

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ”

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**«Разработка робастной системы управления по выходной переменной
объекта»**

Автор Шакалов Кирилл Сергеевич
(Фамилия, Имя, Отчество) (Подпись)

Направление подготовки (специальность) 27.03.04 "Управление в технических системах"

Квалификация бакалавр
(бакалавр, инженер, магистр)

Руководитель Шаветов Сергей Васильевич, к.т.н., ассистент кафедры СУиИ
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

К защите допустить

Зав. кафедрой _____
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

“ ____ ” _____ 20 ____ г.

Санкт-Петербург, 2017 г.

Студент Шакалов К. С. Группа Р3440 Кафедра СУиИ Факультет СУиР

Направленность (профиль), специализация 27.03.04 "Управление в технических системах"
Консультант(ы):

а) _____
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

б) _____
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

Квалификационная работа выполнена с оценкой _____

Дата защиты “ _____ ” _____ 20 _____ г.

Секретарь ГЭК _____

Листов хранения _____

Демонстрационных материалов/Чертежей хранения _____

Содержание

Введение.....	5
1 Обзор методов управления неопределенными объектами.....	6
1.1 Актуальность задачи.....	6
1.2 Описание объекта управления TronicalTune.....	7
1.3 Принцип работы TronicalTune.....	9
1.4 Постановка задачи.....	12
1.5 Обзор методов управления неопределенными объектами.....	13
2 Синтез закона управления.....	18
2.1 Постановка задачи управления.....	18
2.2 Вывод закона управления.....	19
3 Компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink.....	23
4 Анализ эффективности выбранного алгоритма.....	26
Заключение.....	31
Список используемых источников.....	32
Приложение А.....	33
Приложение Б.....	34
Приложение В.....	35

Подпись и дата		Инф. № докум.		Взам. инф. №		Подпись и дата							
						КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ							
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата									
Разраб.		Шакалов К.С.			<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <p>Разработка робастной системы управления по выходной переменной объекта</p> <p>Пояснительная записка</p> </div> <div style="text-align: center;"> <table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30px;">Лит.</td> <td style="width: 30px;">Лист</td> <td style="width: 30px;">Листов</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4</td> <td>35</td> </tr> </table> <p>Университет ИТМО Кафедра СУИ</p> </div> </div>			Лит.	Лист	Листов		4	35
Лит.	Лист	Листов											
	4	35											
Провер.		Шаветов С.В.											
Н. Контр.		Ведяков А.А.											
Утверд.		Бодцов А.А.											

Введение

В современной науке и технике зачастую приходится сталкиваться с автоматизацией некоторых бытовых или производственных процессов. Используя уже готовые структуры, формируется система под определенные цели. Однако, всё чаще встречаются такие ситуации, когда эти структуры обладают неизвестными характеристиками и их планируется использовать в условиях неизвестной динамики. Фактически не зная какую математическую модель выбрать для математического моделирования, какие параметры указать в качестве вектора состояния, разработчик оказывается в затруднительном положении. Классическая теория управления предполагает, что нам известна математическая модель, характеристики, вектор состояния, но, что если мы не можем снять характеристики управляемого объекта, чтобы промоделировать его? Существуют различные алгоритмы для управления такого рода объектами, однако они достаточно сложные в реализации и имеют высокий динамический порядок регулятора.

В выпускной квалификационной работе предложен робастный метод управления объектом по выходной переменной, на примере автоматической настройки электрогитары.

В первом разделе приведен обзор существующих подходов и методов к управлению параметрически неопределенными объектами.

Во втором разделе осуществлен синтез закона управления параметрически неопределенным объектом.

В третьем разделе произведено математическое моделирование замкнутой системы с разработанным регулятором в среде Simulink.

В четвертом разделе выполнен анализ эффективности закона управления для конкретной модели объекта.

Подпись и дата

Инв. № з/д.б.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Лист

5

КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

1 ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

1.1 Актуальность задачи

В работе рассмотрен пример, когда есть объект готовый к работе, но существуют сложности с его управлением. Существует система автоматической настройки электрогитары. Она обладает 6 сервоприводами, воздействующими на колки гитары. Когда система функционирует, музыкант ударяет по струне, та в свою очередь совершает колебания, воздействуя на колок, с которого значение частоты колебания струны передается на частотомер. Эта частота сравнивается с эталонным значением, заложенным в прошивке микроконтроллера. В зависимости от того, в какую сторону отличается значение частоты, полученное с частотомера, контролер посылает сигнал либо затянуть, либо ослабить струну до тех пор, пока частота колебания струны не попадет в заданный разработчиком диапазон. Однако, может произойти такая ситуация, когда устройство начинает функционировать неправильно или не работать вовсе. Причин может быть много: сбилась прошивка, тем самым не верные показатели частот указаны для сравнения, вышел из строя блок управления и так далее. Для дальнейшего использования есть несколько вариантов. Можно купить новое устройство, но это стоит денег. Можно попробовать восстановить прошивку, запросив ее у производителя, однако производитель держит эти данные в секрете (был отправлен запрос, получили отказ). Можно разобрать устройство, попробовать снять характеристики с сервоприводов, написать новую прошивку, с использованием классических методов управления, и загрузить в контроллер, но устройство цельнокорпусное и кроме выхода для программатора ничего нет. Сама прошивка защищена производителем и не представляется возможным считать ее с контроллера. Выходом из данной ситуации будет управление по выходной переменной двигателя - частоте.

