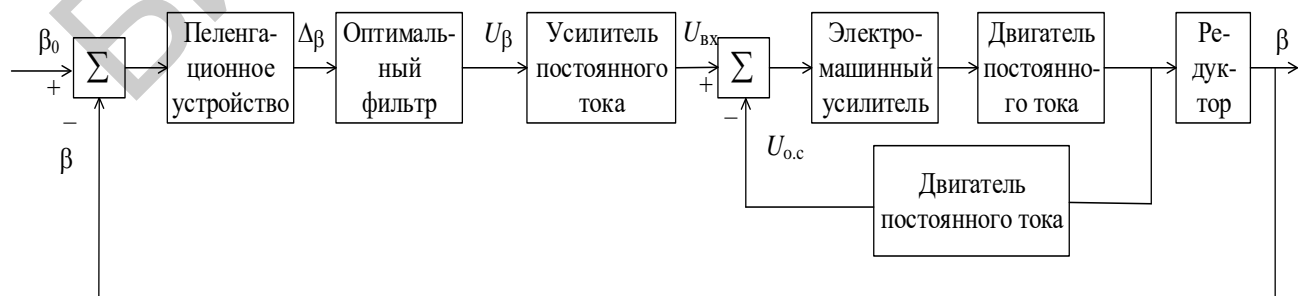


Рисунок 1.2 – Структурная схема угломерной следящей системы по азимуту

Математическое описание отношения переменных при их взаимодействии в системе и с внешней средой отражено на рисунке 1.3.

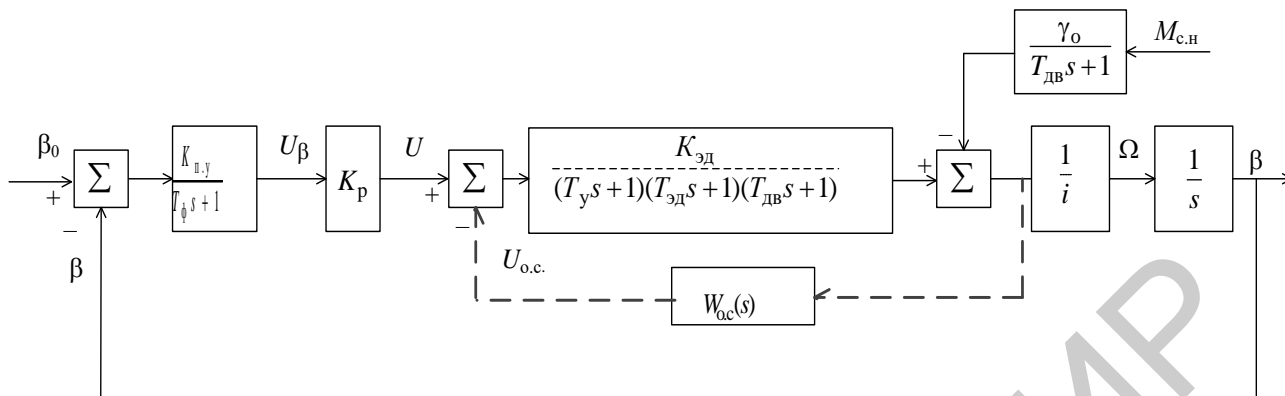


Рисунок 1.3 – Структурная схема математической модели угломерной следящей системы

1.3 Задание на проектирование

Задание: синтез регуляторов азимутальной следящей системы по структурной схеме рисунка 1.3, исходным данным таблицы 1.1 и следующим техническим требованиям:

- 1) режим работы – кратковременный;
- 2) ступенчатые воздействия на входе системы не превышают тысячных долей радиана, например, $\beta_0(t) = 0,008 \cdot 1(t)$;
- 3) качество установившегося режима в присутствии шума оценивают по минимуму среднеквадратичной ошибки:

$$\delta = \left(\delta_{с.к}^2 + \overline{\delta}_{п}^2 \right)^{1/2},$$

где $\delta_{с.к}$ – ошибка по скорости;

$\overline{\delta}_{п}^2$ – средний квадрат флуктуационной ошибки от помехи;

- 4) при расчете учитывают ограничения управляющего сигнала U_y на входе обмотки возбуждения ЭМУ в виде неравенства $U_y \leq U_{y \max}$, где $U_{y \max} = 32$ В – для нечетных номеров вариантов задания и 40 В для четных номеров.

Таблица 1.1 – Параметры и исходные данные задания на динамический расчет угломерной следящей системы с электромашинным усилителем (ЭМУ)

Наименование параметров	Варианты задания					
	0	1	2	3	4	5
Коэффициенты передачи пеленгационного устройства $K_{п.у}$, В/град	0,4	0,6	0,8	0,5	0,32	0,4
Постоянная времени фильтра в выходных каскадах пеленгационного устройства по азимуту T_{ϕ} , с	0,006	0,01	0,04	0,02	0,01	0,04
Постоянная времени управляющей обмотки ЭМУ T_y , с	0,003	0,004	0,001	0,002	0,003	0,004
Постоянная времени общей цепи якорных обмоток ЭМУ и двигателя $T_{эд}$, с	0,15	0,2	0,3	0,25	0,1	0,12
Постоянная времени двигателя $T_{дв}$, с	0,025	0,026	0,03	0,032	0,025	0,026
Коэффициенты передачи системы ЭМУ-ДВ $K_{эд}$, рад/В·с	10	12	14	12	9	10
Передаточное число редуктора i	840	1000	640	725	600	840
Максимальная скорость слежения $\frac{d\beta}{dt} = \Omega_{\max}$, с ⁻¹	0,31	0,35	0,41	0,52	0,63	0,31
Максимальное ускорение $\frac{d^2\beta}{dt^2} = \varepsilon_{\max}$, с ⁻²	0,28	0,4	0,45	0,42	0,67	0,43
Момент сопротивления на оси вала двигателя $M_{с.н}$, Н·м	0,0018	0,0018	0,0024	0,0018	0,0008	0,0071
Коэффициент наклона механической характеристики двигателя γ_0 , (Н·мс) ⁻¹	21,8	42	62	84	120	21,8
Допустимая ошибка в установившемся режиме движения, $\delta = \beta_0 - \beta$, угл. мин	6	8	10	10	12	8
Показатель колебательности M , не более	1,2	1,2	1,3	1,4	1,2	1,3

1.4 Требования к курсовому проекту

Курсовой проект должен состоять из графической части и пояснительной записки, оформленных в соответствии с требованиями СТП 01-2017.

Графическая часть должна быть представлена структурной схемой угломерной следящей системы и графиками, характеризующими ее качество в переходном и в установившемся режимах работы. Материал графической части должен быть тщательно отобран, выверен и ясно отражать суть выполненного курсового проекта. Графическое исполнение схемы и графиков должно быть единообразным по стилю исполнения и соответствовать требованиям стандарта. На графиках и схеме должны быть нанесены условные обозначения, символы и индексы точно таким же образом, как в пояснительной записке.

Пояснительная записка должна содержать:

- титульный лист;
- реферат;
- задание на проектирование с основными исходными данными;
- содержание;
- введение, включающее назначение азимутальной следящей системы, состав функционально необходимых частей, условия применения системы, требования к устойчивости и качеству и т. д.;
- анализ устойчивости системы, состоящей из функционально необходимых элементов;
- синтез желаемой передаточной функции системы в разомкнутом состоянии;
- выбор и расчет параметров регуляторов скорости;
- исследования контура скорости с целью уточнения структуры и параметров регулятора при технологическом разбросе параметров и вариациях параметров регулятора и функциональных элементов контура;
- выбор и расчет параметров регулятора основного контура следящей системы, проверка выполнения требований к качеству системы в переходном и установившемся режимах работы;
- заключение;
- список использованных источников;
- ведомость документов.

Общее количество листов графического материала в пересчете на формат А1 (не менее одного-двух листов) определяет преподаватель. Объем пояснительной записки должен составлять примерно 24–28 страниц машинописного текста, иллюстрированных необходимыми схемами и графиками. Текст должен быть набран в соответствии с требованиями к оформлению пояснительной записки, изложенной в СТП 01-2017.

1.5 Практические указания по проектированию

Задачи проектирования необходимо решать в том порядке, в котором они перечислены в содержании пояснительной записки.

Анализ устойчивости системы, состоящей из функционально необходимых элементов, и синтез желаемой передаточной функции системы в разомкнутом состоянии проводят по методике В. А. Бесекерского [4], которая позволяет без особого труда обеспечить комплекс различных требований к системе.

Задача выбора и расчета регулятора контура скорости и основного контура системы заключается в выборе такой структурной схемы, параметров, характеристик и способа технической реализации регулятора, при которых требуемые свойства контура обеспечиваются наиболее простым способом.

Моделирование является основным этапом анализа и синтеза контуров. На этом этапе проверяют способность системы сохранять время переходного процесса и перерегулирование при отклонении от расчетных значений параметров ЭМУ-ДВ; быструю реакцию на ступенчатые случайные изменения момента сопротивления $M_{с.н}(t)$; ослабление влияния шума на точность сопровождения. Проверяют возможность возникновения автоколебаний при наличии люфта и упругости кинематических связей в редукторе и т. д.

1.6 Примеры расчетов по исходным данным

Исходные данные:

чувствительность пеленгационного устройства:	$K_{п.у} = 0,4 \text{ В/град};$
постоянная времени фильтра:	$T_{\phi} = 0,006 \text{ с};$
постоянная времени управляющей обмотки ЭМУ:	$T_y = 0,003 \text{ с};$
постоянная времени общей цепи якорных обмоток ЭМУ и двигателя:	$T_{эд} = 0,1 \text{ с};$
коэффициент передачи системы ЭМУ-ДВ:	$K_{эд} = 10 \text{ рад/с} \cdot \text{В};$
постоянная времени двигателя:	$T_{дв} = 0,02 \text{ с};$
передаточное отношение редуктора:	$i = 620;$
максимальная скорость слежения:	$\Omega_{\max} = 0,52 \text{ рад/с};$
максимальное ускорение:	$\varepsilon_{\max} = 0,26 \text{ рад/с}^2;$
момент сопротивления:	$M_{с.н} = 0,0008 \text{ Н} \cdot \text{м};$
коэффициент наклона механических характеристик двигателя:	$\gamma_0 = 62 \text{ рад/с} \cdot \text{Н} \cdot \text{м};$
допустимая ошибка:	$\delta_{\max} = 10 \text{ угл. мин};$
показатель колебательности:	$M \leq 1,2.$

1.6.1 Анализ устойчивости системы, состоящей из функционально необходимых элементов

Последовательность выполнения анализа устойчивости системы, состоящей из функционально необходимых элементов, следующая.

Определяют требуемое значение добротности по скорости в соответствии с формулой

$$K_{\Omega} = \frac{\Omega_{\max} + \gamma_0 M_{c.н}}{\delta} = \frac{0,52 + 62 \cdot 0,0008}{10} 3438 = 200 \text{ с}^{-2}.$$

Находят передаточную функцию разомкнутой системы при $W_{o.c}(s) = 0$ (см. рисунок 1.3)

$$W(s) = \frac{K_{\Omega}}{s(T_{дв}s + 1)(T_{эд}s + 1)(T_y s + 1)(T_{\phi}s + 1)}$$

и коэффициент K_p , обеспечивающий заданное качество системы в установившемся режиме:

$$K_p = \frac{K_{\Omega} i}{K_{п.у} K_{эд}} = \frac{200 \cdot 620}{(0,4 \cdot 57,3) \cdot 10} = 540.$$

Проверяют способность системы работать без корректирующих устройств. Из теории линейных непрерывных систем известно [4], что система является работоспособной, если сумма постоянных времени ее передаточной функции в разомкнутом состоянии не будет превышать значение некоторой величины, обозначаемой буквой сигма Σ и определяемой по формуле

$$\Sigma = \frac{1}{K_{\Omega}} \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{2}.$$

Это выражение показывает, что при заданном показателе колебательности $M = 1,2$ допустимая сумма постоянных времени $\Sigma = 0,0056$ с. Однако действительная сумма постоянных времени системы, показанной на рисунке 1.3, $T_{дв} + T_{эд} + T_y + T_{\phi} = 0,02 + 0,1 + 0,03 + 0,006 = 0,156$ с, что значительно превышает допустимое значение. Система без корректирующих устройств неработоспособна.

1.6.2 Синтез желаемой передаточной функции

Чтобы обеспечить высокую точность воспроизведения входных воздействий при сохранении достаточных условий устойчивости, передаточная функция желаемой следящей системы в разомкнутом состоянии должна быть записана в виде

$$W_{ж}(s) = \frac{K_{ж}(T_2 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1) \dots}$$

а параметры $K_{ж}, T_1, T_2, T_3 \dots$, обеспечивающие работу системы с требуемыми значениями скорости Ω_{\max} и ускорения ε_{\max} , – с помощью известных формул [4].

По практическим соображениям расчеты выполняем при следующих данных:
 $\Omega_{\max} = 0,52$ рад/с; $\varepsilon_{\max} = 0,26$ рад/с²; $M_{с.н} = 0,0008$ Н·м; $\gamma_0 = 62$ рад/с·Н·м;
 $\delta_{\max} = 10$ угл. мин; $M \leq 1,2$.

Контрольная частота

$$\omega_k = \frac{\varepsilon_{\max}}{\Omega_{\max}} = \frac{0,26}{0,52} = 0,5 \text{ с}^{-1}.$$

Добротность системы по скорости

$$K_{\Omega} \frac{\Omega_{\max} + \gamma_0 M_{с.н}}{\delta_{\max}} = \frac{0,52 + 62 \cdot 0,0008}{10} 3438 = 196 \text{ с}^{-1}.$$

Условная добротность по ускорению

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max} + \omega_k \gamma_0 M_{с.н}}{\delta_{\max}} = \frac{0,26 + 0,5 \cdot 62 \cdot 0,0008}{10} 3438 = 98 \text{ с}^{-2}.$$

Базовая частота

$$\omega_0 = \sqrt{K_{\varepsilon}} = \sqrt{98} = 10 \text{ с}^{-1}.$$

1.6.3 Формулы расчета параметров желаемой передаточной функции

Возможны три варианта расчета параметров $K_{ж}, T_1$ и ω_0 .

Вариант первый:

$$K_{ж} = K_{\Omega} = 200 \text{ с}^{-1};$$

$$T_1 = \frac{1}{(2\dots3)\omega_k} = \frac{1}{2 \cdot 0,5} = 1 \text{ с};$$

$$\omega_0 = \sqrt{(2\dots3)K_{\varepsilon}} = \sqrt{2 \cdot 98} = 14 \text{ с}^{-1}.$$

Вариант второй:

$$K_{ж} = \sqrt{2}K_{\Omega} = \sqrt{2} \cdot 200 = 280 \text{ с}^{-1};$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_k} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ с};$$

$$\omega_0 = \sqrt{K_{\varepsilon}\sqrt{2}} = \sqrt{98\sqrt{2}} = 12 \text{ с}^{-1}.$$

Вариант третий:

$$K_{\text{ж}} = (2...3)K_{\Omega} = 2 \cdot 200 = 400 \text{ с}^{-1};$$

$$T_1 = \frac{2...3}{\omega_k} = \frac{2}{0,5} = 4 \text{ с};$$

$$\omega_0 = \sqrt{K_{\varepsilon}} = \sqrt{98} = 10 \text{ с}^{-1}.$$

Выбор того или иного варианта определяется конкретными данными задания. Обычно рассматривают второй вариант, реже первый. В общем случае могут рассматриваться все три варианта. Независимо от варианта остальные постоянные времени желаемой передаточной функции рассчитываются по формулам:

$$T_2 = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{M}{M-1}}; \quad T_3 = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{M(M-1)}{M+1}}; \quad T_i = \frac{T_{i-1}}{\lambda},$$

где $i = 4, 5$;

λ – число, конкретное значение которого выбирается из диапазона чисел $2...5$ так, чтобы передаточная функция корректирующего устройства стала более простой.

Рассмотрим первый вариант соотношений параметров желаемой передаточной функции. В этом случае будем иметь постоянные времени:

$$T_2 = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{M}{M-1}} = \frac{1}{14} \sqrt{\frac{1,2}{1,2-1}} = 0,175 \text{ с};$$

$$T_3 = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{M(M-1)}{M+1}} = \frac{1}{14} \sqrt{\frac{1,2(1,2-1)}{1,2+1}} = 0,016 \text{ с};$$

$$T_4 = \frac{T_3}{2...5} = \frac{0,016}{2} = 0,008 = T_y;$$

$$T_5 = T_{\phi} = 0,006 \text{ с};$$

$$T_6 = 0,0003 \text{ с}.$$

1.6.4 Синтез контура скорости

Цель синтеза заключается в желании упростить синтез алгоритма следящего регулирования, снизить чувствительность системы к внешним возмущениям и вариациям параметров ее отдельных элементов, повысить быстродействие и плавность движения.

Известны различные схемы построения контура скорости, удовлетворяющие этим требованиям в той или иной мере.

На рисунке 1.4 показана структурная схема контура с последовательно включенным регулятором скорости пропорционально-интегрально-дифференциального действия и сигналом обратной связи, снимаемым с тахогенератора на оси двигателя. На схеме не учтена постоянная времени обмотки управления ЭМУ $T_y = 0,003$ с из-за ее незначительного влияния на динамику контура по сравнению с постоянной времени $T_{эд} = 0,1$ с. Степень влияния T_y на устойчивость контура можно будет оценить впоследствии при моделировании процессов в контуре.

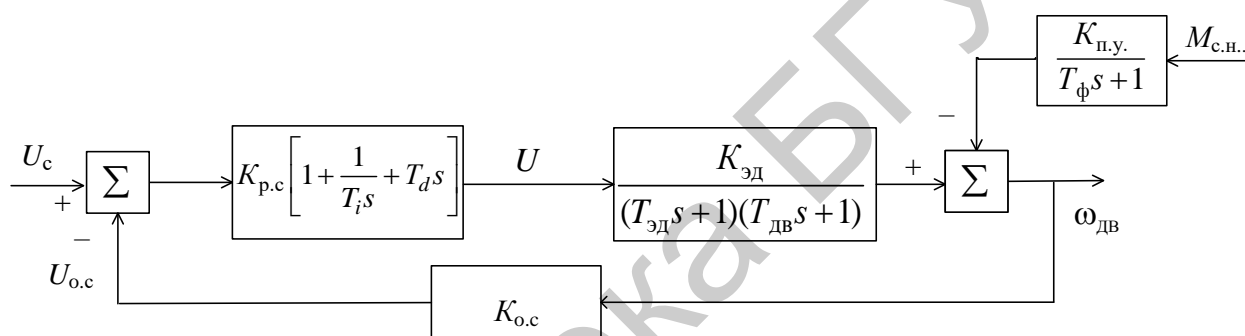


Рисунок 1.4 – Структурная схема контура скорости

1.6.5 Расчет параметров регулятора

Передаточную функцию прямой цепи контура представляют в следующем виде:

$$W(s) = K_{эд} K_{p.c} \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \frac{1}{(T_{эд} s + 1)(T_{дв} s + 1)} = \frac{K_{эд} K_{p.c}}{T_i s} \cdot \frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{T_{эд} T_{дв} s^2 + (T_{эд} + T_{дв}) s + 1}.$$

Приравнивая в этом равенстве соответствующие коэффициенты полиномов числителя и знаменателя, находят формулы для расчета постоянных времени:

$$T_i = (T_{эд} + T_{дв}); \quad T_d = \frac{T_{эд} T_{дв}}{T_{эд} + T_{дв}}.$$

В этом случае имеют

$$W(s) = \frac{K_{эд} K_{p.c}}{T_{эд} + T_{дв}} \frac{1}{s}.$$

Коэффициент $K_{p.c}$ определяют следующим образом. Записывают передаточную функцию замкнутого контура и приводят к виду апериодического звена с постоянной времени, равной желаемому значению T_3 .

$$W_{k.c}(s) = \frac{\frac{K_{\text{эд}} K_{p.c}}{T_{\text{эд}} + T_{\text{дв}}} \cdot \frac{1}{s}}{1 + \frac{K_{\text{эд}} K_{p.c} K_{o.c}}{T_{\text{эд}} + T_{\text{дв}}} \cdot \frac{1}{s}} = \frac{1}{K_{o.c}} \frac{1}{\frac{T_{\text{эд}} + T_{\text{дв}}}{K_{\text{эд}} K_{p.c} K_{o.c}} s + 1} = \frac{1}{K_{o.c}} \frac{1}{T_3 s + 1}.$$

Из равенства постоянных времени находят искомое значение:

$$K_{p.c} = \frac{T_{\text{эд}} + T_{\text{дв}}}{K_{\text{эд}} K_{p.c} K_{o.c}}.$$

Например, при $K_{\text{эд}} = 10$ рад/с·В; $T_{\text{эд}} = 0,1$ с; $T_{\text{дв}} = 0,02$ с; $T_3 = 0,016$ с; $\Omega_{\text{max}} = 0,52$ рад/с; $i = 620$; $U_{\text{ун}} = 10$ В имеем

$$T_i = T_{\text{эд}} + T_{\text{дв}} = 0,1 + 0,02 = 0,12 \text{ с},$$

$$T_d = \frac{T_{\text{эд}} T_{\text{дв}}}{T_{\text{эд}} + T_{\text{дв}}} = \frac{0,1 \cdot 0,02}{0,1 + 0,02} = 0,017 \text{ с},$$

коэффициент обратной связи

$$K_{o.c} = \frac{U_{\text{ун}}}{\Omega_{\text{max}} i} = \frac{10}{0,52 \cdot 620} = 0,031 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

и коэффициент усиления регулятора скорости

$$K_{p.c} = \frac{T_{\text{эд}} + T_{\text{дв}}}{T_3 K_{\text{эд}} K_{o.c}} = \frac{0,1 + 0,02}{0,016 \cdot 10 \cdot 0,031} = 24,2.$$

1.6.6 Моделирование контура скорости

Прежде всего проектируют схему моделирования контура скорости для анализа устойчивости и способности контура сохранять свои свойства при отклонении параметров системы ЭМУ-ДВ от расчетных значений или вариациях настройки параметров регулятора. Причем в схеме учитывают постоянную времени T_y обмотки управления ЭМУ, а звено дифференцирования $W_d(s) = T_d s$ представляют в сочетании с апериодическим звеном:

$$W_d(s) = \frac{T_d s}{T_\delta s + 1},$$

где T_δ – постоянная времени, значение которой выбирают равным наименьшей постоянной времени желаемой передаточной функции разомкнутой системы.

Это выражение называют передаточной функцией реального дифференцирующего звена и реализуют в виде схемы, показанной на рисунке 1.5, где коэффициент $K_d = T_d / T_\delta$.

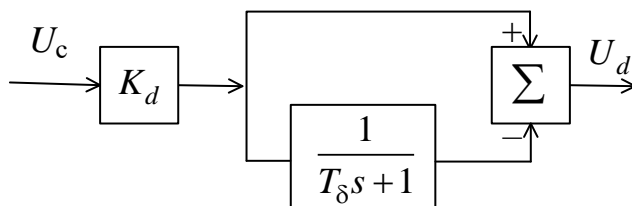


Рисунок 1.5 – Физически реализуемая структурная схема реального дифференцирующего звена

Схема моделирования контура представлена на рисунке 1.6.

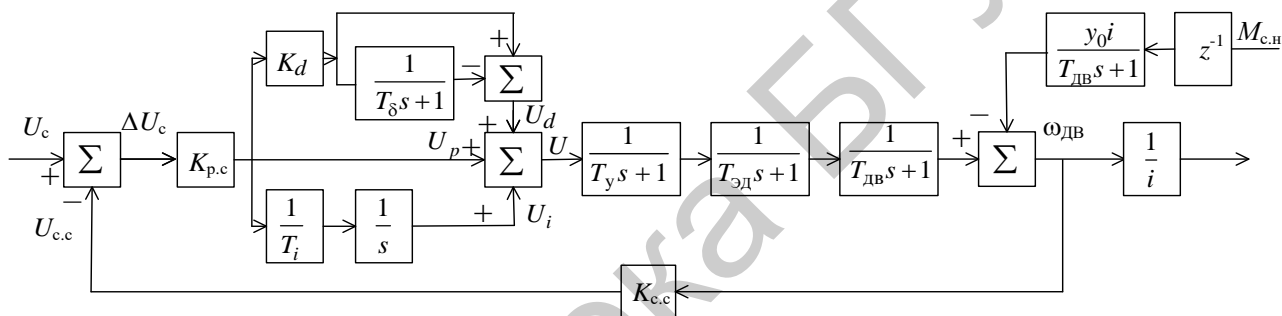


Рисунок 1.6 – Схема моделирования контура скорости угломерной следящей системы

Используя Matlab (Simulink), математическую модель контура строят с блоками задания входного сигнала $U_c(t)$, возмущения $M_{c.н}(t)$ и задержки Z^{-1} на время τ , например, равное 1 с. Устанавливают численные значения параметров, соответствующие заданным и вычисленным значениям. Полагая $U_c(t) = 1(t)$ и $M_{c.н}(t) = 0,0008 \cdot 1(t)$, с помощью функций step наблюдают реакцию контура, определяют длительность реакции t_{nn} на единичное ступенчатое воздействие $U_c(t) = 1(t)$, длительность задержки $\tau = 1,5 t_{nn}$ и ограничивают время моделирования тем значением, в пределах которого рассматривается реакция контура на входной сигнал $U_c(t)$ и на возмущение $M_{c.н}(t)$. После этого в блоке запаздывания Z^{-1} устанавливают удобную для анализа величину задержки $\tau = 1,5 t_{nn}$ и приступают к решению первой задачи – анализу чувствительности контура к технологическому разбору постоянных времени $T_{эд}$ и $T_{дв}$, их изменению под влиянием среды или старения.

С помощью функций step получают графики $\omega_{дв}(t)$ для нескольких различных значений сочетаний постоянных времени, например, $T_{эд} = 0,1$ с и $T_{дв} = 0,02$ с;

$T_{Эд} = 0,1$ с и $T_{ДВ} = 0,03$ с; $T_{Эд} = 0,15$ с и $T_{ДВ} = 0,02$ с. Для каждого сочетания постоянных времени по графикам определяют время установления t_y , время переходного процесса $t_{пп}$, перерегулирование $\sigma, \%$. По изменению длительностей и форм откликов на сигнал $U_c(t) = 1(t)$ и возмущению $M_{с.н}(t)$ судят об устойчивости контура и его чувствительности к изменению параметров заданной части. При необходимости улучшить динамику контура подстраивают постоянные времени T_i и T_d и коэффициент $K_{р.с}$ регулятора скорости, учитывая при этом эмпирические правила: уменьшение постоянной интегрирования T_i ведет к снижению запаса устойчивости и необходимости учета ограничений на переменные состояния; увеличение постоянной дифференцирования T_d увеличивает запас устойчивости и быстродействие; увеличение $K_{р.с}$ повышает быстродействие, но снижает запас устойчивости.

1.6.7 Расчет основного контура следящей системы

Структурная схема системы с контуром скорости, обладающим желаемой передаточной функцией $W_{к.с.}(s) = \frac{1}{K_{о.с.}(T_3s + 1)}$, показана на рисунке 1.7.

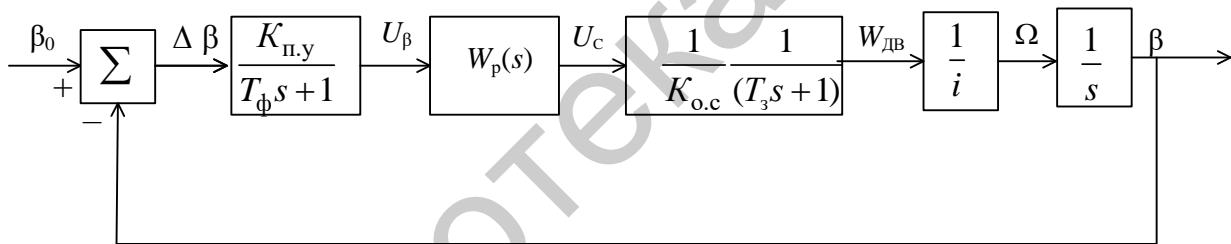


Рисунок 1.7 – Структурная схема следящей системы с подчиненным контуром скорости и регулятором $W_p(s)$

Передаточная функция контура в разомкнутом состоянии имеет вид

$$W(s) = \frac{K_{п.у}}{K_{о.с.}} \cdot \frac{W_p(s)}{i s (T_3s + 1)(T_{ф}s + 1)}.$$

Чтобы реализовать динамические свойства, заданные передаточной функцией

$$W_{ж}(s) = \frac{K_{ж}(T_2s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_3s + 1) \dots},$$

необходимо для коррекции выбрать регулятор системы с передаточной функцией

$$W_p(s) = K_p \frac{(T_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)},$$

где K_p находят из условия

$$\frac{K_{п.у} K_p}{K_{о.с} i} = K_{ж}.$$

Например, при $K_{ж} = 250 \text{ с}^{-1}$, $K_{п.у} = 0,4 \cdot 57,3 \text{ В/рад}$, $K_{о.с} = 0,031 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ и $i = 620$ получаем

$$K_p = \frac{K_{ж} K_{о.с} i}{K_{п.у}} = \frac{200 \cdot 0,031 \cdot 620}{0,4 \cdot 57,3} = 168.$$

1.6.8 Моделирование угломерной следящей системы

Цель моделирования состоит в том, чтобы сначала проверить выполнение требований в переходном и в установившихся режимах работы, а затем оценить ошибки системы при действии на нее реальных воздействий и помех.

При определении основных показателей переходного процесса ступенчатую функцию на входе системы рекомендуется выразить в тысячных долях радиана, например $\beta_0(t) = 0,006 \cdot 1(t)$. С помощью функции step получают график $\beta(t)$, по которому определяют время нарастания переходного процесса – время установления t_y от 0,1 до 0,9 установившегося значения, перерегулирование σ , %; время переходного процесса t_{nn} и число колебаний.

Графики изменения ошибки $\Delta\beta$ и выходной переменной $\beta(t)$ системы определяются при $\beta_0(t) = \Omega_{\max} t \cdot 1(t)$ с помощью функции Ramp и $M_{с.н}(t) = 0,0008 1(t)$ с помощью функции step. При анализе обращают внимание на степень влияния возмущения $M_{с.н}$.

Затем определяют качество воспроизведения эквивалентного гармонического входного воздействия $\beta_0(t) = B_{\max} \sin \omega_k t$, которому соответствует максимальная скорость $\Omega_{\max} = \omega_k B_{\max}$ и максимальное ускорение $\varepsilon_{\max} = \omega_k^2 B_{\max}$. Параметры эквивалентного воздействия определяют по формулам

$$B_{\max} = \frac{\Omega_{\max}^2}{\varepsilon_{\max}} \quad \text{и} \quad \omega_k = \frac{\varepsilon_{\max}}{\Omega_{\max}}.$$

Например, при $\Omega_{\max} = 0,52 \text{ рад/с}$ и $\varepsilon_{\max} = 0,26 \text{ рад/с}^2$ имеем $B_{\max} = 1,04 \text{ рад}$ и $\omega_k = 0,5 \text{ с}^{-1}$.

Графики воспроизведения эквивалентного гармонического воздействия и изменения ошибки воспроизведения получают с помощью функции \sin . Их анализируют, определяют амплитудную и фазовую ошибки и определяют их соответствие значениям добротностей системы по скорости

$$\frac{\Delta\beta}{B_{\max}} \approx \frac{\omega_k^2}{K_\varepsilon}$$

и ускорению

$$\varphi \approx \frac{\omega_k}{K_\Omega}$$

Целью дальнейших расчетов является определение ошибок, возникающих в результате действия на систему реальных сигналов, случайных помех и возмущений.

1.6.9 Расчет флуктуационной ошибки

Флуктуационная ошибка – это нежелательный на выходе системы случайный процесс $\delta_n(t)$, обусловленный случайным возмущением – помехой $n(t)$ на входе. Для описания флуктуационной ошибки используют среднее значение квадрата $\overline{\delta_n^2(t)}$, которое получают путем интегрирования значений спектральной плотности $S_{\delta_n}(s)$ в соответствии с формулой

$$\overline{\delta_n^2(t)} = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} S_{\delta_n}(s) ds \quad (\text{средняя мощность}),$$

где s интерпретируется как $j\omega$.

Для характеристики флуктуационной ошибки, кроме среднего квадрата $\overline{\delta_n^2(t)}$, применяют также величину δ_n , равную корню квадратному из $\overline{\delta_n^2(t)}$ и называемую среднеквадратичной ошибкой.

Спектральная плотность $S_{\delta_n}(s)$ связана со спектральной плотностью помехи $S_n(s)$ соотношением

$$S_{\delta_n}(s) = \Phi(s)\Phi(-s)S_n(s),$$

где $\Phi(s)$ – передаточная функция замкнутой линейной системы с постоянными параметрами.

Спектральная плотность стационарной помехи является четной функцией s и путем факторизации может быть представлена в виде

$$S_n(s) = N(s)N(-s),$$

где $N(s)$ – изображение реализации случайной функции – помехи $n(t)$;
а $N(-s)$ – функция, комплексно сопряженная с $N(s)$.

На этом основании выражение для спектральной плотности ошибки можно записать так:

$$S_{\delta_n}(s) = [\Phi(s)N(s)][\Phi(-s)N(-s)].$$

Представляя функцию $[\Phi(s)N(s)]$ в полиномиальной форме

$$[\Phi(s)N(s)] = \frac{C_{k-1}s^{k-1} + \dots + C_1s + C_0}{d_k s^k + \dots + d_2s^2 + d_1s + d_0},$$

используемой в табличных интегралах, расчет функциональной ошибки сводим к выбору выражения табличного интеграла для соответствующего значения индекса k , подстановки в это выражение численных значений коэффициентов и вычислению $\overline{\delta_n^2(t)}$ и δ_n^- . Выражения трех первых интегралов приведены в таблице А.1 (приложение А). Этого количества интегралов достаточно для практических расчетов, которые чаще всего проводят при следующих упрощающих предположениях:

– в передаточной функции разомкнутой системы пренебрегают i -ми постоянными времени T_i , численные значения которых не превышают величину $(0,01 \dots 0,02) T_m$, T_m – наибольшая постоянная времени, полагая, что в устойчивой системе эти постоянные времени не оказывают заметного влияния на величину среднего квадрата флуктуационной ошибки;

– помеха представляет собой широкополосное воздействие, спектральная плотность которого в пределах полосы пропускания следящей системы постоянна и может быть аппроксимирована выражением

$$S_n(s) = N^2.$$

Пример. Передаточная функция азимутальной системы в разомкнутом состоянии имеет вид

$$W(s) = \frac{K_{\Omega}(T_2s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_3s + 1)(T_{\Phi}s + 1)},$$

где $K_{\Omega} = 250 \text{ с}^{-1}$;

$$T_1 = 1 \text{ с};$$

$$T_2 = 0,175 \text{ с};$$

$$T_3 = 0,016 \text{ с};$$

$$T_{\Phi} = 0,006 \text{ с}.$$

На вход системы поступает помеха со спектральной плотностью $S_n(0) = N^2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ град²/Гц. Необходимо рассчитать средний квадрат и среднеквадратичное значение функциональной ошибки. Для приближенных расчетов пренебрегают постоянными времени T_3 и T_Φ .

Решение. Определяют упрощенное выражение передаточной функции замкнутой системы

$$\Phi(s) = \frac{W(s)}{1+W(s)} = \frac{K_\Omega(T_2s+1)}{T_1s^2 + (1+K_\Omega T_2)s + K_\Omega}.$$

Спектральную плотность помехи $S_n(0) = N^2$ представляют в виде произведения сомножителей $S_n(s) = N \cdot N$.

Записывают изображение реализации функциональной ошибки

$$\delta_n(s) = [\Phi(s) \cdot N] = \frac{NK_\Omega T_2 s + NK_\Omega}{T_1 s^2 + (1 + K_\Omega T_2) s + K_\Omega}.$$

Используя табличный интеграл при $k = 2$, находят средний квадрат ошибки

$$\begin{aligned} \overline{\delta_n^2(t)} &= \frac{C_1^2}{2d_2d_1} + \frac{C_0^2}{2d_1d_0} = \frac{N^2 K_s^2 T_2^2}{2T_1(1+K_\Omega T_2)} + \frac{N^2 K_\Omega}{2(1+K_\Omega T_2)} = \\ &= \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{2} \left[\frac{250^2 \cdot 0,175^2}{1+250 \cdot 0,175} + \frac{250}{1+250 \cdot 0,175} \right] = 7,97 \text{ град}^2 \end{aligned}$$

и среднеквадратичную ошибку

$$\delta_n = \sqrt{\overline{\delta_n^2(t)}} = \sqrt{7,97 \cdot 10^{-3}} \cdot 60 = 5,9 \text{ угл. мин.}$$

1.6.10 Определение флуктуационных ошибок с помощью Matlab (Simulink)

Этот подход позволяет сравнительно легко и быстро оценить функциональные ошибки системы с учетом всех ее частей и связей; принять во внимание, что в реальных условиях действующая на систему помеха отличается от белого шума.

Пусть помеха $n(t)$, поступающая на вход системы, представляет собой широкополосное случайное воздействие со спектральной плотностью

$$S_n(s) = \frac{2\alpha\sigma_n^2}{\alpha^2 - s^2},$$

где s интерпретируется как $j\omega$, а параметр α – как граничное значение полосы частот (по уровню 3 дБ), в пределах которой соблюдается постоянство спектральной плотности ($S_n(0) = \text{const}$).

Во всех случаях, когда α превышает эффективную полосу пропускания (полосу шума) $\omega_{\text{ш}}$ замкнутой следящей системы, помеху можно рассматривать как белый шум со спектральной плотностью $S_n(0) = 2\sigma_n^2 / \alpha$.

Для разомкнутой угломерной системы с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{K_{\Omega}(T_2s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_3s + 1)(T_{\Phi}s + 1)}$$

полосу пропускания можно определять по формуле

$$\omega_{\text{ш}} = (1,6 \dots 3,0) K_{\Omega} T_2 / T_1.$$

Например, при $K_{\Omega} = 250 \text{ c}^{-1}$; $T_1 = 1 \text{ с}$ и $T_2 = 0,175 \text{ с}$ имеем $\omega_{\text{ш}} = 70 \dots 130 \text{ c}^{-1}$.

Схему моделирования помехи и измерения ее среднего квадрата и среднеквадратичного значения создают в такой последовательности:

1 Заданную спектральную плотность $S_n(s)$ представляют в виде произведения сомножителей

$$\begin{aligned} S_n(s) &= \frac{2\alpha\sigma_n^2}{\alpha^2 - s^2} = \frac{2\sigma_n^2}{\alpha} \cdot \left[\alpha \frac{1/s}{1 + \alpha/s} \right] \cdot \left[\alpha \frac{1/-s}{1 + \alpha/-s} \right] = \\ &= S_w(0) W_{\Phi\Phi}(s) W_{\Phi\Phi}(-s), \end{aligned}$$

где $S_w(0)$ – спектральная плотность мощности первичного источника шума, равная заданной спектральной плотности мощности $S_n(0) = N^2$, например $N^2 = \frac{2\sigma_n^2}{\alpha}$;

$W_{\Phi\Phi}(s)$ – передаточная функция гипотетического фильтра, формирующего динамические свойства помехи:

$$W_{\Phi\Phi}(s) = \alpha \cdot \frac{1/s}{1 + \alpha/s};$$

$W_{\Phi\Phi}(-s)$ – передаточная функция, комплексно сопряженная с $W_{\Phi\Phi}(s)$.

2 В соответствии с равенством $S_n(s) = S_w(0) W_{\Phi\Phi}(s) W_{\Phi\Phi}(-s)$ оформляют схему моделирования.

Один из возможных вариантов схемы приведен на рисунке 1.8. Показанные на схеме блоки, их назначение, настройка параметров и другие полезные сведения изложены в приложении Б.