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата		
				<p>устройство начинает функционировать неправильно или не работать вовсе. Причин может быть много: сбилась прошивка, тем самым не верные показатели частот указаны для сравнения, вышел из строя блок управления и так далее. Для дальнейшего использования есть несколько вариантов. Можно купить новое устройство, но это стоит денег. Можно попробовать восстановить прошивку, запросив ее у производителя, однако производитель держит эти данные в секрете (был отправлен запрос, получили отказ). Можно разобрать устройство, попробовать снять характеристики с сервоприводов, написать новую прошивку, с использованием классических методов управления, и загрузить в контроллер, но устройство цельнокорпусное и кроме выхода для программатора ничего нет. Сама прошивка защищена производителем и не предоставляется возможным считать ее с контроллера. Выходом из данной ситуации будет управление по выходной переменной двигателя - частоте.</p>	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					6

1.2 Описание объекта управления *TronicalTune*

Крис Адамс, сотрудник гитарной фирмы-гиганта Gibson, по совместительству будущий создатель *TronicalTune*, взял однажды свою гитару в руки и начал настраивать ее перед игрой. Он никак не мог понять почему же гитара все никак не звучит, а когда настроится, то не держит строй, и ее снова приходится настраивать. Он задумался, а есть ли какие-нибудь автоматизированные системы для настройки гитары, чтобы корректировать строй гитары быстро и просто. Немного поискав в интернете информацию об этом и, так ничего не найдя, он решил создать устройство, которое автоматически настраивало бы гитару за секунды. Одержимый этой идеей он довел ее до того, что это устройство могло бы так же переключаться между различными настройками. Проблема заключалась в том, что Крис не имел инженерного опыта, а был лишь гитарным мастером. В 2005 году основав компанию Tronical, базирующуюся в Гамбурге, он в течение 10 лет создал простое и понятное устройство для автоматической настройки гитары за доли секунд.

В 2013 году система автонастройки *TronicalTune* была представлена на крупнейшей выставке музыкальных инструментов и оборудования *NAMM 2013 (National Association of Music Merchants)*.

Большинство гитар фирмы *Gibson* начиная с 2014 года оснащены данной системой автонастройки.

Tronical Tune сочетает в себе ручной и моторизованный привод, что позволяет в компактной конструкции иметь надежное самоблокирующееся автоматическое и ручное регулирование.

Регулировка привода характеризуется тем, что усилие передается от выходного вала двигателя на колок, который является редуктором, по крайней мере в три этапа, при этом первый этап – это этап, когда выходной вал приводного электродвигателя входит в сцепление, а последний этап является эта-

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	томатической настройки гитары за доли секунд.	
					В 2013 году система автонастройки <i>TronicalTune</i> была представлена на крупнейшей выставке музыкальных инструментов и оборудования <i>НАММ 2013 (National Association of Music Merchants)</i> .	
					Большинство гитар фирмы <i>Gibson</i> начиная с 2014 года оснащены данной системой автонастройки.	
					<i>Tronical Tune</i> сочетает в себе ручной и моторизованный привод, что позволяет в компактной конструкции иметь надежное самоблокирующееся автоматическое и ручное регулирование.	
					Регулировка привода характеризуется тем, что усилие передается от выходного вала двигателя на колок, который является редуктором, по крайней мере в три этапа, при этом первый этап – это этап, когда выходной вал приводного электродвигателя входит в сцепление, а последний этап является эта-	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ	Лист 7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.3 Принцип работы *TronicalTune*

На рисунке 1.3.1 показан регулировочный механизм, разработанный *TronicalTune*.