При недостаточной практической подготовке в области моделирования случайных процессов и систем управления в среде Matlab (Simulink) следует обратиться к приведенным ниже источникам [9–12] и др. или за консультацией к преподавателю.

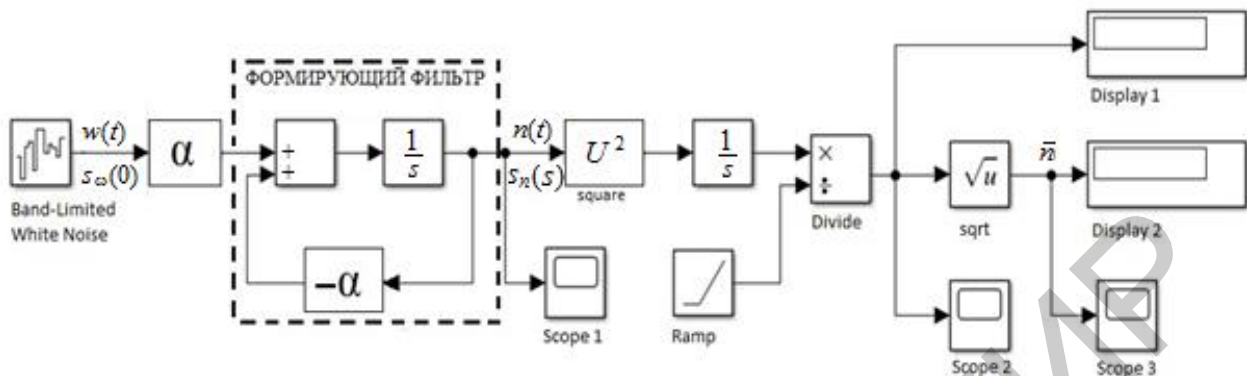


Рисунок 1.8 – Модель генерируемой помехи $n(t)$ с заданной спектральной плотностью $S_n(s)$ и процесса измерения среднего квадрата и среднеквадратичного значения этой помехи

3 Создают файл модели шума с помощью команды *File/new/model* и в открывшееся окно перемещают из библиотеки *Source* блок *Band-Limited White Noise*, который создает первичный шум $w(t)$ с равномерно распределенным спектром в полосе частот, ограниченной частотой дискретизации, обратной интервалу дискретизаций *Sample time* T_s .

В окне настройки блока (рисунок Б.1 приложения Б) устанавливают параметры: *Noise power* – $S_w(0)$; *Sample time* – T_s и *Seed* – 23341 (начальное значение случайного числа). Численное значение $S_w(0)$ задается преподавателем, например $S_w(0) \nu N^2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ град²/Гц. Интервал дискретизации T_s выбирают из условия

$$T_s = T_i / k ,$$

где T_i – наименьшая постоянная времени угломерной системы, например $T_\phi = 0,006$ с;

k – число, выбираемое из диапазона 2–3, например $k = 3$ (конкретное значение можно уточнять в процессе моделирования).

4 К выходу блока *Band – Limited White Noise* – подключают формирующий фильтр. Коэффициент передачи фильтра α и коэффициент обратной связи $-\alpha$ выбирают из диапазона значений 70...130 (единица измерения с^{-1}), например $\alpha = 90 \text{ с}^{-1}$.

Конкретное значение α уточняют при анализе длительности установления среднеквадратичного значения помехи, которое задается в блоке *Transfer Fcn* (определение линейного звена через задание его передаточной оценки).

5 Для проверки установленных свойств сформированного белого гауссовского шума к выходу фильтра подключают модель оценивания среднего квадрата и среднеквадратичного значения по формулам

$$\hat{n}^2(t) = \frac{1}{T} \int_0^T n^2(t) dt \quad \text{и} \quad n_1 = \sqrt{\hat{n}^2(t)} .$$

Модель составляют из блоков, хранящихся в библиотеке *Simulink/HORcoder/Math Operations* и реализующих функции: *square* – U^2 (вычисление квадрата входного сигнала), *Divide* (вычисление частного от деления $\int_0^T U^2 dt$ на время T); *sqrt* (квадратный корень).

Для просмотра процессов и оценивания значений $\hat{n}^2(t)$ и \hat{n}_1 в конце интервала просмотра подключают осциллографы *Scope* 1, 2 и 3 и блоки *Display* 1 и 2 из библиотеки *Sinks*.

6 Перед проверкой необходимо задать параметры моделирования в панели управления меню *simulations/model configuration parameters/solver*. В окошке моделирования (см. рисунок Б. 3 приложения Б) указывают параметры: *Start time* – 0,0 (начальный момент времени); *Stop time* – 10 (конечное время, величина которого задается равной 10 с, но при необходимости его можно менять); *Sample time*.

7 Определяют средний квадрат и среднеквадратичное значение флуктуационной ошибки $\delta_n(t)$. С этой целью схему моделирования шума $n(t)$ подключают ко входу угломерной следящей системы, а к выходу системы – схему моделирования измерительных процессов среднего квадрата и среднеквадратичного значения флуктуационной ошибки.

8 Запускают систему моделирования флуктуационной ошибки и записывают показания дисплеев $\delta_n^2(t)$ и δ_n в конце интервала моделирования.

9 Для наглядного представления о работе системы в условиях помех подают на вход системы гармонический сигнал $x(t)$, например $x(t) = 0,2\sin 6,28t$, суммируют его с помехой $n(t)$ и осциллографируют процессы на входе и выходе системы.

10 Оформляют результаты моделирования и формируют выводы по результатам исследований.

2 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ

2.1 Область применения

Системы автоматического управления по быстродействию могут использоваться для управления движением подвижного объекта из одного начального состояния в другое заданное конечное состояние за наиболее приемлемую длительность перемещения времени с учетом естественных ограничений. Длительность перемещения выражается в форме функционала

$$J = \int_{t_1}^{t_2} 1 \cdot dt = t_2 - t_1,$$

где t_1 и t_2 – начальный и конечный моменты времени.

По этому показателю различают системы максимального быстродействия, финитного и терминального управления.

В системах максимального быстродействия момент времени t_2 не фиксируется, а цель управления заключается в том, чтобы привести объект в конечное состояние за кратчайшее время без перерегулирования.

В системах финитного управления объект переводится из заданного начального состояния в некоторый текущий момент времени $t = t_1$ в заданное конечное состояние в момент $t_2 = t_1 + T_{\text{оп}}$, где $T_{\text{оп}}$ – интервал оптимизации. Системы получили применение в станках с числовым программным управлением, станочных модулях, в робототехнике, в подъемно-транспортных машинах.

В системах терминального управления подвижный объект переводится из некоторого состояния в текущий момент времени $t = t_1$ в заданное состояние в заданный промежуточный момент времени t'_2 , предшествующий конечному моменту времени t_2 . Задачи, решаемые системами терминального управления, весьма разнообразны. Это стыковка космических аппаратов, дозаправка в воздухе самолетов, управление воздушным движением в районе аэропорта, мягкая посадка вертолетов и т. д.

В некоторых дисциплинах системы финитного и терминального управления имеют другие названия. Например, систему финитного управления называют позиционной системой управления, терминального управления – системой управления конечным состоянием.

Важной частью задачи оптимального управления по быстродействию является соблюдение условий безопасности движения. По этим причинам ограничивают ускорение или замедление и скорость движения. Особое внимание уделяют задаче снижения скорости объекта по мере его приближения к заданной позиции. Приближение должно быть плавным, точным, без перерегулирования.

Ниже рассматривается задача синтеза регуляторов позиционной системы управления поворотного стола и задачи проектирования позиционной системы управления транспортного робота.

2.2 Позиционная система управления поворотного стола

2.2.1 Поворотный стол

Поворотный стол – конструктивный элемент многих гибких производственных модулей, например: многоцелевых станков, обрабатывающих центров, роботизированных технологических комплексов.

Чаще всего поворотные столы применяют для транспортирования обрабатываемых заготовок, их точной фиксации по отношению к режущим инструментам и сохранению этого положения в процессе обработки.

Столы могут иметь различное количество позиций, которое последовательно по кругу занимает заготовка на различных стадиях обработки. Одна из этих позиций используется для установки и крепления заготовки на столе. Эта позиция может использоваться и для снятия обработанного изделия со стола после того, как он совершит полный оборот.

Для точной остановки поворотного стола и предотвращения его смещения под действием усилий, возникающих в процессе обработки заготовок, стол оборудован фиксаторной втулкой и механизмом фиксации.

При перемещении заготовок из одной позиции в другую движение стола должно быть плавным на протяжении всего заданного промежутка времени, а погрешность остановки не должна превышать некоторое значение по требованиям надежного срабатывания механизма фиксации. Эти условия наиболее просто обеспечиваются системой с последовательной коррекцией, построенной по схеме подчиненного регулирования.

2.2.2 Структурная схема

Структурная схема системы с двигателем постоянного тока показана на рисунке 2.1. Процесс управления происходит следующим образом.

Пусть в некоторый момент времени на вход системы поступает задающее воздействие $\varphi_{пр}$ большой величины. В этот начальный момент сигналы в обратной связи по скорости и положению еще равны нулю, а усилители регуляторов положения и скорости находятся в насыщении. В результате на вход контура тока поступает сигнал U_T , который сохраняет свое неизменное значение на протяжении всего периода нарастания скорости. При быстродействующем контуре тока с ПИ-регулятором можно считать, что на неизменном уровне будут находиться ток $i_{я}$, момент M^* и ускорение ϵ . В этом случае скорость Ω нарастает равноускоренно.

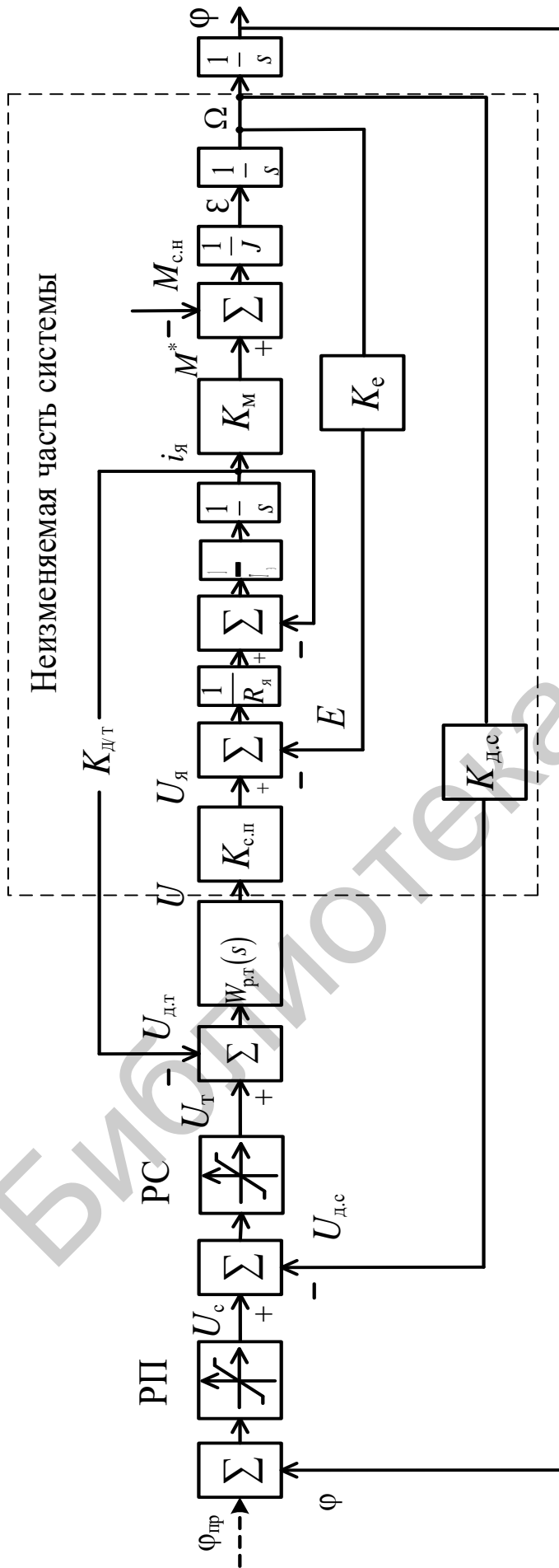


Рисунок 2.1 – Структурная схема системы позиционного управления, которая получила распространение благодаря удачному использованию нелинейных эффектов насыщения в регуляторах положения РП и скорости РС

По мере нарастания скорости увеличивается сигнал обратной связи по скорости $U_{ДС}$, и в момент, когда он достигает значения, при котором усилитель регулятора скорости выходит из насыщения, сигнал U_T быстро снижается до нуля, а движение с равноускоренного переходит в равномерное со скоростью $\Omega = \Omega_y$.

В дальнейшем при приближении к заданной позиции $\varphi_{пр}$ отклонение $\Delta\varphi = \varphi_{пр} - \varphi(t)$ уменьшается и в некоторый момент времени усилитель регулятора положения РП выходит из насыщения. Уменьшение сигнала U_c приводит к появлению сигнала U_T с отрицательным знаком. Движение стола переходит в режим торможения с равнозамедленным изменением скорости. При достижении в этом режиме пониженной в 10 раз скорости усилитель регулятора скорости выходит из насыщения, а система превращается в обычную линейную систему.

Исходными данными на синтез регуляторов являются параметры неизменяемой части системы; требования к системе в виде ограничений на ускорение, угол и длительность поворота стола, а также на точность его позиционирования.

Порядок проектирования заключается в выполнении следующих последовательных этапов:

- а) составление технического задания на проектирование, определение основных этапов проектирования, последовательности и сроков их выполнения;
- б) описание системы управления;
- в) расчет диаграммы угловой скорости стола при отработке программных движений;
- г) определение параметров неизменяемой части системы и ограничений на переменные состояния;
- д) расчеты и исследования контура тока, контура скорости и основного контура;
- е) вопросы реализации системы;
- ж) оформление рабочего чертежа и пояснительной записки.

2.3 Рабочий чертеж

На чертеже должны быть показаны структурная схема системы, технические характеристики, графики изменения ускорения, скорости и угла поворота стола при отработке программных перемещений. На схеме и на графиках все условные обозначения, символы и индексы должны быть изображены точно такими, как в тексте пояснительной записки. Технические характеристики помещают на свободном поле чертежа; текст пишут сверху вниз; содержание текста должно быть кратким и вместе с тем исчерпывающим. Графики изменения угла поворота, скорости и ускорения должны быть расположены друг под другом, иметь координатные сетки, совмещенные по вертикальным линиям, и одинаковый масштаб шкалы времени. По осям ординат должны быть даны числовые значения отложенных на них величин, указаны условные обозначения и размерности. Числовые значения времени допускается указывать только на оси времени

ниже всех расположенного графика. Допускается на осях ординат условные обозначения отложенных величин заменять словесной надписью, которую пишут отдельной строкой и располагают посередине оси ординат. Размерности отделяют от подписи запятой. Допускается предварительно отпечатанную подпись и размерность координат аккуратно наклеивать параллельно оси ординат.

2.4 Содержание основных разделов пояснительной записки

В общем случае текст пояснительной записки делится на несколько разделов.

1 Описание системы. Содержит сведения о назначении системы; описание структурной схемы и принципа ее действия; требования, предъявляемые к системе; расчет профиля изменения угловой скорости стола, параметров неизменяемой части системы и задачи курсового проектирования.

2 Аналитический расчет регуляторов движения. Раздел включает в себя расчет параметров регуляторов с учетом условий их работы в системе на этапах разгона, движения с установившейся скоростью, торможения и позиционирования.

3 Исследование спроектированной системы с учетом особенностей ее применения и технической реализации. Такими особенностями могут быть: вариации момента инерции, отнесенные к оси вращения стола; нелинейность типа люфт или сухое трение, которое проявляется в характере изменения угла поворота стола; временные задержки, возникающие при цифровой реализации алгоритма управления и др. Конкретные особенности указываются преподавателем.

2.5 Задание на проектирование

Задание: синтезировать регуляторы позиционной системы управления поворотного стола по структурной схеме рисунка 2.1 и данным таблицы 2.1.

Режим работы системы – циклический по графику рисунка 2.2 с паузой на время обработки деталей.

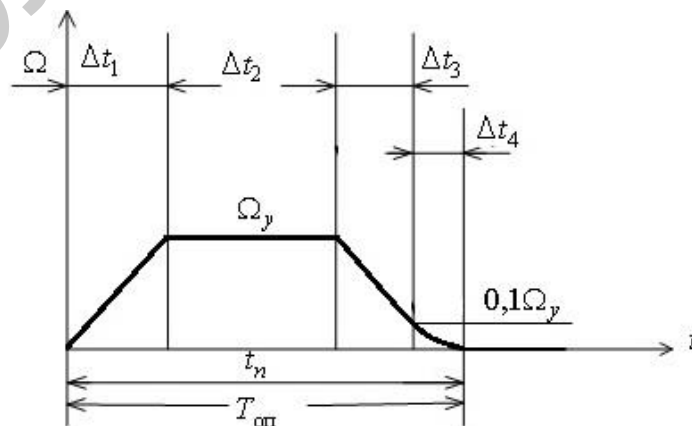


Рисунок 2.2 – Изменение угловой скорости поворотного стола

Таблица 2.1 – Параметры и исходные данные на проектирование позиционной системы управления поворотного стола

Параметр	Вариант					
	0	1	2	3	4	5
Диаметр стола D , мм	1900	1800	1500	1500	2000	2000
Угол поворота φ , град	120	120	90	90	90	90
Интервал длительности поворота $T_{оп}$, с	5	4,5	5	4,5	5	5
Допустимое ускорение a , м/с ²	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5	0,6
Погрешность позиционирования, отнесенная к диаметру D , Δ , мм	0,6	0,8	1,0	0,8	0,7	0,8
Момент инерции, приведенный к оси стола J , кг·м ²	342	316	257	236	470	406
Момент сопротивления движению M_c , Н·м	24	32	31	28	30	35
Активное сопротивление обмотки якорной цепи двигателя $R_я$, Ом	8,5	3,6	8,5	3,2	3,0	3,6
Электромагнитная постоянная якорной цепи $T_я$, мс	7,0	8,2	7,0	8,2	6,0	5,0
Примечание – При расчетах принять: коэффициент момента $K_M = 68$ Н·м/А, коэффициент перегрузки по моменту $\lambda = 2$, коэффициент противоЭДС $K_e = 62$ В·с/рад, коэффициент трения качения $\mu = 0,01$						

2.6 Примеры расчетов по варианту 4 таблицы 2.1

2.6.1 Расчет профиля угловой скорости поворотного стола

Расчет выполняют с помощью формул по известным механическим величинам, заданным в варианте 4 таблицы 2.1.

Угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{a}{D/2} = \frac{0,5}{2/2} = 0,5 \text{ рад/с}^2.$$

Для последующих расчетов принимают длительность поворота стола с коэффициентом запаса, равным 0,9:

$$t_n = 0,9T_{оп} = 0,9 \cdot 5 = 4,5 \text{ с.}$$

Установившаяся скорость движения

$$\Omega_y = \frac{\varepsilon t_{\text{п}} - \sqrt{(\varepsilon t_{\text{п}})^2 - 4\varepsilon\varphi}}{2} =$$
$$= \frac{0,5 \cdot 0,45 - \sqrt{(0,5 \cdot 0,45)^2 - 4 \cdot 0,5 \cdot 90 / 57,3}}{2} = 0,43 \text{ рад/с.}$$

Время разгона до установившейся скорости

$$\Delta t_1 = \Omega_y / \varepsilon = 0,43 / 0,5 = 0,86 \text{ с.}$$

На интервале времени Δt_4 тормозной путь ΔS_4 , отнесенный к наружному диаметру стола, находят по специальной формуле:

$$\Delta S_4 = \frac{\Delta}{0,12} = \frac{0,4}{0,12} = 3,2 \text{ мм.}$$

Интервал времени

$$\Delta t_4 = \frac{\Delta S_4}{\frac{1}{2} \cdot 0,1 \Omega_y \cdot \frac{D}{2} \cdot 1000} = \frac{3,2}{\frac{1}{2} \cdot 0,10,43 \cdot \frac{2}{2} \cdot 1000} = 0,15 \text{ с.}$$

Время торможения с постоянным замедлением

$$\Delta t_3 = \frac{0,9 \Omega_y}{\varepsilon} = \frac{0,9 \cdot 0,43}{0,5} = 0,77 \text{ с.}$$

Угол поворота стола φ_2 при движении на интервале времени Δt_2 с постоянной скоростью Ω_y

$$\varphi_2 = \varphi - \frac{1}{2} \Omega_y \Delta t_1 - \frac{1}{2} \cdot 0,9 \Omega_y \Delta t_3 - \frac{1}{2} \cdot 0,1 \Omega_y \Delta t_4 =$$
$$= 1,57 - \frac{1}{2} \cdot 0,43 \cdot 0,86 - \frac{1}{2} \cdot 0,9 \cdot 0,43 \cdot 0,77 - \frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot 0,43 \cdot 0,15 = 1,23 \text{ рад.}$$

Интервал времени

$$\Delta t_2 = \frac{\varphi_2}{\Omega_y} = \frac{1,23}{0,43} = 2,87 \text{ с.}$$

Проверка времени движения

$$t_{\text{п}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 = 0,86 + 2,87 + 0,77 + 0,15 = 4,64 \text{ с.}$$

Условие $t_n \leq T_{\text{оп}} = 5 \text{ с}$ соблюдается.

2.6.2 Расчет параметров неизменяемой части системы

Расчет выполняют по формулам связи между физическими величинами.
Движущий момент

$$M^* = M_c + J \cdot \varepsilon = 30 + 470 \cdot 0,5 = 265 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Ток якорной цепи двигателя

$$I_{\text{я}} = \frac{M^*}{K_{\text{м}}} = \frac{265}{68} = 3,9 \text{ А}.$$

Коэффициент передачи датчика тока $K_{\text{д.т}}$ при допустимой перегрузке двигателя по току $\lambda = 2$ и унифицированном значении сигнала датчика $U_{\text{ун}} = 10 \text{ В}$:

$$K_{\text{д.т}} = \frac{U_{\text{ун}}}{\lambda I_{\text{я}}} = \frac{10}{2 \cdot 3,9} = 1,28 \text{ В/А}.$$

Коэффициент передачи датчика скорости при стандартном значении унифицированного сигнала $U_{\text{ун}} = 10 \text{ В}$:

$$K_{\text{д.с}} = \frac{U_{\text{ун}}}{\Omega_{\text{я}}} = \frac{10}{0,43} = 23,2 \text{ В} \cdot \text{с/рад}.$$

Напряжение на выходе силового преобразователя

$$U_{\text{я}} = K_{\text{е}} \Omega_{\text{я}} + \lambda R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 62 \cdot 0,43 + 2 \cdot 3,0 \cdot 3,9 = 51 \text{ В}.$$

Коэффициент силового преобразователя при стандартном значении $U_{\text{ун}} = 10 \text{ В}$:

$$K_{\text{с.п}} = \frac{U_{\text{я}}}{U_{\text{ун}}} = \frac{51}{10} = 5,1.$$

2.6.3 Расчет регулятора тока

Регулятор имеет особое значение, ограничивая ток в якоре, а следовательно, движущий момент M^* и ускорение инерционной нагрузки на неизменном уровне, а на этапе движения с установленной скоростью – на требуемом минимальном уровне. Рекомендуется выбирать регулятор пропорционально-интегрального действия. Параметры регулятора выбирают таким образом, чтобы переходный процесс в контуре тока был аperiodическим и как можно быстрее достигал требуемого значения тока. Причем в период нарастания скорости ошибка регулирования тока не должна превышать значение $\Delta I_{\text{я}} = 0,02 I_{\text{я}}$. Эти условия обеспечиваются, если параметры выбирать следующим образом:

$$T_{\text{р.т}} = T_{\text{я}},$$

$$K_{p.т} \geq \frac{T_{p.т} K_e \Omega_y}{0,02 I_{я} K_{д.т} K_{с.п}}$$

Результат расчетов уточняют путем моделирования контура в переходном и установившемся режимах.

2.6.4 Моделирование контура тока

Схема моделирования показана на рисунке 2.3.

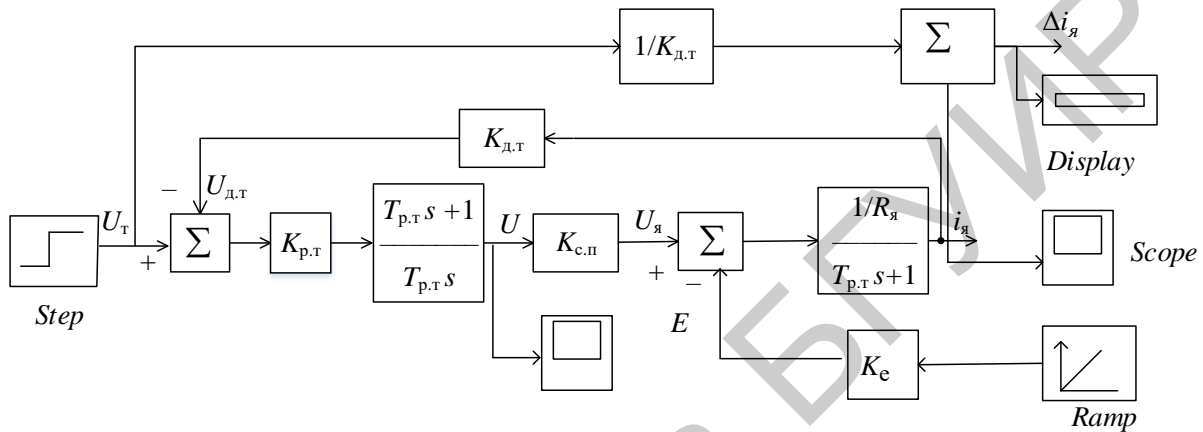


Рисунок 2.3 – Схема моделирования контура тока с пропорционально-интегральным регулятором

Моделирование проводят в следующей последовательности:

1 Используя библиотеки Matlab, создают схему моделирования контура; в блоке *step* устанавливают уровень ступенчатого воздействия $U_T = K_{д.т} I_{я}$, а в блоке *Ramp*-параметр $-0,1\Omega_y$. Выбирают интервал моделирования, равный примерно 10...20 мс, и уточняют его в процессе пробных пусков моделирования.

2 При $U_T(t) = (k_{д.т} I_{я})1(t)$ и $E(t) = 0$ записывают процессы $i_{я}(t)$ и $U(t)$, определяют длительность реакций $i_{я}(t)$ и соблюдение требования $U \leq U_{\max} = 10$ В.

3 При $U_T = 0$ и $E(t) = (0,1\Omega_y)t1(t)$ записывают процессы $i_{я}(t)$, $U(t)$ и показания дисплея.

4 Анализируют результаты моделирования и при необходимости рассматривают вопрос о реализации модифицированной формы регулятора и повторяют процесс моделирования.

5 Сопоставляя результаты двух-трех вариантов реализации ПИ-регулятора, выбирают вариант контура тока с наименьшей длительностью реакций на входные воздействия, удовлетворяющий требованию $U \leq U_{ун}$.

При длительности реакций, не превышающих двух сотых времени разгона $\Delta t_1 = 0,86$ с, контур тока можно считать безынерционным, а его передаточную функцию аппроксимировать передаточной функцией $W_{\text{КТ}}(s) = \frac{1}{K_{\text{д.т}}}$.

2.6.5 Расчет параметров регулятора скорости

Структурная схема контура скорости с подчиненным быстродействующим контуром тока показана на рисунке 2.4.

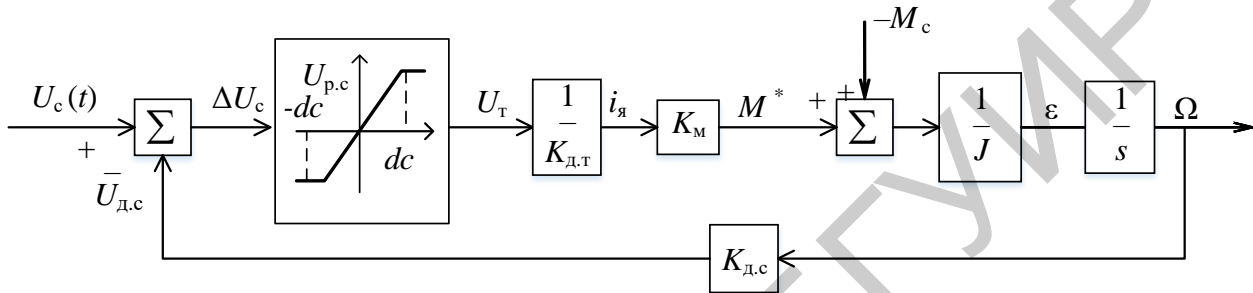


Рисунок 2.4 – Структурная схема контура скорости

Характеристика регулятора задана в форме

$$U_T = \begin{cases} U_1 & \text{при } \Delta U_c \geq d_1, \\ K_{\text{р.с}} \Delta U_c & \text{при } -d_2 < \Delta U_c < d_1, \\ -U_2 & \text{при } \Delta U_c \leq -d_2. \end{cases}$$

Величины U_1 и U_2 определяют по формулам:

– для движения с постоянным ускорением $\varepsilon = 0,5$ рад/с²:

$$U_1 = \frac{K_{\text{д.т}}}{K_M} (J\varepsilon + M_c) = \frac{1,28}{68} (2 / 70 \cdot 0,5 + 30) = 10 \text{ В};$$

– для движения с постоянным замедлением $\varepsilon = -0,5$ рад/с²:

$$U_2 = \frac{K_{\text{д.т}}}{K_M} (J\varepsilon - M_c) = \frac{1,23}{68} (2 / 70 \cdot (-0,5) - 30) = -10 \text{ В}.$$

Коэффициент усиления регулятора скорости находят, предполагая, что при движении стола с установившейся скоростью $\Omega_y = 0,43$ рад/с ошибка по скорости не должна превышать значение $\delta_\Omega = 0,02\Omega_y$:

$$K_{p.c} \geq \frac{U_c J + M_c K_{д.с}}{\delta_{\Omega} K_{д.с}^2 K_M / K_{д.т}} = \frac{10 \cdot 470 + 30 \cdot 23,2}{0,02 \cdot 0,43 \cdot 23,2^2 \cdot 68 / 1,25} = 22.$$

Определяем параметры:

$$d_1 = \frac{U_1}{K_{p.c}} = \frac{10}{22} = 0,45; \quad d_2 = \frac{U_2}{K_{p.c}} = \frac{-10}{22} = -0,45.$$

2.6.6 Расчет параметров регулятора положения стола

Характеристика регулятора РП (см. рисунок 2.1) задана формулами

$$U_{p.c} = \begin{cases} U_c & \text{при } \Delta\varphi \geq \Delta\varphi_T, \\ K_{p.п} \Delta U_c & \text{при } -\Delta\varphi_T < \Delta\varphi < \Delta\varphi_T, \\ -U_c & \text{при } \Delta\varphi \leq -\Delta\varphi_T, \end{cases}$$

где $U_c = 10$ В;

$\Delta\varphi_T = \varphi_{пр} - \varphi$ – угол поворота $\Delta\varphi_T$, оставшийся для торможения до полной остановки;

$$\Delta\varphi_T = \varphi_{пр} - \frac{1}{2} \Omega_y \cdot \Delta t_1 - \Omega_y \Delta t_2 = 1,57 - \frac{1}{2} \cdot 0,43 \cdot 0,86 - 0,43 \cdot 2,87 = 0,156 \text{ рад},$$

коэффициент преобразования регулятора положения

$$K_{p.п} = \frac{U_c}{\Delta\varphi_T} = \frac{10}{0,156} = 64 \text{ В/рад.}$$

2.6.7 Проверка ошибки позиционирования

Система управления поворотного стола является астатической относительно программного задающего воздействия $\varphi_{пр}(t) = \varphi \cdot 1(t)$ и статической относительно момента сопротивления $M_c(t) = M_c \cdot 1(t)$. Поэтому ошибка позиционирования Δ_n определяется только величиной момента сопротивления и значениями параметров системы $K_{p.п}$, $K_{p.c}$, $K_{д.т}$ и K_M . Ошибку позиционирования, отнесенную к наружному диаметру стола D , определяем по формуле

$$\Delta_n = \frac{D}{2} \cdot \frac{K_{д.т} M_c}{K_{p.п} K_{p.c} K_M} = 1000 \frac{1,28 \cdot 30}{64 \cdot 22 \cdot 68} = 0,4 \text{ мм.}$$

Условие $\Delta_n \leq \Delta$ соблюдается. Если условие $\Delta_n \leq \Delta$ не выполняется, то необходимо увеличить коэффициент $K_{p.п}$ и уточнить параметр $\Delta\varphi_T = U_c / K_{p.п}$.

2.6.8 Исследование процессов в позиционной системе

Исследование проводят в такой последовательности:

1 Составляют схему моделирования (рисунок 2.5) позиционной системы, вводят параметры передаточных функций и нелинейных функций, задают параметры ступенчатых функций $\varphi_{п.р}(t) = \varphi \cdot 1(t)$ и $M_c(t) = M_c \cdot 1(t)$, устанавливают интервал времени моделирования t_M , равный $1,2 T_{оп}$, где $T_{оп}$ – заданный интервал поворота стола.

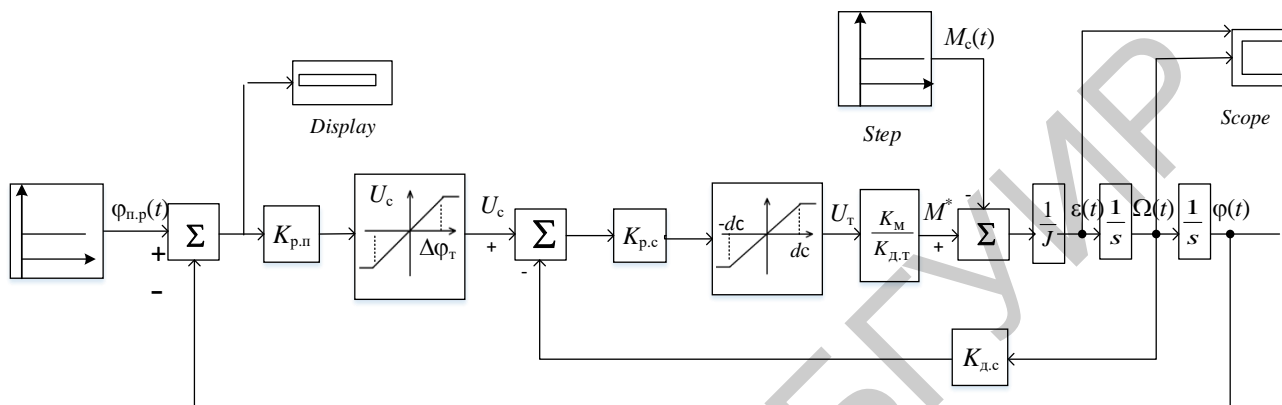


Рисунок 2.5 – Схема моделирования позиционной системы управления

2 Проводят моделирование, осциллографируют процессы $\varepsilon(t)$, $\Omega(t)$ и $\varphi(t)$, сопоставляют параметры процессов и показание дисплея с расчетными значениями, при необходимости подстраивают параметры регуляторов. Основные показатели системы (ε , t_n и Δ) заносят в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Измеренные значения показателей позиционной системы при различных значениях момента инерции J момента сопротивления M_c

Показатели качества системы	Значения моментов J и M_c							
	J	M_c	$0,85 J$	$0,9 M_c$	$0,7 J$	$0,8 M_c$	$0,5 J$	$0,7 M_c$
Время движения стола								
Ускорение ε , рад/с ²								
Точность остановки Δ , мм								

3 Повторяют моделирование системы для различных значений моментов инерции J и моментов сопротивления M_c таблицы 2.2, обусловленные изменениями загрузки стола деталями, и результаты заносят в таблицу.

4 Анализируют результаты моделирования, оформляют заключение о пригодности алгоритмов управления для практической реализации или необходимости их доработки.

На этапе моделирования позиционной системы для более глубокой проработки проекта могут быть поставлены следующие дополнительные задачи:

- 1) исследовать влияние люфта в кинематической цепи контура скорости;
- 2) исследовать влияние люфта в кинематической цепи контура по положению;
- 3) оценить влияние временной задержки, связанной с выполнением вычислительных процедур, в системе с микропроцессорным устройством.

2.7 Система позиционного управления транспортным роботом

2.7.1 Назначение робота

На рисунке 2.6 показана схема относительного расположения участков роботизированного комплекса гальванизации, оснащенных ваннами обезжиривания, химобработки, гальванизации, послегальванической обработки и финишной обработки. В состав комплекса входит участок монтажа и демонтажа кассеты с деталями для гальванизации и транспортных роботов для обслуживания ванн соответствующих участков.

Рассматриваемый робот предназначен для загрузки и разгрузки части оборудования, элементы которого на рисунке 2.6 помечены номерами позиций 1, 2, ..., 7.

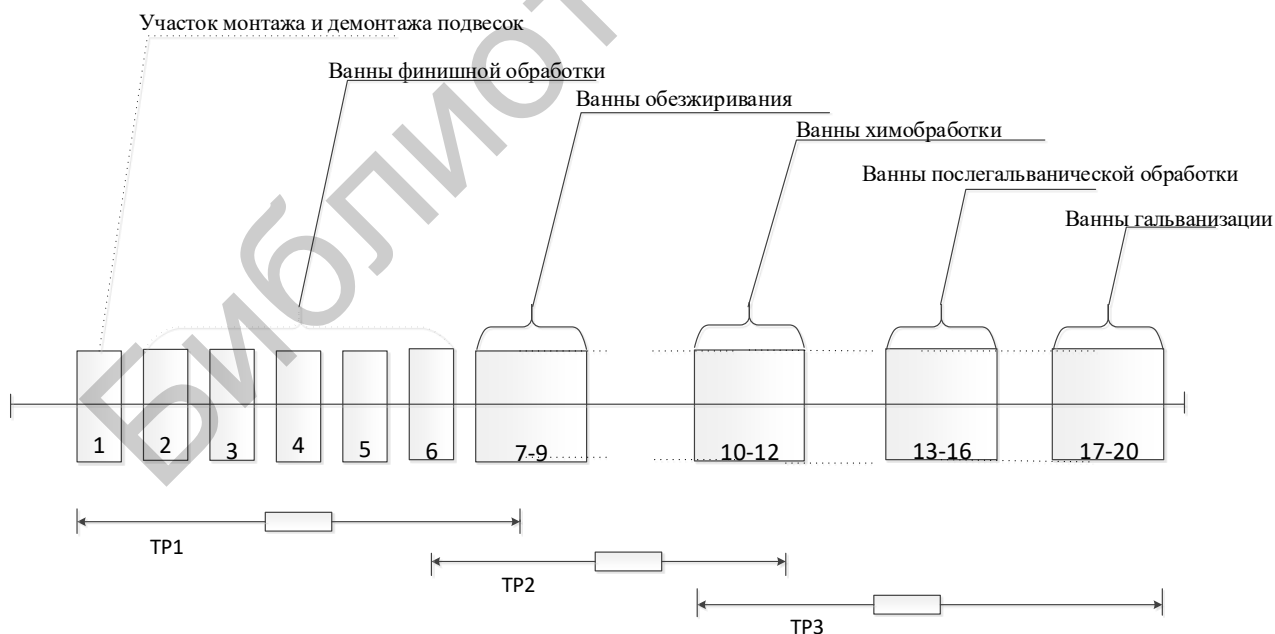


Рисунок 2.6 – Схема относительного расположения участков роботизированного комплекса гальванизации

Конструктивно робот выполнен в виде тележки, перемещающейся по монорельсу с двутавровым профилем. На тележке установлен механизм подъема с захватным устройством. Робот в соответствии с заданной программой захватывает в определенных позициях кассету с деталями и перемещает ее в другие позиции.