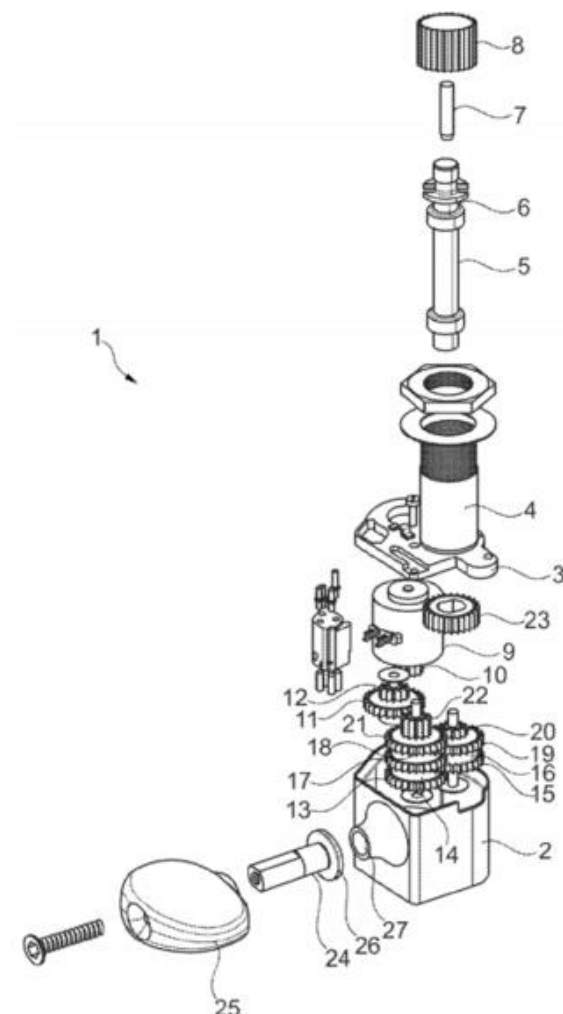


Рисунок 1.3.1 – Приводной механизм

Регулировка привода, с его основными компонентами, расположена в корпусе, который состоит из нижней части (2) и крышки (3). Направляющая втулка (4) образует одно целое с крышкой корпуса (3), внутри которого вращается втулка колка. Колок (5) имеет секцию обмотки (6), на которую наматывается свободный конец струны. Колок (5) вращается таким образом, чтобы затянуть или размотать конец струны на секцию обмотки, с целью варьирования натяжения струны.

Подпись и дата

Инв. № з/удл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Лист

9

КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Конец струны прикреплен к колку (5), используя зажимный штифт (7) и зажимный винт (8). Зажимный винт (8) имеет внутреннюю резьбу, соответствующую наружной резьбе, которая расположена по окружности передней части колка (5). Зажимные контакт прижимает струну сверху до упора внутри колка (5).

Механизм (1) снабжен приводным двигателем (9) для электромеханической регулировкой поворотного положения колка (5). В данном случае используется двигатель постоянного тока со следующими параметрами:

- Напряжение питания 6 В
- Ток 0.8А
- Передаточное отношение: 1 / 54.5
- Сопротивление обмотки: 4.5 Ом
- Вес: 50.6 грамм

К выходному валу приводного двигателя (9) подведено зубчатое колесо (10). Эта шестерня сцепляется с зубьями шестерни большего диаметра (11), образуя первый этап многоступенчатого передаточного редуктора, и расположена на первой оси таким образом, что она может свободно вращаться. Шестерня меньшего диаметра (12) жестко соединена с зубчатым колесом (11) и колесом большего диаметра (13), которое свободно вращается на второй оси. То же самое представляет собой вторая ступень редуктора. Расположенный над ней и жестко соединен с зубчатым колесом (13) больший диаметр шестерни (14), который установлен на той же второй оси и на той же сетке со свободно вращающимися большим диаметром шестерни (15) на третьей оси, составляющей третью стадию. Шестерня (16) расположена выше шестерни меньшего диаметра (15) и жестко соединена с ней. Зубья (16) сцеплены с дополнительным, более крупным зубчатым колесом (17), которое расположено над шестерней (14) на второй оси и образует четвертую ступень редуктора. Дополнительная, меньшего диаметра шестерня (18), жестко соединена с зубчатым колесом (17). Шестерня (18) сцепляется со свободно вращающейся,

Инв. № докум.		Подпись и дата		<p>лесо (10). Эта шестерня сцепляется с зубьями шестерни большего диаметра (11), образуя первый этап многоступенчатого передаточного редуктора, и расположена на первой оси таким образом, что она может свободно вращаться. Шестерня меньшего диаметра (12) жестко соединена с зубчатым колесом (11) и колесом большего диаметра (13), которое свободно вращается на второй оси. То же самое представляет собой вторая ступень редуктора. Расположенный над ней и жестко соединен с зубчатым колесом (13) больший диаметр шестерни (14), который установлен на той же второй оси и на той же сетке со свободно вращающимися большим диаметром шестерни (15) на третьей оси, составляющей третью стадию. Шестерня (16) расположена выше шестерни меньшего диаметра (15) и жестко соединена с ней. Зубья (16) сцеплены с дополнительным, более крупным зубчатым колесом (17), которое расположено над шестерней (14) на второй оси и образует четвертую ступень редуктора. Дополнительная, меньшего диаметра шестерня (18), жестко соединена с зубчатым колесом (17). Шестерня (18) сцепляется со свободно вращающейся,</p>
Инв. № дубл.		Подпись и дата		
Взам. инв. №		Подпись и дата		
Инв. № подл.		Подпись и дата		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	
<div style="font-size: 1.2em; font-weight: bold;">КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ</div>				Лист
				10

устойчивости системы и максимально быстрого достижения необходимого момента. Сравнить выбранный регулятор с известными классическими при прочих равных условиях, с учетом того что математическая модель объекта известна.

1.5 Обзор методов управления неопределенными объектами

Классические методы теории управления не подходят для решения задач с объектами, обладающими какими-либо видами неопределенностей. В таких случаях рекомендуется использовать методы адаптивного и робастного управления, которые позволяют грубо(робастные) или путем самонастройки(адаптивные) управлять заданной системой.

Классификация методов изображена на рисунке 1.5.1.

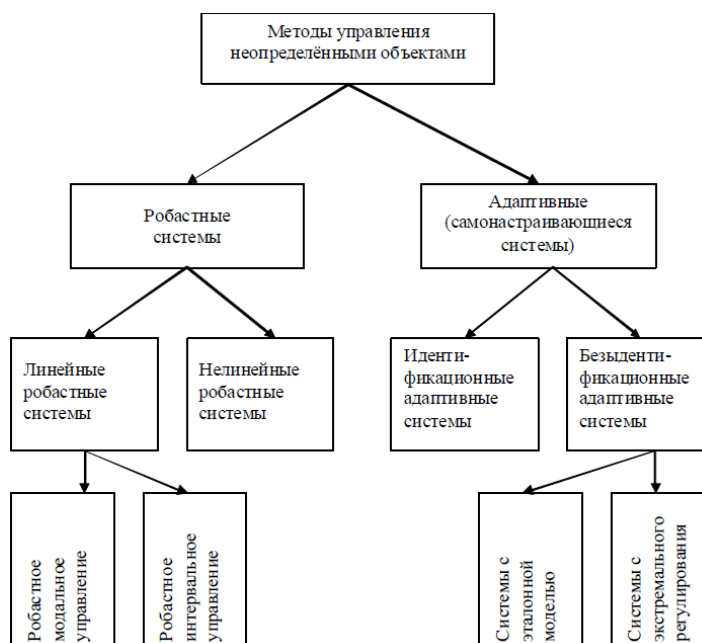


Рисунок 1.5.1 – Классификация методов управления неопределенными объектами

Робастные системы – это системы управления, которые обеспечивают хороший функционал качества при наличии различного рода неопределенностей объекта управления. Такие системы остаются не чувствительными (то есть грубыми) к изменениям математической модели, причем коэффициенты регулятора не изменяются во время работы. Такие свойства обеспечиваются за счет того, что на этапе синтеза алгоритма управления выбирается такая

Подпись и дата

Инв. № з/дл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

структура регулятора, которая способна поддерживать некоторый заданный разработчиком критерий качества на протяжении всего времени функционирования алгоритма.

Адаптивные системы – это системы управления, которые подстраивают параметры регулятора во время функционирования, тем самым пытаются компенсировать нехватку информации об объекте в ходе работы.

Для реализации линейной робастной системы необходимо использовать методы обобщенного модального робастного управления. Данные методы позволяют вычислить параметры матрицы состояния системы, такие как геометрический спектр собственных векторов и алгебраический спектр собственных значений, так, чтобы они удовлетворяли некоторому критерию качества. Возможности обобщенного модального управления заключаются в том, что неопределенность заключается только в неопределенности матрицы состояния объекта.

Существует два варианта реализации обобщенного модального управления. Первый - это модальноробастное управление. В данном варианте назначается желаемый спектр собственных значений номинальной матрицы состояния. Таким образом доставляются требуемые динамические показатели процессов в установившемся и переходном режимах. Модальная робастность обеспечивает стабильность (робастность) этих показателей при условии, что известна неопределенность матрицы состояния объекта. Это осуществляется путем минимизации числа обусловленности матрицы собственных векторов номинальной реализации матрицы состояния системы и контролем нормы матрицы состояния модальной модели. Вторым вариантом — это управление, реализующееся за счет параметрической инвариантности выхода системы. В расчет берутся матрицы-столбцы входа параметрических внешних воздействий, на основе которых номинальной матрице состояния системы сопоставляют спектр собственных векторов, совпадающий с элемен-

Подпись и дата		<p>Существует два варианта реализации обобщенного модального управления. Первый - это модальноробастное управление. В данном варианте назначается желаемый спектр собственных значений номинальной матрицы состояния. Таким образом доставляются требуемые динамические показатели процессов в установившемся и переходном режимах. Модальная робастность обеспечивает стабильность (робастность) этих показателей при условии, что известна неопределенность матрицы состояния объекта. Это осуществляется путем минимизации числа обусловленности матрицы собственных векторов номинальной реализации матрицы состояния системы и контролем нормы матрицы состояния модальной модели. Вторым вариантом — это управление, реализующееся за счет параметрической инвариантности выхода системы. В расчет берутся матрицы-столбцы входа параметрических внешних воздействий, на основе которого номинальной матрице состояния системы сопоставляют спектр собственных векторов, совпадающий с элемен-</p>					Лист
Инв. № дубл.							14
Взам. инв. №							
Подпись и дата							
Инв. № подл.						КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

тами этой матрицы. Далее необходимо достичь полной неуправляемости (параметрической инвариантности) выхода проектируемой системы. Достигается это с помощью дополнения обеспечением принадлежности матриц-столбцов ядру матрицы выхода отношения «параметрический вход – состояние системы».

Интервальное робастное управление, использует векторно-матричное описание объектов, интервальность значений первичных физических параметров которого приводит к интервальному представлению только его матрицы состояния, разделяемой на медианную и интервальную части. Разработчиком определяется желаемая структура мод медианной составляющей матрицы состояния системы, чем обеспечивается качество процессов в проектируемой системе. Одновременно с этим контролируются значения оценки относительной интервальности матрицы с помощью измерения нормы медианной составляющей.