Цикл перемещений робота от позиции к позиции описывается взвешенным орграфом, показанным на рисунке 2.7.

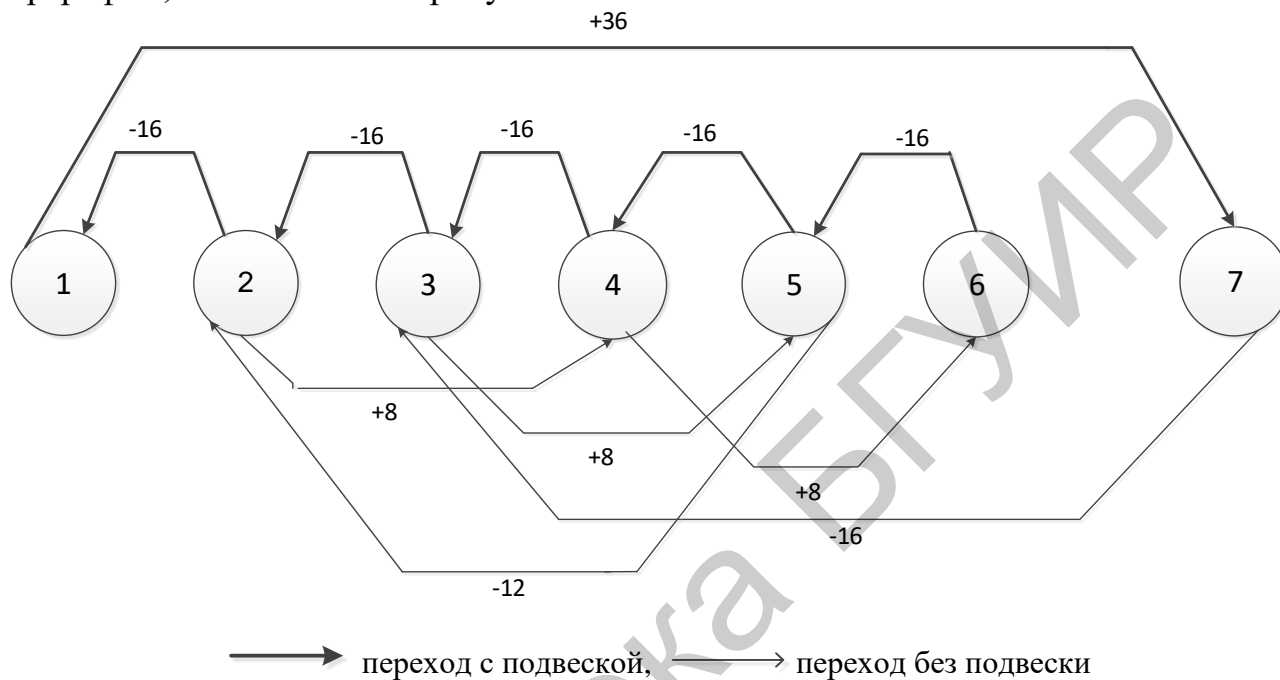


Рисунок 2.7 – Взвешенный орграф переходов транспортного робота TP1

Вершины орграфа $\{1, 2, \dots, 7\}$ соответствуют позициям обслуживаемого оборудования, а числа, приписываемые каждой дуге, – времени перехода в секундах с учетом времени на захват и подъем кассеты.

Робот должен подходить к каждой позиции чуть заблаговременно, сокращая простои оборудования в ожидании обслуживания. Длительности технологических операций в ваннах промывки известны и приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Длительности технологических операций в ваннах $\{2, 3, \dots, 7\}$

Номер ванны	Время промывки, мин	Время стекания, с	Номер ванны	Время промывки, мин	Время стекания, с
2	1...2		5	1...2	
3	2...3		6	3...5	
4	2...3		7	2...3	30

2.7.2 Система управления транспортным роботом

Система управления построена по иерархическому принципу. Самый старший по рангу третий уровень обеспечивает управление заданной последовательностью операций по перевозке кассеты с деталями, скоординированное с работой обслуживаемого оборудования. Программа управления этого ранга представляет собой последовательность векторов, каждый из которых характеризуется численным значением протяженности и направлением перемещения робота по монорельсу. Последовательность векторов хранится в памяти системы. Запрос вектора осуществляется в соответствии с алгоритмом работы робота и условиями выполнения технологических операций в заданной части основного оборудования.

Второй по рангу уровень управления принимает поступившее по запросу задание и формирует соответствующую последовательность задающих воздействий в виде ступенчатых функций (команд) для исполнительных систем первого ранга, в число которых входят позиционные системы управления горизонтальным движением тележки и вертикальным перемещением звена с захватным устройством, системы управления логическим состоянием захватного устройства (разжат/сжат), электромагнитного тормоза каждой системы (действует – действие прекращено), электропитания (включено/выключено) и т. д.

На рисунке 2.8 показана структурная схема позиционной системы управления горизонтальным перемещением транспортного робота в требуемую позицию, которая автоматически задается на входе системы при каждом новом требуемом движении. Неизменяемая часть системы включает в себя асинхронный двухфазный двигатель, редуктор, силовой преобразователь между источником питания и двигателем, регулятор тока и датчики тока, скорости и перемещения. Назначение неизменяемой части заключается в том, чтобы в соответствии с поступившим сигналом U_y обеспечить соответствующее преобразование энергии источника питания в механическую энергию движения.

При описании динамических свойств неизменяемой части системы пренебрегают инерционностью электромагнитных переходных процессов из-за их быстротечности. В этом случае передаточную функцию неизменяемой части описывают передаточной функцией

$$W(s) = \frac{K}{s(T_M s + 1)},$$

где K – коэффициент передачи неизменяемой части;

T_M – электромеханическая постоянная времени.

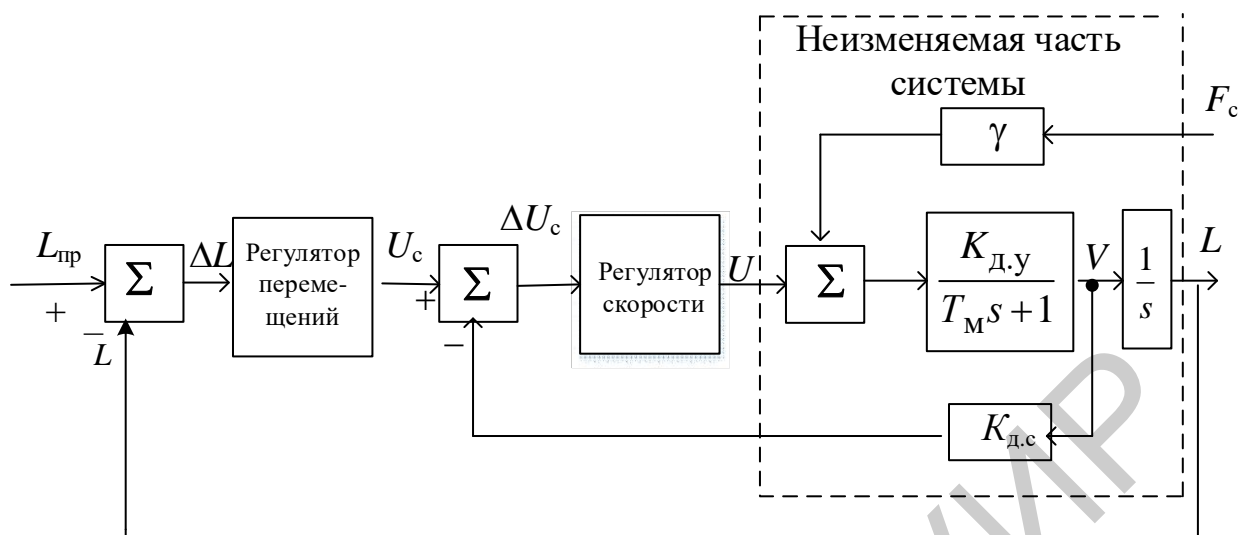


Рисунок 2.8 – Структурная схема с горизонтальным перемещением транспортного робота

2.7.3 Задание на проектирование

Задание 1: синтезировать регуляторы позиционной системы управления транспортного робота по структурной схеме рисунка 2.8 и данным таблицы 2.4.

Режим работы – по графику изменения скорости движения (рисунок 2.9). Протяженность пути $L_{пр}$ и направление движения задаются в соответствии с конкретно выполняемым движением в ряду других движений, описание которых дано на рисунке 2.7.

Задание 2: на основании взвешенного орграфа (рисунок 2.7) и данных таблицы 2.3 разработать подсистему управления сменой фиксированных задающих воздействий на систему управления транспортного робота.

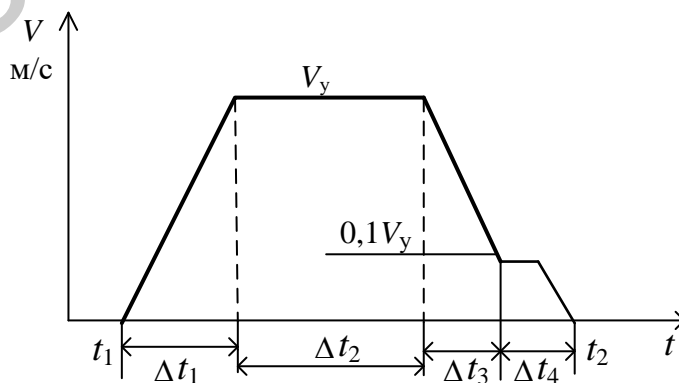


Рисунок 2.9 – Изменение скорости движения по моторельсу транспортного робота

Таблица 2.4 – Параметры и исходные данные задания на синтез системы управления транспортного робота

Наименование параметров	Варианты				
	0	1	2	3	4
Диаметр колеса тележки D , мм	100	120	100	120	100
Максимальная скорость V_{\max} , м/с	0,5				
Установочная скорость V_y , м/с	0,2	0,18	0,24	0,32	0,24
Допустимое ускорение a , м/с ²	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6
Расстояние между точками позиционирования L , м	0,75				
Точность позиционирования Δ , мм	±5	±2	±6	±3	±5
Максимальная скорость вертикальных перемещений $V_{v \max}$, м/с	0,32				
Установочная скорость вертикальных перемещений V_v , м/с	0,16	0,2	0,24	0,16	0,2
Допустимое ускорение подъема (снижения) a_v , м/с ²	0,6				
Масса тележки m_T , кг	350	400	320	350	350
Масса груза m_G , кг	50	100	150	100	120
Коэффициент трения в механической системе μ	0,003	0,005	0,004	0,006	0,003
Коэффициент передачи двигательной установки $K_{д.у}$, В·с/рад.	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04
Механическая постоянная времени T_M , с	0,12	0,2	0,15	0,18	0,14
Коэффициент силы сопротивления движения γ , в/н	0,26	0,39	0,42	0,32	0,43

3 СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

3.1 Назначение систем

В металлообрабатывающих станках следящие системы осуществляют перемещение инструмента относительно заготовки для придания ей определенной формы и размеров. К станкам относят и технологическое оборудование, использующее другие виды обработки, например лазерный луч.

У большинства станков следящая система обеспечивает прямолинейное движение. Совместная работа нескольких следящих систем с прямолинейным движением обеспечивает перемещение инструмента по любой пространственной траектории.

Следящие системы станков с ЧПУ строят по схеме подчиненного регулирования, структура которой показана на рисунке 3.1. Структурная схема трехконтурной системы управления с последовательно включенными регуляторами тока, скорости и перемещения отличается простотой выбора, расчета и наладки регуляторов. Получила применение в металлорежущих станках и промышленных роботах с числовым управлением.

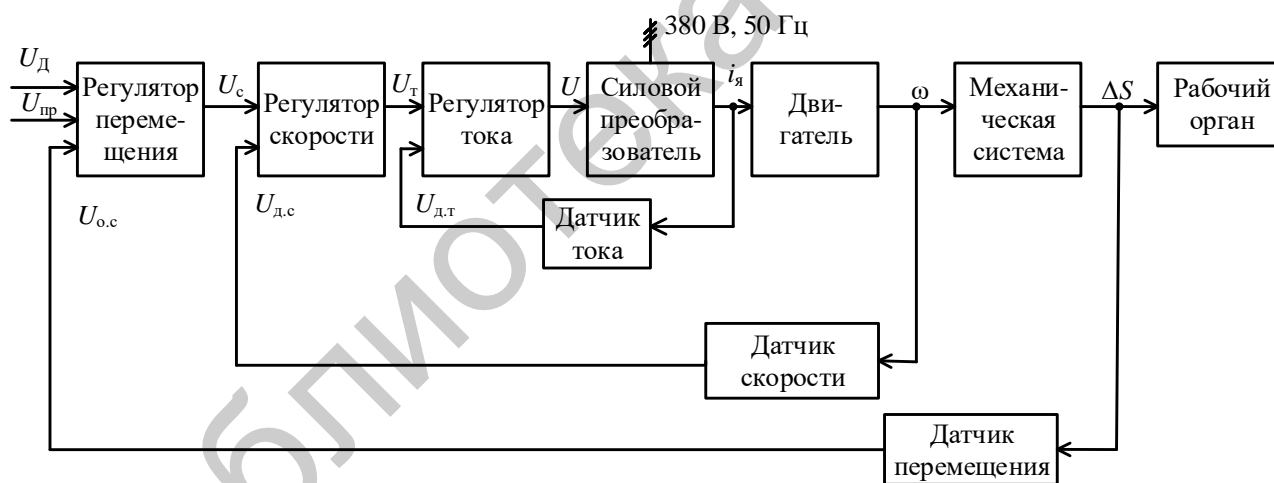


Рисунок 3.1 – Типовая структурная схема трехконтурной системы управления с последовательно включенными регуляторами тока, скорости и перемещения

Схема содержит три последовательно подчиненных контура: контур тока, подчиненный контуру скорости, и контур скорости, подчиненный контуру положения. Такое построение системы позволяет компенсировать действие возмущений на систему прежде, чем они окажут свое негативное влияние. К достоинству схемы относится также простота выбора и расчет регуляторов, удобство их настройки при пусконаладочных или регламентных работах.

Силовой преобразователь, двигатель, механическая система, рабочий орган, датчики тока, скорости и положения представляют собой неизменяемую

часть следящей системы. В качестве двигателя чаще всего используют высокомоментные двигатели постоянного тока с независимым возбуждением и питанием от силового преобразователя, построенного на базе современных полупроводниковых приборов. Применяются также и синхронные двигатели с постоянными магнитами и управляемыми преобразователями.

3.2 Исходные данные на проектирование и общий порядок проектирования

Исходными данными на проектирование являются: тип станка; схема установки детали на станке; кинематическая схема, показывающая, как обеспечиваются программные движения режущего инструмента или детали; параметры элементов неизменяемой части следящей системы, заданной в виде структурной схемы; параметры движения рабочего органа с режущим инструментом или деталью; сила резания; требования к характеру переходных процессов и к точности установившихся режимов; задающие воздействия.

Общий порядок проектирования заключается в следующем:

- а) составление технического задания на проектирование, определение основных этапов проектирования, последовательности и сроков их выполнения;
- б) анализ области применения системы и требований, предъявляемых к следящей системе;
- в) расчет параметров неизменяемой части системы;
- г) синтез и исследование контуров;
- д) проверка обеспечения требований к системе в переходных и устойчивых режимах работы;
- е) выполнение и оформление чертежа со схемой моделирования и характеристиками качественных свойств системы;
- ж) оформление текстового материала в виде пояснительной записки.

В зависимости от содержания задания суть некоторых этапов может быть изменена или дополнена вопросами, имеющими важное значение для практического применения следящей системы. К числу таких вопросов относятся:

- 1) учет нелинейных характеристик типа насыщение схмотехнических элементов системы;
- 2) оценка влияния качества кинематических цепей механической системы на динамику следящей системы;
- 3) анализ точности воспроизведения типовых элементов траектории движения и их сопряжений;
- 4) исследование следящей системы при микропроцессорной реализации регулятора положения с введением производных программных перемещений;
- 5) выбор периода квантования по условиям требуемой точности воспроизведения траектории и заданной скорости движения и т. д.

Все эти вопросы заслуживают особого внимания. В курсовом проекте исследуют один из них по указанию преподавателя.

3.3 Расчет и исследование следящей системы продольной подачи токарного станка

3.3.1 Кинематическая схема

Кинематическая схема продольной подачи показана на рисунке 3.2. На ней изображена совокупность двигателя, рабочего органа (суппорта с резцами), кинематическая группа элементов, обеспечивающая требуемые параметры движения, и датчик контроля заданных движений.

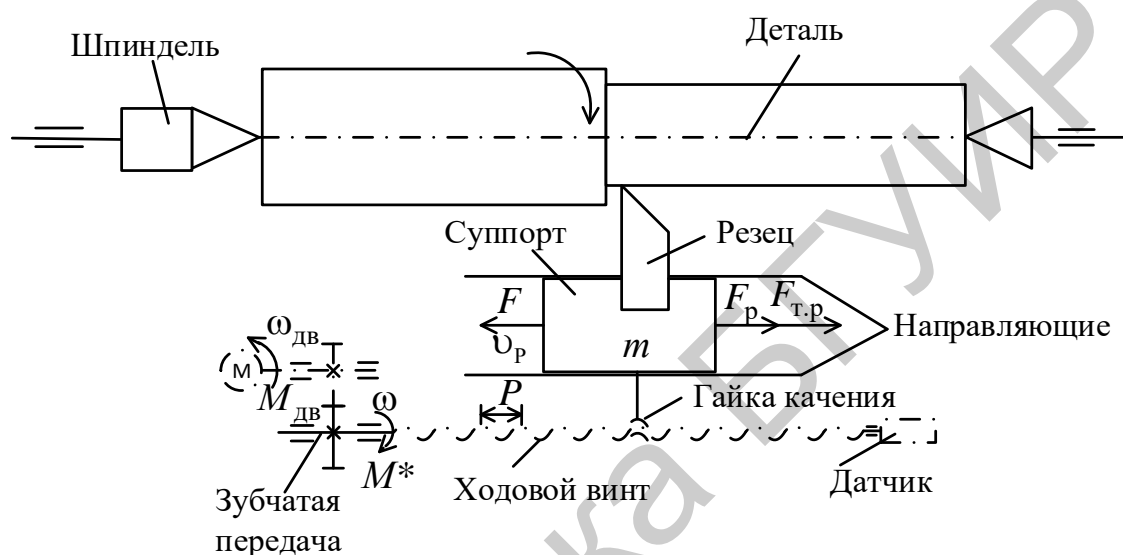


Рисунок 3.2 – Кинематическая схема

Кинематическая схема показывает, что управляемым движением в следящей системе является движение ходового винта, с которым связан датчик положения.

Главной и определяющей частью схемы является передача ходовой винт – гайка качения. Ее достоинство заключается в том, что она позволяет передавать режущему инструменту больше усилия; обладает высоким КПД порядка 0,9–0,95; обеспечивает равномерность движения инструмента (устойчивость) на малых скоростях и высокую точность передачи движения суппорту. Благодаря этим достоинствам в следящей системе чаще всего используется не датчик линейных перемещений резца, а датчик угловых перемещений ходового винта.

3.3.2 Структурная схема следящей системы

Структурная схема следящей системы, построенной на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и датчика углового перемещения винта, показана на рисунке 3.3.