Для обеспечения робастности в нелинейных робастных системах вводится дополнительная статическая нелинейная обратная связь, реализуя тем самым нелинейный закон управления даже для линейных объектов.

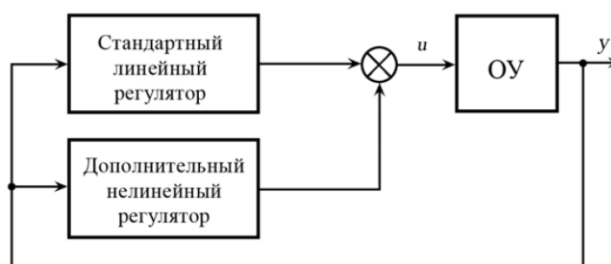


Рисунок 1.5.2 – Система нелинейного робастного управления

Идентификационные адаптивные системы используют методы идентификации объекта, то есть получают оценки параметров или динамические характеристики. Система идентификационного адаптивного управления изображена на рисунке 1.5.3.

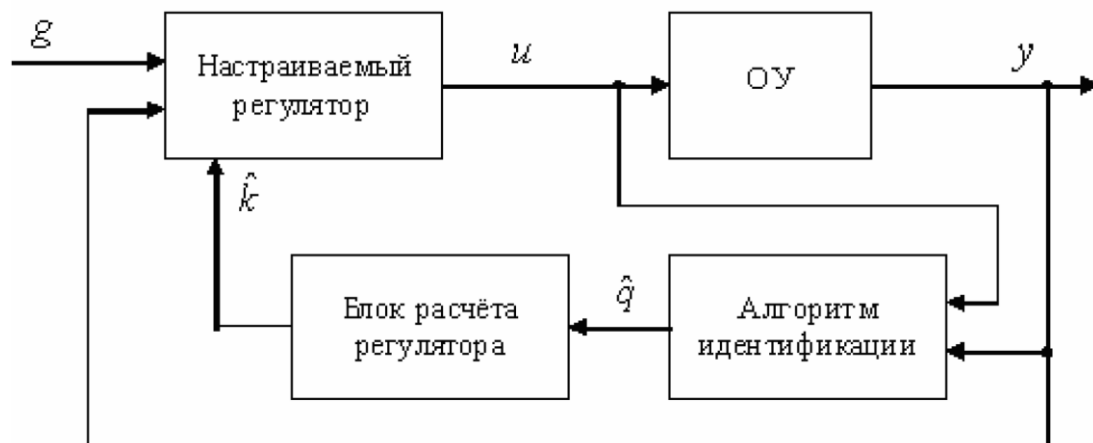


Рисунок 1.5.3 – Система идентификационного адаптивного управления

Однако такие методы требуют больших затрат по времени для определения свойств объекта, это в свою очередь приводит к не желаемой задержке управления.

Альтернативой служит безыдентификационные адаптивные системы. Такие системы используют либо эталонные значения выходной переменной $u_m(t)$, либо с помощью некоторого критерия качества $Q=Q(y(t))$.

Зачастую используется блок, в котором задается желаемый отклик на входное воздействие. Значение на выходе сопоставляется с желаемым, далее входное воздействие корректируется относительно ошибки слежения. Так как не требуется оценка неизвестных параметров объекта, как это необходимо в идентификационном подходе, коэффициенты регулятора настраиваются из условия главной цели управления – минимизация ошибки слежения.