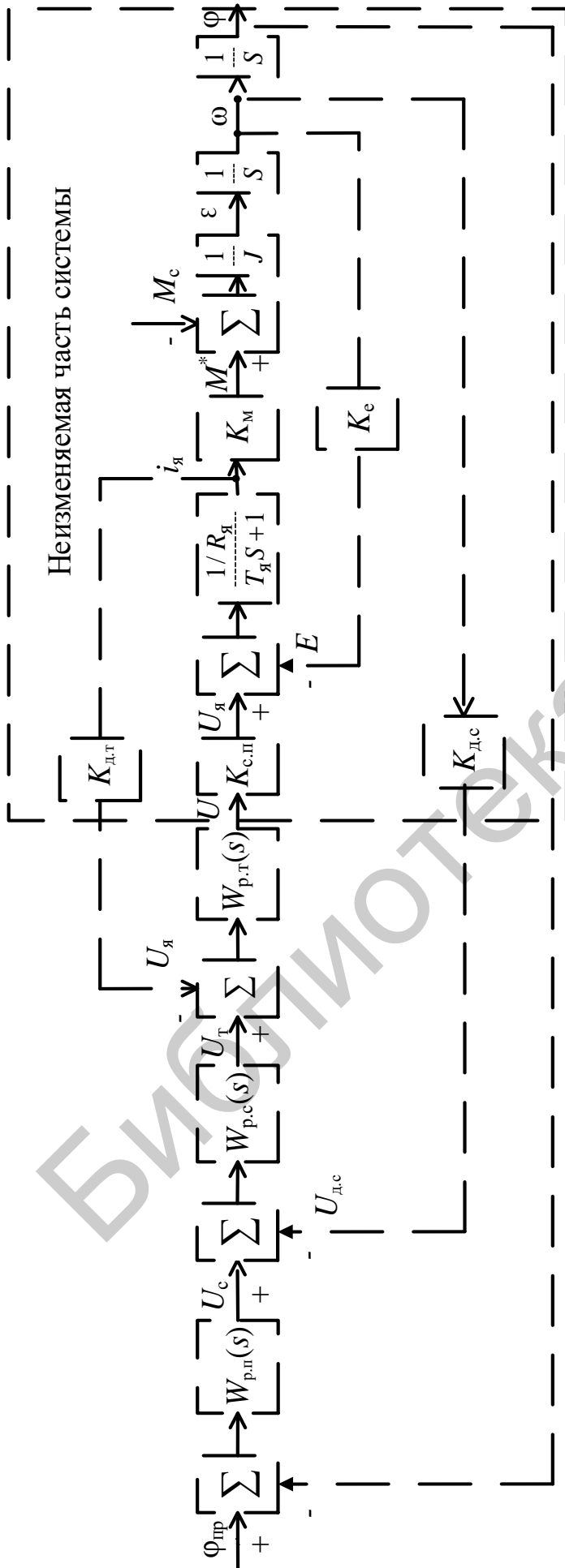


Рисунок 3.3 – Структурная схема следящей системы продольной подачи

3.3.3 Задание на проектирование

Задание 1: синтезировать регуляторы следящей системы продольной подачи суппорта токарного станка по структурной схеме рисунка 3.3, исходным данным таблицы 3.1 и следующим требованиям: при ступенчатом воздействии $\varphi_{пр}(t) = 0,314 \cdot 1(t)$ относительное перерегулирование не превышает 5 %; обеспечивает нулевую установившуюся ошибку от возмущения $M_c(t) = M_c \cdot 1(t)$.

Задание 2: синтезировать регуляторы цифровой следящей системы с подчиненным контуром скорости по структурной схеме рисунка 3.3, исходным данным таблицы 3.1 и следующим требованиям: обеспечить апериодический характер переходного процесса при позиционировании суппорта и высокую точность слежения при воспроизведении программы со скачкообразным изменением скорости в момент перехода с одного элемента траектории на сопряженный с ним другой элемент; при выполнении расчетов передаточную функцию контура тока аппроксимировать выражением вида

$$W_{к.т}(s) = \frac{1}{K_{д.т}} e^{-\tau s},$$

в котором запаздывание τ принять равным $T_{я} / 2$.

Поскольку некоторые вопросы проектирования следящих систем с программным управлением не излагаются в лекционном курсе и не освещаются в специальной литературе, приведем примеры их решения.

Таблица 3.1 – Параметры и исходные данные задания для синтеза регуляторов следящей системы токарного станка с ЧПУ

Наименование параметров	Варианты задания				
	0	1	2	3	4
Сила резания F_p , кН	6	8	12	8	10
Максимальная скорость рабочей подачи $v_{p,max}$, м/с	0,074	0,074	0,08	0,042	0,052
Скорость быстрого холостого хода $v_{х.х}$, м/с	0,16	0,14	0,16	0,12	0,16
Допустимое ускорение a , м/с ²	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5
Шаг винта P , мм	10	5	5	10	5
Момент инерции, приведенный к оси ходового винта J , кг·м ²	0,032	0,042	0,08	0,028	0,1
Сопrotивление обмотки якоря $R_{я}$, Ом	0,11	0,36	0,12	0,29	0,36
Электромагнитная постоянная обмотки $T_{я}$, мс	6,0	5,8	6,8	7,3	6,4
Коэффициент момента двигателя, приведенный к ходовому винту K_M , Н·м/А	0,8	0,84	1,2	1,2	0,96
Точность обработки Δ , мм	0,01	0,02	0,005	0,01	0,005

3.4 Примеры расчетов по варианту 0 таблицы 3.1

3.4.1 Расчет параметров неизменяемой части системы

Расчет выполняем с помощью формул.

Радиус приведения механической гайковинтовой передачи

$$\rho = \frac{P}{2\pi} = \frac{10}{6,28} \cdot 10^{-3} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м/рад.}$$

Угловая скорость холостого хода

$$\omega_{x.x} = \frac{v_{x.x}}{\rho} = \frac{0,16}{1,6 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ рад/с.}$$

Допустимое угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{a}{\rho} = \frac{0,5}{1,6 \cdot 10^{-3}} = 312,5 \text{ рад/с.}$$

Максимальная рабочая скорость ходового винта

$$\omega_p = \frac{v_{p \max}}{\rho} = \frac{0,074}{1,6 \cdot 10^{-3}} = 46,25 \text{ рад/с.}$$

Статический момент сопротивления движению винта

$$M_c = \frac{F_p}{\eta} \rho = \frac{6 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{0,85} = 11,3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Движущий момент двигателя, приведенный к ходовому винту,

$$M^* = I \cdot \varepsilon + M_c = 0,032 \cdot 312,2 + 11,3 = 21,3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Ток в якорной цепи двигателя

$$I_{\text{я}} = \frac{M^*}{K_M} = \frac{21,3}{0,8} = 26,6 \text{ А.}$$

Коэффициент передачи датчика тока при допустимой перегрузке двигателя по току $\lambda = 4$ и унифицированном значении сигнала датчика $U_{\text{yh}} = 10 \text{ В}$

$$K_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{yh}}}{I_{\text{я}} \cdot \lambda} = \frac{10}{26,6 \cdot 4} = 0,094 \text{ В/А.}$$

ПротивоЭДС при $K_e = 0,8 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$

$$E = K_e \cdot \omega_{x.x} = 0,8 \cdot 100 = 80 \text{ В.}$$

Требуемое напряжение на якорной обмотке двигателя при $R_{\text{я}} = 0,24 \text{ Ом}$

$$U_{\text{я}} = \lambda \cdot I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + E = 4 \cdot 26,6 \cdot 0,24 + 80 = 105,5 \text{ В.}$$

Сигнал управления на входе силового преобразователя при $K_{\text{с.п}} = 11$

$$U = \frac{U_{\text{я}}}{K_{\text{с.п}}} = \frac{105,5}{11} = 9,6 \text{ В.}$$

Коэффициент передачи датчика скорости при стандартном значении сигнала датчика $U_{\text{yh}} = 10 \text{ В}$

$$K_{\text{д.с}} = \frac{U_{\text{yh}}}{\omega_{\text{х.х}}} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад.}$$

Допустимая погрешность δ , приведенная к ходовому винту:

$$\delta = \frac{\Delta}{\rho} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{1,6} \cdot 3438 = 21,5 \text{ угл. мин.}$$

3.4.2 Синтез регулятора тока

В контуре тока, структурная схема которого показана на рисунке 3.4, регулятор должен обеспечить плавный без перерегулирования переходной процесс минимальной длительности, а в установившемся режиме – ошибку регулирования тока $\Delta I_{\text{я}} = 0,02 I_{\text{я}}$, не более. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяет регулятор пропорционально-интегрального действия с передаточной функцией

$$W_{\text{р.т}}(s) = K_{\text{р.т}} \cdot \frac{T_{\text{р.т}}s + 1}{T_{\text{р.т}}s}.$$

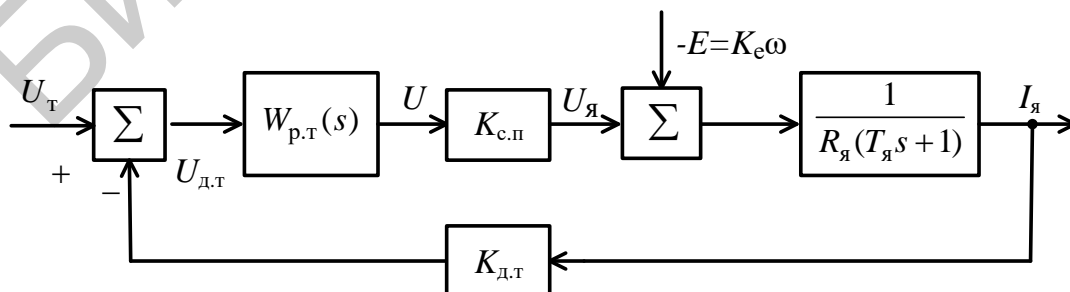


Рисунок 3.4 – Структурная схема контура тока

Расчет постоянной времени $T_{p.T}$ и коэффициента усиления $K_{p.T}$ выполняются в такой последовательности:

а) по структурной схеме рисунка 3.4 с учетом передаточной функции $W_{p.T}(s)$ записывают изображение реакции контура тока на входные воздействия:

$$I_{я}(s) = \frac{\frac{K_{p.T}K_{c.п}}{R_{я}T_{p.T}} \cdot \frac{T_{p.T}s + 1}{s(T_{я}s + 1)}}{1 + \frac{K_{p.T}K_{c.п}}{R_{я}T_{p.T}} \cdot \frac{K_{д.Т}T_{p.T}s + 1}{s(T_{я}s + 1)}} U_{Т}(s) - \frac{\frac{1}{R_{я}} \cdot \frac{1}{T_{я}s + 1}}{1 + \frac{K_{p.T}K_{c.п}K_{д.Т}}{R_{я}T_{p.T}} \cdot \frac{T_{p.T}s + 1}{s(T_{я}s + 1)}} E(s);$$

б) выбирают $T_{p.T} = T_{я}$, сокращают общие сомножители и приводят выражение для $I_{я}(s)$ к виду

$$I_{я}(s) = \frac{1}{K_{д.Т}} \cdot \frac{1}{\tau_1 s + 1} U_{Т}(s) - \frac{\tau_2 s}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_я s + 1)} E(s),$$

где

$$\tau_1 = \frac{R_{я}T_{p.T}}{K_{д.Т}K_{p.T}K_{c.п}}, \quad \tau_2 = \frac{T_{p.T}}{K_{д.Т}K_{p.T}K_{c.п}};$$

в) при ступенчатых воздействиях $U_{Т}(t) = U_{Т} \cdot 1(t)$ и $E(t) = K_e \omega_{уст} \cdot 1(t)$, которым соответствуют изображения $U_{Т}(s) = U_{Т}/s$ и $E(s) = K_e \omega_{уст} / s$ получают выражение для установившегося значения тока:

$$\Delta I_{я\text{уст}} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot I_{я}(s) = \frac{U_{Т}}{K_{д.Т}} - 0;$$

первое слагаемое представляет собой желаемое значение тока, а второе, равное нулю, – ошибку $\Delta I_{я}$, вносимую противоЭДС;

г) определяют ошибку контура тока при линейном изменении скорости, т. е. при $E(t) = K_e(0, 1\omega_{p\text{max}})t1(t)$, которому соответствует преобразование $E(s) = K_e \omega_{уст} / s^2$:

$$\Delta I_{я} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{K_e \omega_{уст\text{max}}}{s^2} \cdot \frac{\tau_2 s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_я s + 1)} = \frac{K_e \omega_{уст} T_{p.T}}{K_{p.c} K_{c.п} K_{д.Т}};$$

д) задают величину ошибки, например $\Delta I_{я} = 0,02 I_{я}$, и получают формулу для коэффициента усиления регулятора тока

$$K_{p.T} \geq \frac{K_e \omega_{уст} T_{p.T}}{0,02 I_{я} K_{c.п} K_{д.т}};$$

е) вычисляют коэффициент при номинальных исходных данных, например при $K_e = 0,8 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$; $\omega_{уст} = \omega_{x.x} = 100 \text{ рад/с}$; $T_{p.T} = \tau_2 = 0,006 \text{ с}$; $I_{я} = 26,6 \text{ В/А}$; $K_{c.п} = 11$; $K_{д.т} = 0,094 \text{ В/А}$ имеем $K_{p.T} = 0,96$.

ж) определяют постоянную времени τ_1 :

$$\tau_1 = \frac{R_{я} T_{p.T}}{K_{д.т} K_{p.T} K_{c.п}} = \frac{0,24 \cdot 0,006}{0,094 \cdot 0,96 \cdot 10} = 0,0016 \text{ с.}$$

При столь малом значении τ_1 инерционностью контура тока можно пренебречь, а передаточную функцию контура аппроксимировать выражением

$$W_{к.т}(s) = \frac{1}{K_{д.т}} = \frac{1}{0,094} = 10,6 \text{ А/В.}$$

3.4.3 Компьютерные исследования контура тока

Передаточная функция регулятора тока с найденными значениями параметров $K_{p.T}$ и $T_{p.T}$ является теоретической идеализацией. В действительности реальные значения параметров якорной цепи $R_{я}$ и $T_{я}$ конкретного двигателя отличаются от справочных значений, использованных при расчете. Кроме того, всегда существует погрешность настройки параметров регулятора.

Компьютерные исследования позволяют оценить влияние тех или иных отклонений параметров контура от расчетных значений на качество в переходном или в установившемся режиме и решить вопрос о достижении наилучшего результата.

Исследования проводят в такой последовательности:

а) представляют структурную схему контура в виде, показанном на рисунке 3.5;

б) устанавливают расчетные значения параметров схемы;

в) формируют функции Step $U_T(t) = K_{д.т} I_{я} 1(t)$ и Ramp $E(t) = K_e (0,1 \omega_{pmax}) t 1(t)$, где $K_{д.т}$; $I_{я}$; K_e и ω_{pmax} – номинальные значения;

г) выбирают длительность моделирования из диапазона значений 10–20 мс и уточняют длительность в процессе пробных расчетов;

д) проводят моделирование, записывая по осциллографу время переходного процесса $t_{п.п}$ и перерегулирования σ (%), а по дисплею ошибку контура $\Delta I_{я}$;

е) меняют на ± 20 % постоянную времени $T_{я}$ при постоянном значении $T_{p.T}$, записывая каждый раз результаты расчетов $t_{п.п}$, σ (%) и $\Delta I_{я}$;

ж) аналогичные расчеты выполняют при разбросе на ± 20 % сопротивления $R_{я}$;

з) оформляют результаты моделирования в виде таблицы и на основании этих данных судят о качестве контура или вносят в него необходимые изменения.

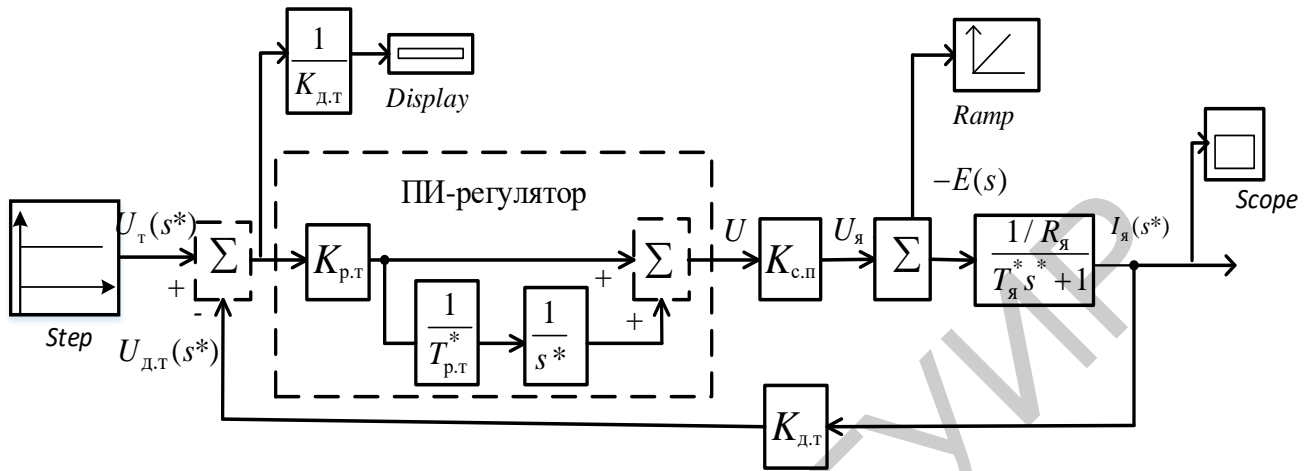


Рисунок 3.5 – Структурная схема для компьютерных исследований модели контура тока с ПИ-регулятором в условиях технологического разброса параметра $T_я$ и вариациях параметра $T_{р.т}$

3.4.4 Синтез контура скорости

Контур состоит из регулятора скорости; контура тока, подчиненного регулятору; механической части двигателя и датчика скорости – тахогенератора, встроенного в двигатель. На выходе тахогенератора включен фильтр для сглаживания пульсации напряжения. Динамические свойства датчика скорости описывают функцией $W_{д.с}(s) = K_{д.с} / (1 + T_{д.с}s)$, где постоянная времени $T_{д.с} = 1$ мс.

На начальном этапе синтеза контура скорости малые постоянные $T_{д.с}$ – датчика скорости и τ_1 – контура тока не учитывают, а структурную схему контура представляют в виде, показанном на рисунке 3.6.

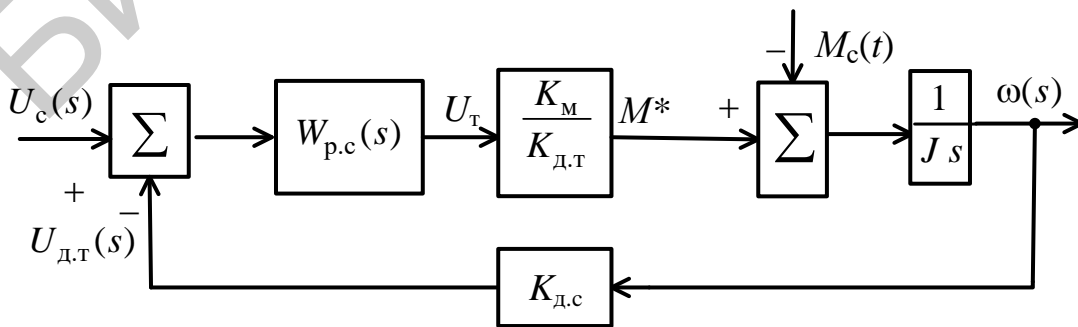


Рисунок 3.6 – Структурная схема контура скорости

К контуру предъявляют следующие требования: широкий диапазон регулирования скорости; относительное перерегулирование скорости при единичном ступенчатом входном сигнале $U_c(t) = 1(t)$ не превышает 5 %; при ступенчатом увеличении или уменьшении внешнего момента $M_c(t)$ на величину $\pm 0,4 M_c(t)$ время восстановления скорости не превышает 0,1 с.

Для реализации этих требований выбирают пропорционально-интегральный закон регулирования скорости с передаточной функцией:

$$W_{p.c}(s) = K_{p.c} / (1 + 1/T_{p.c}s) = K_{p.c}(T_{p.c}s + 1) / T_{p.c}s.$$

Параметры регулятора находят в следующем порядке:

- выбирают постоянную времени $T_{p.c}$ из условия $T_{p.c} \geq \tau_1$;
- записывают передаточную функцию прямой цепи контура:

$$W(s) = W_{p.c}(s) \cdot \frac{K_M}{K_{д.т}} \cdot \frac{1}{Js} = K_{p.c} \cdot \frac{T_{p.c}s + 1}{T_{p.c}s} \cdot \frac{K_M}{K_{д.т}} \cdot \frac{1}{Js}$$

и приводят ее к виду

$$W(s) = \frac{1}{K_{д.с}} \cdot \frac{T_{p.c}s + 1}{\alpha T_{p.c}^2 s^2},$$

где коэффициент

$$\alpha = \frac{K_{д.т} J}{K_{д.с} K_{p.c} \cdot K_M \cdot T_{p.c}};$$

- определяют передаточную функцию замкнутого контура:

$$W_{к.с}(s) = \frac{W(s)}{1 + K_{д.с}W(s)} = \frac{1}{K_{д.с}} \cdot \frac{T_{p.c}s + 1}{\alpha T_{p.c}^2 s^2 + T_{p.c}s + 1};$$

- делят характеристическое уравнение контура

$D(s) = \alpha T_{p.c}^2 s^2 + T_{p.c}s + 1 = 0$ на $\alpha T_{p.c}^2$ и представляют в виде

$$s^2 + \frac{1}{2T_{p.c}} + \frac{1}{\alpha T_{p.c}^2} = s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 = 0,$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot T_{p.c}}}$ – собственная частота колебаний контура;

$\xi = 1/2\sqrt{\alpha}$ – коэффициент демпфирования;

- используя формулы для α и ξ , находят коэффициент регулятора

$$K_{p.c} = \frac{(2\xi)^2 K_{д.с} J}{K_{д.с} K_M T_{p.c}};$$

е) определяют по таблице 3.2 коэффициент демпфирования ξ , соответствующий перерегулированию менее заданного значения σ (%), и вычисляют величину $K_{p.c}$.

Таблица 3.2 – Соотношения между значениями коэффициента демпфирования ξ и перерегулирования переходного процесса линейного контура второго порядка

ξ	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	1,0
σ , %	20,4	16,3	12,6	10,5	6,8	4,6	1,5	0,2	0,0

Пример. Чтобы обеспечить в контуре перерегулирование не более 5 %, необходимо выбрать $\xi = 0,7$. Тогда с учетом численных значений $K_{д.т} = 0,094$ В/А; $J = 0,032$ кг·м²; $K_{д.с} = 0,1$ В·с/рад; $K_M = 0,8$ Н·м/А и $T_{p.c} = 0,016$ с получим

$$K_{p.c} = \frac{(2\xi)^2 K_{д.т} J}{K_{д.с} K_M T_{p.c}} = \frac{(2 \cdot 0,7)^2 \cdot 0,094 \cdot 0,032}{0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,016} = 4,6.$$

Если желательно получить переходный процесс монотонный и наиболее быстрый, то выбирают $\xi = 1$.

В этом случае получают $K_{p.c} = 9,4$, $\alpha = \frac{1}{(2\xi)^2} = 0,25$ и более простое выражение передаточной функции замкнутого контура:

$$W_{p.c}(s) = \frac{1}{K_{д.с}} \cdot \frac{T_{p.c}s + 1}{\alpha T_{p.c}^2 s^2 + T_{p.c}s + 1} = \frac{1}{K_{д.с}} \cdot \frac{T_{p.c}s + 1}{(0,5T_{p.c}s + 1)^2}.$$

Конкретное значение $K_{p.c}$ из диапазона значений (9,4–4,6) уточняют при компьютерных исследованиях контура.

3.4.5 Компьютерные исследования контура скорости с подчиненным контуром тока

Основной задачей исследования является анализ функционирования контура в реальных условиях его применения. Прежде всего это мгновенный значительный рост момента сопротивления $M_c(t)$ в момент начала механической обработки заготовки режущим инструментом и, как следствие, внезапное значительное отклонение рабочей скорости от требуемого значения. Во-вторых, ограниченный диапазон изменения сигнала на входе контура тока: $-10 \leq U_T \leq 10$ В. Наконец, ограничение на перерегулирование реакции контура в виде неравенства $\sigma \leq 5$ % при ступенчатом воздействии $U_c(t) = 0,1U_c \cdot 1(t)$.

Для исследования рекомендуется использовать математическую модель контура скорости с ПИ-регулятором и дополнительной обратной связью (С), как показано на рисунке 3.7. Модель часто встречается на практике. Пунктирной линией (С) показан канал, который используется для компенсации интегральной составляющей регулятора при нарушении условия $U_T \leq U_{p.c} \leq U_T$.

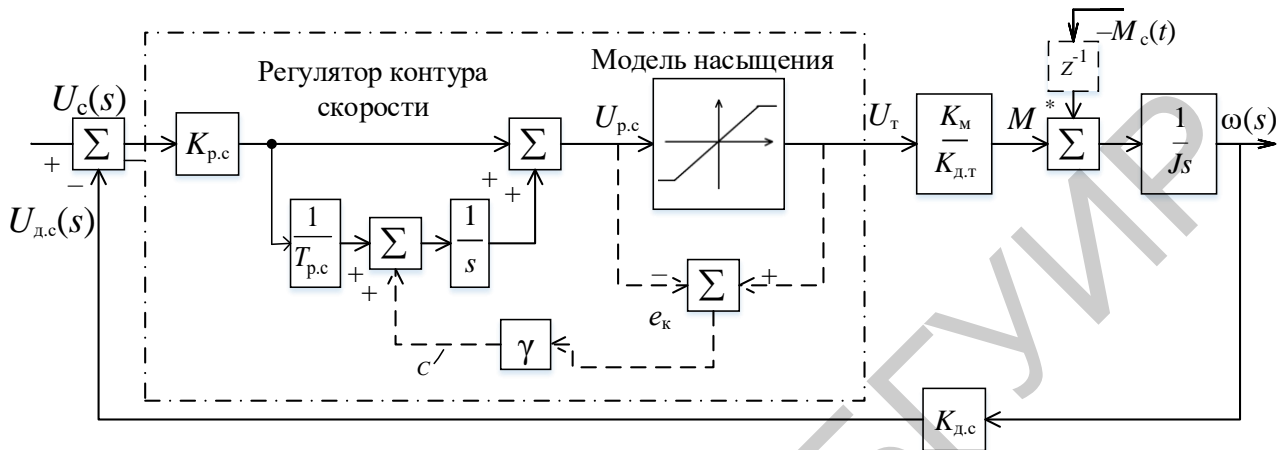


Рисунок 3.7 – Структурная схема, поясняющая принцип работы контура скорости в условиях естественных ограничений на сигнал управления U_T

Исследования проводят в следующей последовательности:

а) создают схему моделирования контура с блоками задания ступенчатых воздействий $U_c(t) = \alpha_1 \cdot 1(t)$ и $M_c(t) = \beta \cdot 1(t)$ и осциллографирования процессов $U_{p.c}(t)$, $U_T(t)$ и $\omega(t)$ (в блоках задания устанавливают значения $\alpha_1 = 0,01$ и $\beta = 0$; при пробных пусках выбирают длительность моделирования);

б) запускают процесс моделирования при $\gamma = 1$, анализируют осциллограммы процессов $U_{p.c}(t)$, $U_T(t)$ и $\omega(t)$, записывают их показатели: время нарастания, время установления, перерегулирование, соблюдение требования $U_{p.c} \leq U_{T \max} = 10 \text{ В}$;

в) устанавливают новое значение $\alpha_1 = K_{д.с} \omega_{p \max}$ и повторяют пункт «б» (при этом наблюдают резкое ухудшение характера процессов);

г) постепенно повышая коэффициент γ и наблюдая за изменением характера процессов, находят такую величину γ , при которой будут соблюдаться требования, предъявляемые к контуру. На этом этапе моделирования могут быть уточнены значения параметров регулятора $K_{p.c}$ и $T_{p.c}$;

д) задают параметры $\alpha_1 = 0,1 \omega_{p \max}$ и $\beta = M_c$ ступенчатых функций $M_c(t) = \alpha_1 1(t)$ и $M_c(t) = M_c \cdot 1(t)$, устанавливают в блоке z^{-1} время $\tau = 2T_{mn}$, соответствующее началу действия момента сопротивления $M_c(t)$ относительно начала моделирования;

е) проводят моделирование, осциллографируют процессы $U_{p.c}(t)$, $U_T(t)$, $\omega(t)$;

ж) повторяют моделирование при замене в схеме на рисунке 3.7 блока с передаточной функцией $1/K_{д.т}$ схемой контура тока, показанной на рисунке 3.5;

з) сопоставляют результаты моделирования, формируют выводы о работоспособности контура и значениях $K_{p.c}$, $T_{p.c}$ и γ .

3.4.6 Синтез основного контура системы

Основной контур должен функционировать так, чтобы при позиционировании рабочего инструмента переходный процесс был апериодическим, а при воспроизведении медленно меняющегося задающего воздействия в установившемся режиме ошибка воспроизведения была минимальной. Эти условия достаточно легко реализовать в системе с комбинированным управлением, структурная схема которой показана на рисунке 3.8.

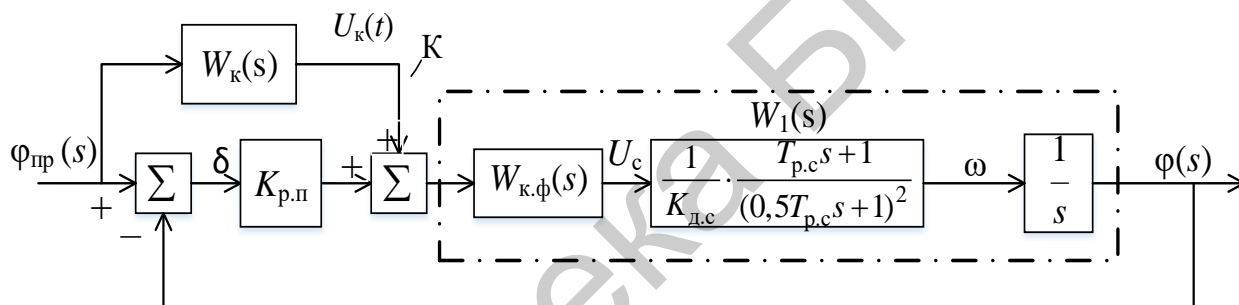


Рисунок 3.8 – Структурная схема системы комбинированного управления, в которой используется дополнительный канал (K) для компенсации ошибок от задающих воздействий

Первая задача состоит в том, чтобы определить корректирующую дробно-рациональную передаточную функцию $W_{к.ф}(s)$ и коэффициент усиления $K_{p.п}$, а вторая состоит в синтезе передаточной функции канала $W_k(s)$, компенсирующей ошибки по скорости.

Задачу решают следующим образом:

а) выбирают передаточную функцию $W_{к.ф}(s)$ в виде $W_{к.ф}(s) = \frac{T_1s + 1}{T_2s + 1}$ и за-

дают значения постоянных времени $T_1 = 0,5T_{p.c}$, $T_2 = T_{p.c}$;

б) сокращают нули и полюса в передаточной функции $W_1(s)$, полагают $W_k(s) = 0$, записывают передаточную функцию разомкнутого контура

$$W(s) = \frac{K_{\Omega}}{s(0,5T_{p.c}s + 1)}$$

и характеристическое уравнение замкнутого контура

$$0,5T_{p.c}s^2 + 1s + K_{\Omega} = 0,$$

где $K_{\Omega} = K_{p.п} / K_{д.с}$ – добротность контура;

в) приводят характеристическое уравнение к виду

$$s^2 + \frac{2}{T_{p.c}}s + \frac{2K_{\Omega}}{T_{p.c}} = s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2 = 0$$

и на основании этого равенства получают выражения

$$\frac{2K_{\Omega}}{T_{p.c}} = \omega_0^2, \quad \frac{2}{T_{p.c}} = 2\xi\omega_0;$$

г) чтобы обеспечить аperiodический переходный в контуре на ступенчатое воздействие, выбирают значение $\xi = 1$, получают искомые величины

$$K_{\Omega} = \frac{1}{2\xi^2 T_{p.c}} = \frac{1}{2 \cdot T_{p.c}}, \quad K_{p.п} = K_{\Omega} \cdot K_{д.с} = K_{д.с} / 2T_{p.c}.$$

Например, при $T_{p.c} = 0,016$ с и $K_{д.с} = 0,1$ В·с/рад имеем

$$K_{\Omega} = \frac{1}{2T_{p.c}} = \frac{1}{2 \cdot 0,016} = 31,25 \text{ с}^{-1}, \quad K_{p.п} = K_{\Omega} \cdot K_{д.с} = 31,25 \cdot 0,1 = 3,1 \text{ В/рад}.$$

3.4.7 Установившаяся ошибка

Для вычисления установившейся ошибки при воспроизведении линейно-изменяющегося воздействия $\varphi_{пр}(t) = 0,1\omega_{p.max} \cdot t1(t)$ и в отсутствии дополнительного канала (K) используют формулу

$$\delta_{уст} = \frac{0,1\omega_{p.max}}{K_{\Omega}}.$$

Расчеты показывают, что при ограничении добротности K_{Ω} по условиям качества переходных процессов на ступенчатое воздействие система имеет большую ошибку воспроизведения функций вида $\varphi(t) = \alpha_1 t \cdot 1(t)$.

Действительно, пусть $K_{\Omega} = 31,25 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_{p.max} = 45,24$ рад/с. Тогда

$$\delta_{уст} = \frac{0,1\omega_{p.max}}{K_{\Omega}} = \frac{0,1 \cdot 45,24}{31,25} \cdot 3438 = 498 \text{ угл. мин},$$

что более чем в 50 раз превышает допустимое значение. Чтобы обеспечить требуемую точность, вводят канал компенсации ошибки, передаточную функцию которого $W_k(s)$ определяют в такой последовательности:

а) для замкнутой системы на рисунке 3.8 с известной передаточной функцией $W_1(s) = \frac{1}{K_{д.т}} \cdot \frac{1}{s(0,5T_{р.с}s + 1)}$ записывают передаточную функцию

$$\Phi(s) = \frac{\varphi(s)}{\varphi_{пр}(s)} = \frac{W_k(s) \cdot W_1(s) + K_{р.п} \cdot W_1(s)}{1 + K_{р.п} \cdot W_1(s)};$$

б) полагают $W_k(s) = 1/W_1(s)$; в этом случае $W_k(s) \cdot W_1(s) = 1$, $\Phi(s) = \varphi(s)/\varphi_{пр}(s) = 1$, а передаточная функция $W_k(s)$ принимает вид

$$W_k(s) = \frac{U_k(s)}{\varphi_{пр}(s)} = K_{д.с}(s + 0,5T_{р.с}s^2);$$

в) получают изображение для компенсационного сигнала

$$U_k(s) = K_{д.с} \cdot s \cdot \varphi_{пр}(s) + 0,5T_{р.с} \cdot K_{д.с}s^2\varphi_{пр}(s);$$

г) при $s^2\varphi_{пр}(s) = 0$ изображение $U_k(s) = K_{д.с} \cdot s \cdot \varphi_{пр}(s)$ представляют в виде

$$W_k(s) = K_{д.с}s = K_{д.с} \frac{N}{T_{р.с}} \left[1 - \frac{1}{\frac{T_{р.с}}{N}s + 1} \right],$$

где N выбирают из диапазона значений (10...20) так, чтобы пренебречь влиянием аperiodического звена с постоянной времени $T_{р.с} / N$ на динамику системы.

3.4.8 Компьютерные исследования

Исследования проводят в следующей последовательности:

1 Составляют схему моделирования (рисунок 3.9), устанавливают расчетные значения параметров схемы, подключают осциллографы для наблюдения процессов $\varphi_{пр}(t)$, $\varphi(t)$, $\omega(t)$, $M^*(t)$ и блоки заданных функций $\varphi_{пр}(t)$ и $M_c(t)$.

2 Устанавливают уровень ступенчатых воздействий $\varphi_{пр}(t) = 0,3141(t)$ (или $\varphi_{пр}(t) = 0,2081(t)$) и $M_c(t) = M_c \cdot 1(t)$, где M_c – расчетное значение момента статического сопротивления. Для повышения наглядности реакций системы необходимо в блоке задержки Z^{-1} установить время задержки $M_c(t)$ на величину, большую чем время реакции (переходного процесса) на $\varphi_{пр}(t)$. Время задержки определяют в процессе пробных пусков моделирования.

3 Отключают канал компенсации (K), проводят моделирование, осциллографируют процессы $\varphi_{пр}(t)$, $\varphi(t)$, $M_c(t)$ и $\omega(t)$.

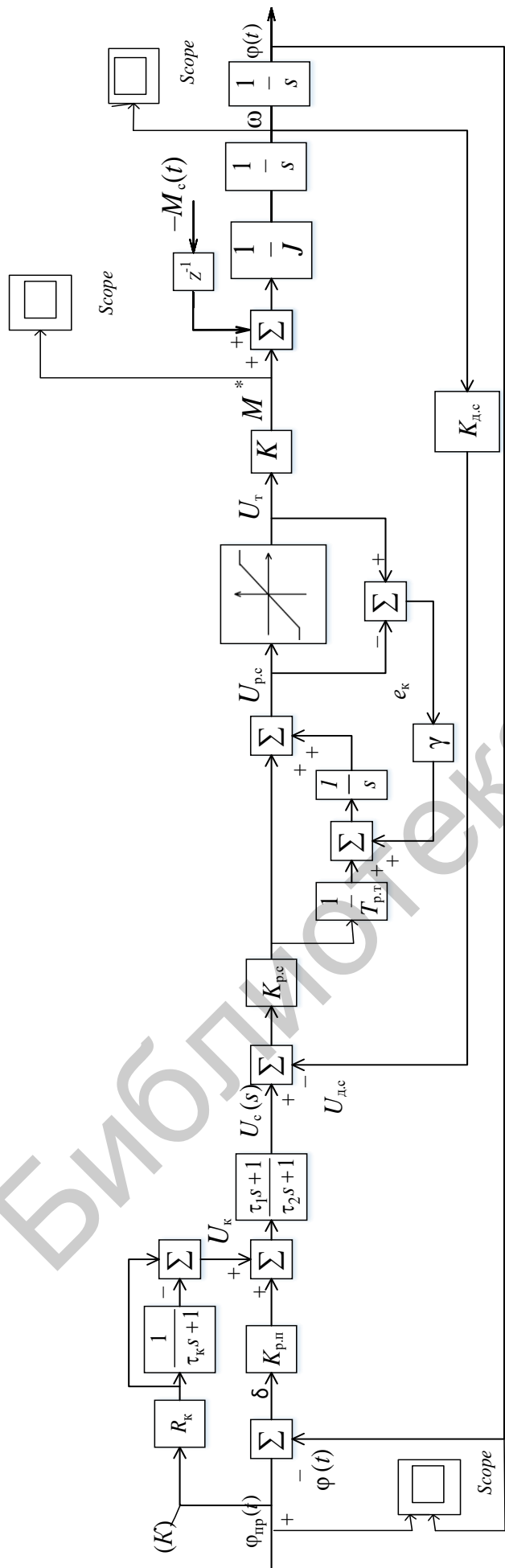


Рисунок 3.9 – Структурная схема математической модели системы программного управления с подчиненным контуром скорости для компьютерных исследований при $K_k = K_{д.с} N / T_{p,с}$, $\tau_k = T_{p,с}$, $\tau_k = T_{p,с} / N$, $K = K_M / K_{д.т}$

Библиотека ВГУИР

4 Повторяют моделирование и осциллографирование процессов с включенным каналом компенсации ошибок.

5 Сопоставляют результаты моделирования и оценивают, насколько эффективно система компенсирует момент статического сопротивления.

6 Оформляют текстовый материал по проведению и результатам исследований и включают его в пояснительную записку.

При выполнении курсового проекта (по указанию преподавателя) возможны и другие варианты заданий:

1) исследовать влияние момента сопротивления $M_c(t)$ на качество воспроизведения гармонического задающего воздействия $\varphi_{пр}(t) = \varphi_{пр} \sin \omega(t)$, например, с амплитудой $\varphi_{пр} = 0,21$ рад и частотой $f = 0,2$ Гц;

2) анализ динамических ошибок при скачкообразном изменении скорости движения в окрестностях точек сопряжения трех отрезков эквидистанты;

3) исследовать, как влияют на качество процессов в следящей системе временные задержки, связанные с выполнением рабочих инструкций при микропроцессорной реализации алгоритмов управления.