Подпись и дата

Инв. № з/д.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

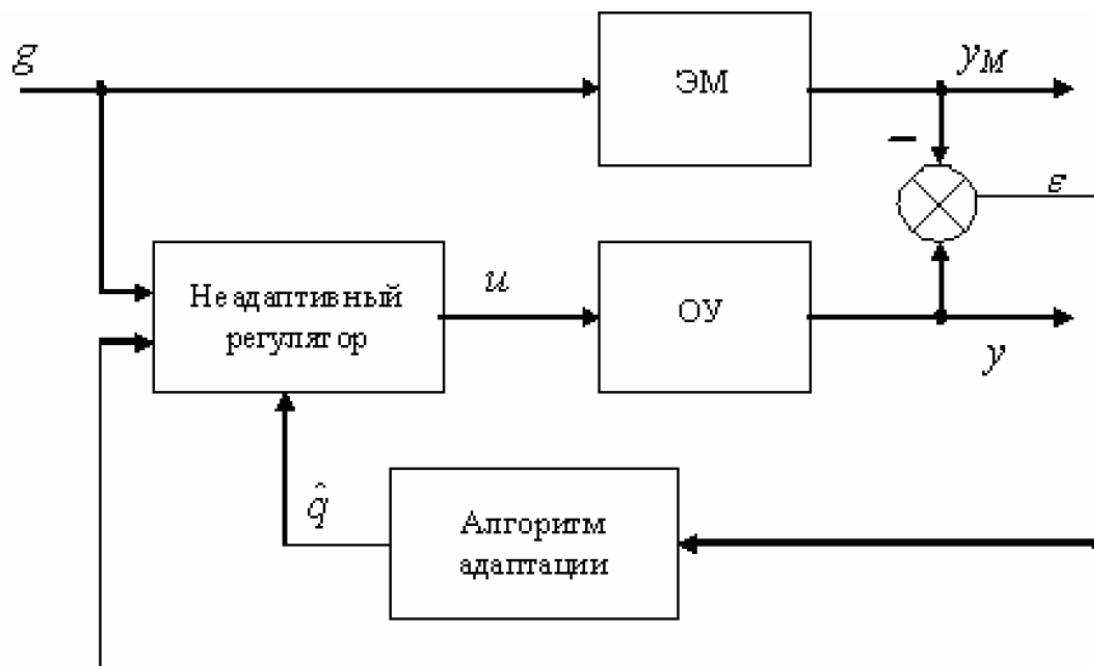


Рисунок 1.5.4 – Система адаптивного управления с эталонной моделью

Еще один из вариантов – привести коэффициенты регулятора к параметрам объекта управления. В таком случае критерий качества будет достигать минимума(максимума) и настройку параметров объекта можно вести из условия минимизации (максимизации) этого критерия. Такие системы получили названия систем экстремального регулирования. [2]

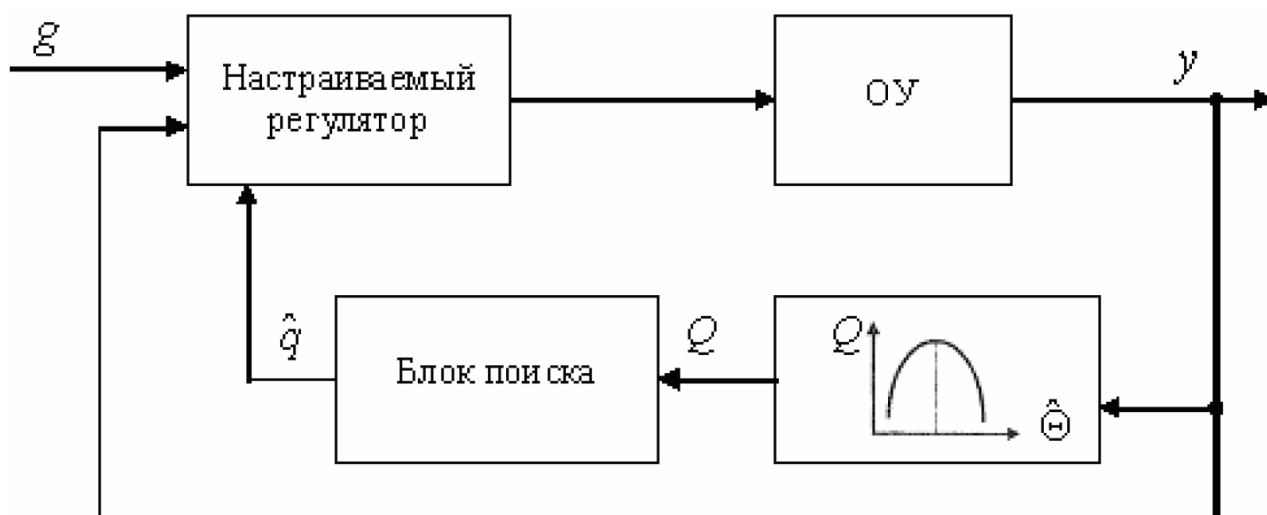


Рисунок 1.5.5 – Система экстремального регулирования

Подпись и дата

Инв. № ауд.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Лист

17

2 СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Постановка задачи управления

Введем обозначение вектора θ , который будет содержать в себе неизвестные факторы, проявляющиеся во время функционирования объекта управления. Введем класс рассматриваемых объектов управления через множество Ω_θ , $\theta \in \Omega_\theta$. Эталонная реакция нашей системы будет являться целью управления, в таком случае ее можно описать как

$$Q(x, t) \leq \Delta, \quad (2.1)$$

где $Q(\cdot)$ – целевая функция, $\Delta > 0$ – порог (т. е. допустимое значение целевой функции). Однако, в начале функционирования данное условие может не выполняться в виду нехватки данных о свойствах объекта, в таком случае необходимо, чтобы неравенство (2.1) выполнялось хотя бы в форме предельного целевого неравенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(x, t) \leq \Delta. \quad (2.2)$$

Целью управления неопределенным объектом в данном случае может являться нахождение такого закона управления, который обеспечивал бы ограниченность всех сигналов в замкнутой системе при выполнении неравенства (2.2) и не содержащий неизвестный вектор θ .

Для реализации закона управления в данных условиях необходимо для начала определить неизвестный вектор θ и на основе полученных данных с помощью классической теории управления реализовать регулятор. Однако, на практике такой способ зачастую не подходит. Данный метод требует дополнительного времени для идентификации параметров, что влияет на время принятия решений. Также, те данные, которые были получены изначально для вектора θ могут быть более не актуальны во время длительного функционирования.

Целый ряд задач, для которых робастное управление с идентификацией параметров неприемлемо – решаются с помощью адаптивного управления. Та-

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	КСИУ.116.РЗ440.001 ПЗ	Лист				
						18				
						Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

кие методы позволяют решать одновременно и задачу управления и осуществлять оценку параметров, не требуя времени на идентификацию. Классические методы робастного и адаптивного управления хорошо реализуются на системах с относительной степенью $\rho < 2$. Если порядок системы выше, закон управления тут же становится довольно сложным и громоздким. Помимо этого известные методы робастного управления для случая $\rho > 2$ не справляются с задачей асимптотической устойчивости, но имеют менее сложную процедуру синтеза закона управления.

2.2 Вывод закона управления

Представим линейную систему в виде вход-выход

$$y = \frac{b(p)}{a(p)} u, \quad (2.3)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; выходная переменная $y=y(t)$ подлежит измерению, но не ее производные;

$b(p)=b_m p^m+b_{m-1} p^{m-1}+\dots+b_1 p+b_0$ и $a(p)=p^n+a_{n-1} p^{n-1}+\dots+a_1 p+a_0$ – полиномы с неизвестными параметрами; относительная степень системы (2.3) $\rho=n-m$ предполагается известной; полином $b(p)$ гурвицев и коэффициент $b_m>0$.

Предположим, что относительная степень объекта управления $\rho=1$, в таком случае мы можем применить классический метод робастного управления. Управление будет задаваться следующим образом:

$$u=-\mu y, \quad (2.4)$$

для того чтобы полином (2.5) замкнутой системы (2.3) был устойчивым, необходимо выбрать параметр μ больше некоторого положительного μ_0

$$a^*(p)=a(p)+\mu b(p). \quad (2.5)$$

Допустим, мы можем измерять производные $y(t)$, при том что относительная степень системы (2.3) $\rho>1$, тогда закон управления можно описать как

$$u = \alpha(p) \bar{y}, \quad (2.6)$$

где $\alpha(p)$ – гурвицев полином степени $\rho-1$, \bar{y} – новое управление.

Теперь система (2.3) имеет следующий вид

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата		КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ	Лист				
							19				
							Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$y = \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p)} \bar{u}, \quad (2.7)$$

где полином $b(p)\alpha(p)$ гурвицев и относительная степень ρ модели (2.7) равна единице.

Обозначим новое управление \bar{u} как

$$\bar{u} = \mu u, \quad (2.8)$$

где при достаточно больших μ полином (2.9) будет гурвицев.

$$\gamma(p) = a(p) + \mu b(p)\alpha(p). \quad (2.9)$$

Но данные методы, представленные в (2.6) и (2.7) не подходят, так как у нас нет возможности измерять производные $y(t)$.

В таком случае выберем управление:

$$u = -\mu\alpha(p)\hat{y}, \quad (2.10)$$

для гурвицевости полинома (2.9) подбираются соответствующие μ и $\alpha(p)$.

Функция \hat{y} реализуется алгоритмом оценки в виде

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\hat{y} = \xi_1, \quad (2.12)$$

выходная переменная (2.3) $y(t)$ является входом динамической модели (2.13), k_1 принимается таким, чтобы (2.11) была асимптотически устойчивой, $\sigma > \mu$.

Данный регулятор получил название Последовательный компенсатор и зачастую применяется в качестве альтернативы известным методам управления.

Управление, представленное в (2.10) приемлемо, так как состоит только из известных или измеряемых сигналов. Можем подставить его в уравнение (2.3) и получить

$$y = \frac{b(p)}{a(p)} [-\mu\alpha(p)\hat{y}] = \frac{b(p)}{a(p)} [-\mu\alpha(p)y + \mu\alpha(p)\varepsilon], \quad (2.13)$$

преобразуя модель (2.13) получаем

Инв. № подл.	Подпись и дата	Инв. № з/удл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ					Лист
										20
					Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

$$a(p)y + \mu\alpha(p)b(p)y = \mu b(p)\alpha(p)\varepsilon. \quad (2.14)$$

Проведем замену $\gamma(p) = a(p) + \mu b(p)\alpha(p)$, $\beta(p) = \mu b(p)\alpha(p)$ получаем

$$y = \frac{\beta(p)}{\gamma(p)} \varepsilon, \quad (2.15)$$

где функция отклонения равна

$$\varepsilon = y - \hat{y}. \quad (2.16)$$

Представим систему (2.15) в виде модели вход-состояние-выход

$$\dot{x} = Ax + B\varepsilon, \quad (2.17)$$

$$y = C^T x, \quad (2.18)$$

где A , B , C – матрицы перехода от модели вход-выход к модели вход-состояние-выход, $x \in R^n$ – вектор переменных состояния системы (2.17).