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

ИНТЕГРАЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ В ОПЕРАТОРНОЙ ФОРМЕ

Широкий класс задач анализа и синтеза систем автоматического управления составляют задачи, в которых требуется найти значения параметров регулятора или алгоритма управления, реализующие минимум среднего квадрата ошибки системы. В таких случаях приходится иметь дело с интегралами вида

$$J = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{c(s)}{d(s)} \cdot \frac{c(-s)}{d(-s)} ds,$$

где $\frac{c(s)}{d(s)} = \frac{c_{n-1}s^{n-1} + \dots + c_2s^2 + c_1s + c_0}{d_ns^n + \dots + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0}$ – дробно-рациональная функция от s ;

s – оператор Лапласа;

n – степень полинома $d(s)$;

$c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$ и $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$ – действительные величины или числа.

Если какой-либо коэффициент полинома $c(s)$ оказывается равным нулю, например c_0 или c_1 , то на месте этого коэффициента в дробно-рациональной функции необходимо записать знак нуля «0».

Значения интеграла зависят от параметров системы и степени n полинома $d(s)$. В таблице А.1 приведены наиболее часто встречающиеся значения интеграла для $n \leq 3$ в виде формул, полученных в соответствии с алгоритмом Острема.

Таблица А.1 – Интегралы для дробно-рациональной функции

Функция	Значения интеграла
$\frac{c(s)}{d(s)}$	$J = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{c(s)}{d(s)} \cdot \frac{c(-s)}{d(-s)} ds$
$\frac{c_0}{d_1s + d_0}$	$J = \frac{c_0^2}{2d_1d_0}$
$\frac{c_1s + c_0}{d_2s^2 + d_1s + d_0}$	$J = \frac{c_1^2}{2d_1d_0} + \frac{c_0^2}{2d_1d_0}$
$\frac{c_2s^2 + c_1s + c_0}{d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0}$	$J = \frac{c_2^2}{2d_3d_2} + \frac{c_1^2}{2(d_2d_1 - d_3d_0)} + \frac{(c_0d_2 - c_2d_0)^2}{2d_0d_2(d_2d_1 - d_3d_0)}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ВХОДЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Одной из наиболее сложных задач моделирования системы с учетом реальных условий ее применения и технической реализации является задача разработки моделей случайных воздействий и помех, спектральные плотности которых заданы соответствующими выражениями.

В системе Matlab (Simulink) источниками случайных сигналов являются генераторы, вырабатывающие последовательности независимых случайных чисел с нормальным или равномерным законом распределения. Это блоки *Random Number*, *Uniform Random Number* и *Band-Limited White Noise*, которые находятся в библиотеке *Sources*.

Генераторы создают с помощью команды *File/new/model*, при выполнении которой открывается окно, в которое перемещают выбранный генератор из библиотеки. Для статистического анализа линейных систем обычно выбирают блок *Sources/Band – Limited White Noise*. С помощью этого блока создают шум заданной мощности, равномерно распределенный в пределах заданной полосы частот, превышающей эквивалентную шумовую полосу линейной системы.

В окне задания параметров (рисунок Б.1) устанавливают параметры блока: *Noise power* (мощность шума); *Sampe time T_s* (интервал дискретизации); *Seed* (начальное значение базы генератора случайных чисел). Обычно устанавливают *Seed = 23341*.

Для просмотра на осциллографе (*Scope*) из библиотеки *Sinks* реализации случайного процесса на выходе генератора формируют схему, показанную на рисунке Б.2.

Перед моделированием в окне схемы (рисунок Б.3) задают параметры моделирования. Задание выполняют в панели управления меню *Simulation/Parameters/Solver*. Устанавливают параметры: *Start time* (начальное время, как правило, равно нулю); *Stop time* (конечное время – выбирают самостоятельно исходя из условий решаемой задачи, например 10 с); *Fixed- step size* (шаг изменения времени, например 0,01 с).

Запуск моделирования выполняют с помощью пункта меню *Simulation/start* или кнопки > на панели инструментов.

Результат моделирования показан на рисунке Б.4.

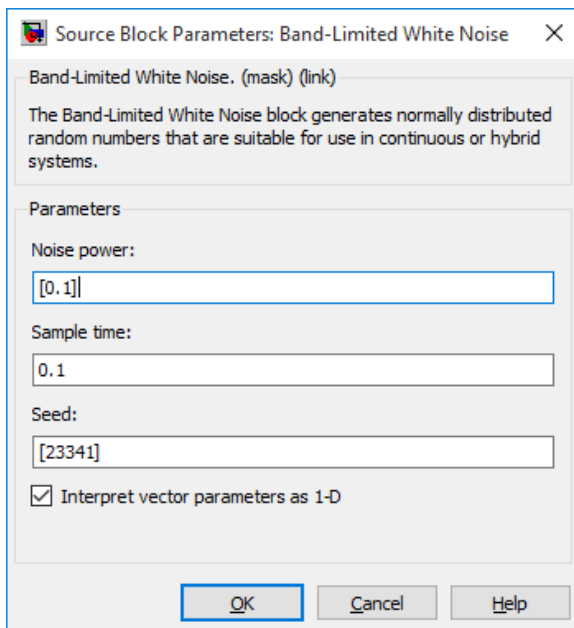


Рисунок Б.1 – Окно настройки блока *Band-Limited White Noise*

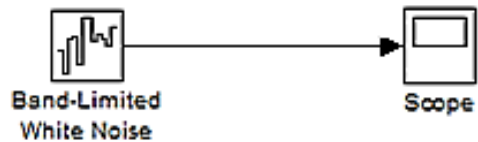


Рисунок Б.2 – Схема проверки функционирования генератора

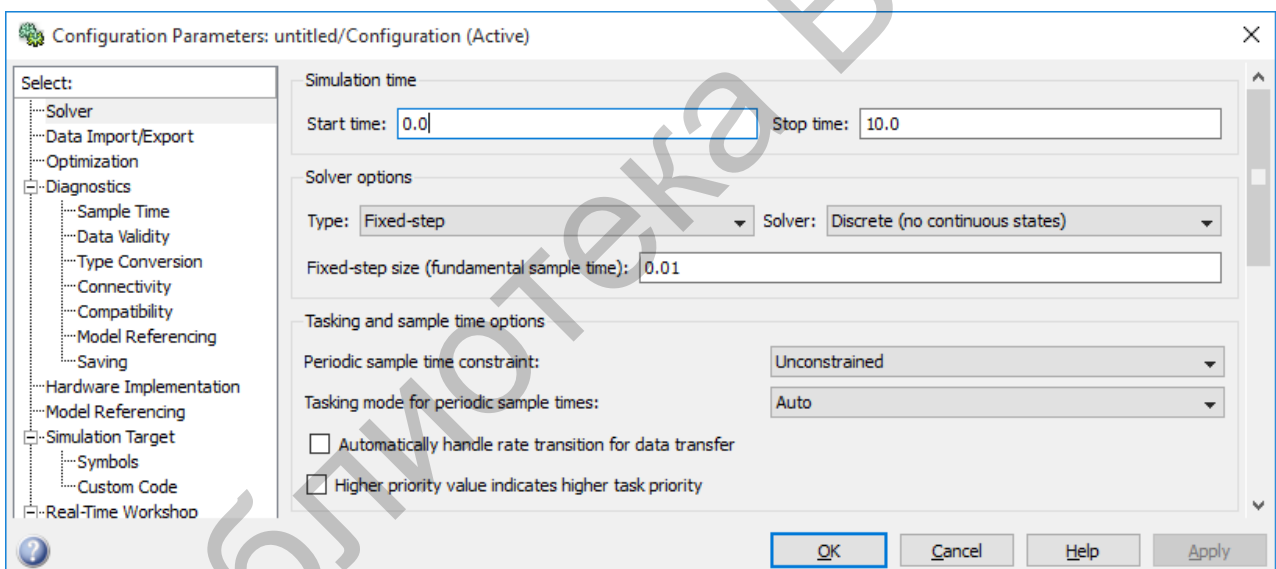


Рисунок Б.3 – Окно настройки параметров процесса моделирования

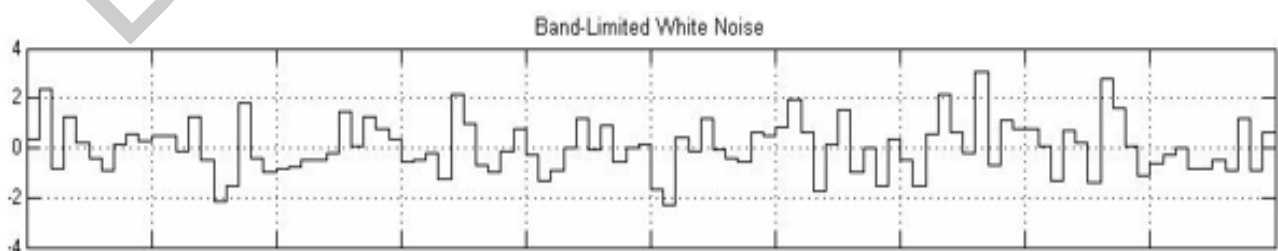


Рисунок Б.4 – Результат генерирования случайного процесса

Важным моментом является настройка осциллографа. Настройку выполняют с помощью панелей инструментов. Для масштабирования графиков используют кнопки *Zoom* – увеличение масштаба по обеим осям; *Zoom X-axis* – увеличение масштаба по горизонтальной оси; *Zoom Y-axis* – увеличение масштаба по вертикальной оси; *Autoscale* – автоматическая установка масштабов по обеим осям. Вкладка общих параметров показана на рисунке Б.5.

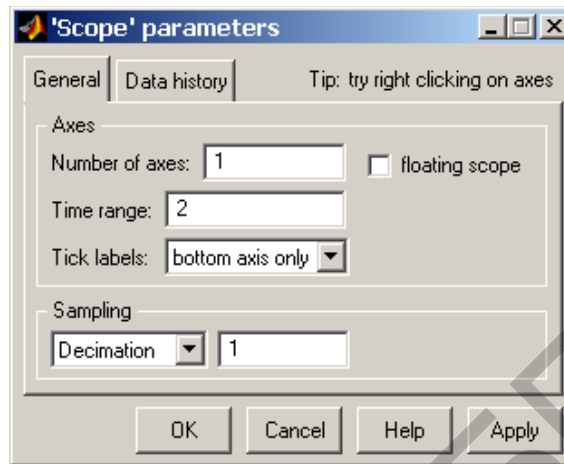


Рисунок Б.5 – Вкладка общих параметров *General*

На вкладке *General* задаются следующие параметры:

1 *Number of axes* – число входов (систем координат) осциллографа. При изменении этого параметра на изображении блока появляются дополнительные входные порты.

2 *Time range* – величина временного интервала, для которого отображаются графики. Если время расчета модели превышает заданное параметром *Time range*, то вывод графика производится порциями, при этом интервал отображения каждой порции графика равен заданному значению *Time range*.

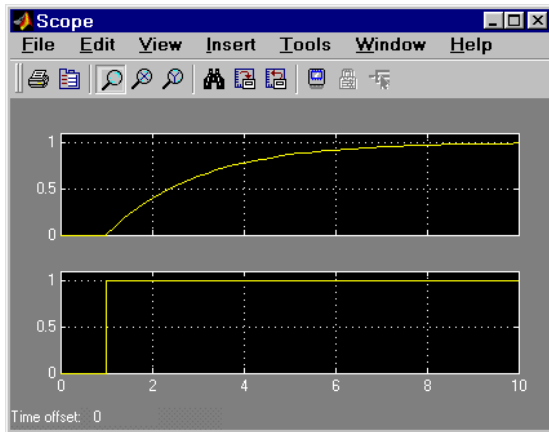
3 *Sampling* – установка параметров вывода графиков в окне. Задаёт режим вывода расчетных точек на экран. При выборе *Decimation* кратность вывода устанавливается числом, задающим шаг выводимых расчетных точек.

Отметим, что окно блока *Scope*, отображающее графики сигналов, имеет очень ограниченные возможности по изменению внешнего вида окна и графиков. Фактически можно изменять лишь масштаб отображения графиков, а команды изменения цветов линий и фона окна, толщины линий, размера и типа шрифтов и т. п. недоступны. Чтобы получить доступ к этим возможностям, необходимо после проведения расчетов открыть окно блока *Scope* и в основном окне Matlab ввести следующие команды:

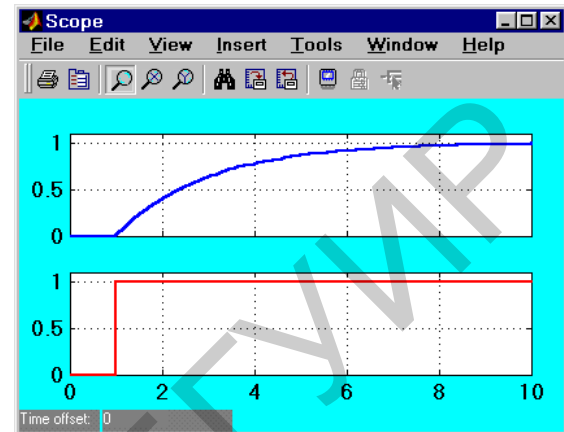
```
>>set(0,'ShowHiddenHandles','On')
>>set(gcf,'menubar','figure')
```

После выполнения этих команд в окне блока *Scope* появится меню, как это показано на рисунке Б.6, а.

Используя команды меню *Edit/Figure Properties ...*, *Edit/Axes Properties ...* и *Edit/Current Object Properties ...*, можно изменить внешний вид окна, осей и самих графиков в соответствии со своими требованиями. Пример таких изменений показан на рисунке Б.6, б. Изложенное выше относится и к другим блокам, предназначенным для просмотра графиков: *Power Spectral Density*, *Averaging Power Spectral Density*, *Cross Correlator* и т. п.



а



б

Рисунок Б.6 – Окно блока *Scope*, дополнительное меню настройки (а) и измененное окно блока *Scope* (б)

Оценка среднего квадрата и среднеквадратичного значения при помощи Matlab (Simulink)

Оценить средний квадрат и среднеквадратичное значение случайного процесса, например $x(t)$, можно с помощью схемы, математическая модель которой показана на рисунке Б.7. В ее основе лежит соотношение

$$\hat{x}^2(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt . \quad (\text{Б.1})$$

Схема состоит из блоков библиотеки *Math Operations* (математические операции), которые реализуют некоторые встроенные математические функции. Системы Matlab содержат четыре группы блоков:

- *Math Operations*, осуществляющие математические преобразования входных величин;
- *Vector Operations*, осуществляющие векторные операции;
- *Logic Operations*, осуществляющие логические операции;
- *Complex Vector Conversions*, осуществляющие преобразования комплексных векторных величин.

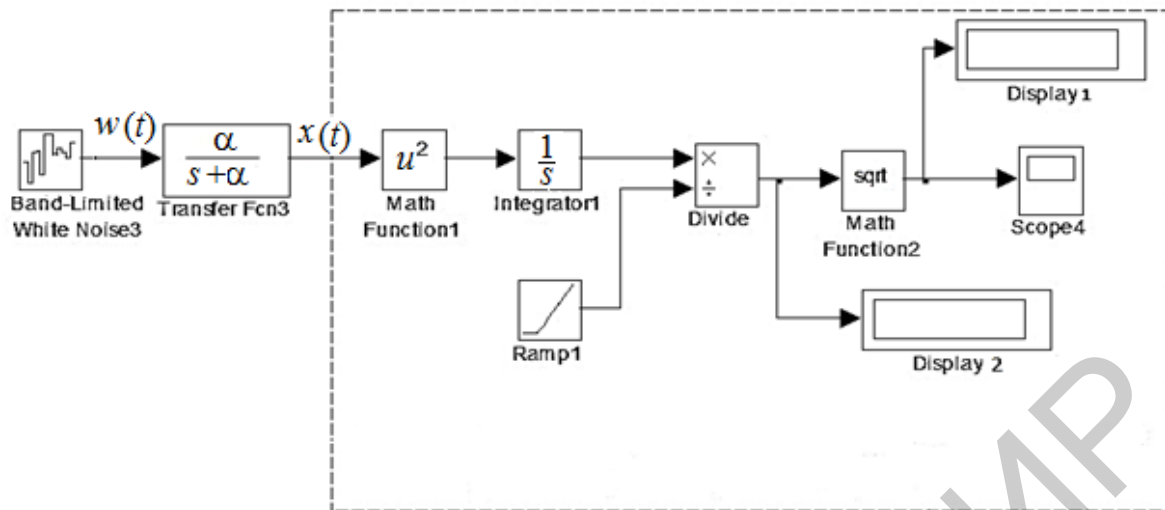


Рисунок Б.7 – Структурная схема оценивания среднего квадрата и среднеквадратичного значения реализации случайного процесса $x(t)$

Блок из библиотеки *Simulink/Math Operations/Math Function* позволяет выбрать для преобразования входного сигнала элементарные нетригонометрические и негиперболические функции, такие как:

1 Function – вид вычисляемой функции. Выбирается из списка. В данном случае применяется u^2 – вычисление степени 2, *sqrt* – квадратный корень.

2 Output signal type – тип выходного сигнала (выбирается из списка):

- *auto* – автоматическое определение типа;
- *real* – действительный сигнал;
- *complex* – комплексный сигнал.

Важной задачей является выбор длительности интервала усреднения T . С увеличением длительности интервала точность оценивания среднего квадрата возрастает, например, при $T = 12$ мин погрешность оценки среднего квадрата составляет 15–18 %. Если при этом требуется повторять измерения для различных значений параметров системы, то процесс исследования системы при случайных возмущениях становится весьма трудоемким. Однако исследования зависимости относительной погрешности настройки регулируемых параметров системы от относительной ошибки измерения среднего квадрата реализации случайного процесса показывают, что можно ограничиться более грубыми оценками на коротких интервалах длительностью 10...20 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодовников, В. В. Основы теории и элементов систем автоматического регулирования : учеб. пособие для вузов / В. В. Солодовников, В. И. Плотников, А. В. Яковлев. – М. : Машиностроение; 1985. – 536 с.
2. Джеймс, Х. Теория следящих систем / Х. Джеймс, Н. Никольс, Р. Филлипс. – М. : ГИИЛ, 1953. – 460 с.
3. Основы проектирования следящих систем / под ред. Н. А. Лакоты. – М. : Машиностроение, 1978. – 392 с.
4. Бесекерский, В. А. Динамический синтез систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский. – М. : Наука, 1970. – 576 с.
5. Бартон, Д. Радиолокационные системы / Д. Бартон. – М. : Воениздат, 1967.
6. Егоров, В. А. Транспортно-накопительные системы для ТС / В. А. Егоров, В. Д. Лузанов, С. М. Щербаков. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. – 293 с.
7. Лебедев, Д. М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / Д. М. Лебедев, Р. Т. Орлова, А. В. Пальцев. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
8. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ / Э. Л. Тихомиров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.
9. Овсянников, А. В. Формирование случайных процессов с заданными вероятностными характеристиками / А. В. Овсянников // Труды БГТУ. Сер. физ.-мат. наук и информ. – 2002. – Вып. X. – С. 133–136.
10. Прохоров, С. А. Структурно-спектральный анализ случайных процессов / С. А. Прохоров, В. В. Графкин. – Самара : СНЦ РАН, 2010. – 128 с.
11. Щербаков, В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде MATLAB и SIMULINK : учеб. пособие / В. С. Щербаков, А. А. Руппель, В. А. Глушеч. – Омск : СибАДИ, 2003. – 160 с.
12. Лазарев, Ю. Ф. Matlab 6.5. Математическое моделирование физических процессов и технических систем : учебный курс / Ю. Ф. Лазарев. – Киев : 2004. – 474 с.
13. Черных, И. В. Simulink : Инструмент моделирования динамических систем / И. В. Черных. – М. : Диалог-МИФИ, 2004.
14. Черных, И. В. Simulink – среда для создания инженерных приложений / И. В. Черных. – М. : Диалог-МИФИ, 2004.