Приведем систему (2.11), (2.12) к векторно-матричной форме

$$\dot{\xi} = \sigma(\Gamma\xi + dk_1y) \quad (2.19)$$

$$y = h^T \xi, \quad (2.20)$$

$$\text{где } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \cdots & -k_{p-1} \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Обозначим вектор отклонений

$$\eta = hy - \xi, \quad (2.22)$$

тогда невязка ε

$$\varepsilon = y - \hat{y} = h^T hy - h^T \xi = h^T (hy - \xi) = h^T \eta, \quad (2.23)$$

Возьмем производную от h

$$\dot{\eta} = h\dot{y} - \sigma(\Gamma(hy - \eta) + dk_1y) = h\dot{y} + \sigma\Gamma\eta - \sigma(dk_1 + \Gamma h)y. \quad (2.24)$$

С учетом того, что $dk_1 = -\Gamma h$ имеем

$$\dot{\eta} = h\dot{y} + \sigma\Gamma\eta, \quad (2.25)$$

$$\varepsilon = h^T \eta. \quad (2.26)$$

Матрица Γ является гурвицевой и удовлетворяет уравнению Ляпунова:

$$\Gamma^T N + N\Gamma = -Q_2, \quad (2.27)$$

Подпись и дата

Инв. № з/дл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

при $N = N^T > 0$ и $Q_2 = Q_2^T > 0$.

Критерии, при которых возможна реализация закона (2.10) для стабилизации системы (2.3) выражены в следующей теореме.

Теорема. Пусть число $\sigma > \mu$ и относительно него выполнены следующие условия:

$$-\sigma Q_2 + \delta^{-1} h h^T + N h c^T b b^T c h^T N + h h^T + \delta^{-1} N h c^T A A^T c h^T N \leq -Q, \quad (2.28)$$

где $Q = Q^T > 0$, а число $\delta > 0$ удовлетворяет неравенству

$$-Q_1 + \delta P b b^T P + \delta I \leq -Q \leq 0. \quad (2.29)$$

Тогда система (2.17), (2.18), (2.26), (2.27) экспоненциально устойчива.

В таком случае система остается робастной по отношению к аддитивным возмущениям. [3]

Подпись и дата

Инв. № дудл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Лист

22

КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ

Изм.

Лист

№ докум.

Подпись

Дата

3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Функциональная схема моделирования представлена в приложении А, на рисунке А1.

Объектом управления в данном случае будет являться двигатель постоянного тока, который необходимо подобрать по известным параметрам. Структурная схема ДПТ представлена на рисунке А2. Так как выходной переменной в нашем случае будет являться момент нагрузки на редукторе двигателя, необходимо связать его с частотой, издаваемой струной.

$$T = \frac{(U_W(2LF)^2)}{386.4} * 0.453, \quad (3.1)$$

где U_W – вес струны, L – длина мензуры (расстояние между верхним и нижним порожком на инструменте), F – частота.

Так как разные струны по-разному воздействуют на редуктор и на двигатель, было решено для расчетов взять конкретный набор струн D'Addario EXL110 характеристики которых представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Струна	Диаметр, м	Частота, Гц	Натяжение, кг	Момент, Нм
Е(первая)	0.000254	329.6	7.348	0.309
В(вторая)	0.000330	246.9	6.976	0.294
Г(третья)	0.000431	196.0	7.520	0.317
Д(четвертая)	0,000660	146.8	8.335	0.351
А(пятая)	0,000915	110.0	8.834	0.372
Е(шестая)	0,00117	82.4	7.928	0.334

Подпись и дата

Инв. № з/удл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Максимальное натяжение, которое может дать струна из данного набора – 25 кг, что сопоставимо с силой в 245 Н. Радиус колка равен 0.0043 метра (чертежи приведены в приложении Г). Таким образом момент нагрузки равен

$$M_{CM} = 245 \text{ Н} * 0.0043 \text{ м} = 1,0535 \text{ Нм.} \quad (3.2)$$

Это максимальный момент нагрузки. Благодаря редуктору, максимальный момент нагрузки на валу двигателя рассчитывается как

$$M_{\max Д} = \frac{1.0535}{54.5} = 0.01933 \text{ Нм.} \quad (3.3)$$

Компания TronicalTune, которая занимается разработкой системы автоматической настройки гитары, отказалась предоставлять какие-либо технические данные своей системы. Из патентов данной системы известно немного: используется сервопривод с передаточным числом 54.5 и питающийся 6 В постоянного напряжения. Для остальной модуляции используется предположительный аналог сервопривода от компании FAULHABER 2224U006SR, который примерно совпадает с габаритами устройства и имеет такой же вольтаж. Подробные характеристики представлены в приложении В.

Согласно документации, к данному двигателю, номинальный момент нагрузки равен 0.0212 Нм, что нам подходит.

В соответствии с таблицей 3.1, проведем моделирование для нагрузки в 7.928 кг, что равно 6 струне при частоте в 82.4 Гц при моменте нагрузки 0.334 Нм.

Управление представлено в виде (2.11), (2.12), где коэффициенты регулятора примем равными $\alpha = 2, \delta_0 = 90, \delta_1 = 2, \delta_2 = 10, k_1 = 1, k_2 = 2, \tilde{k} = 0.303$. Структурная схема регулятора представлена в приложении А3.

График переходного процесса по моменту представлен ниже

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ				
					Лист				
					24				

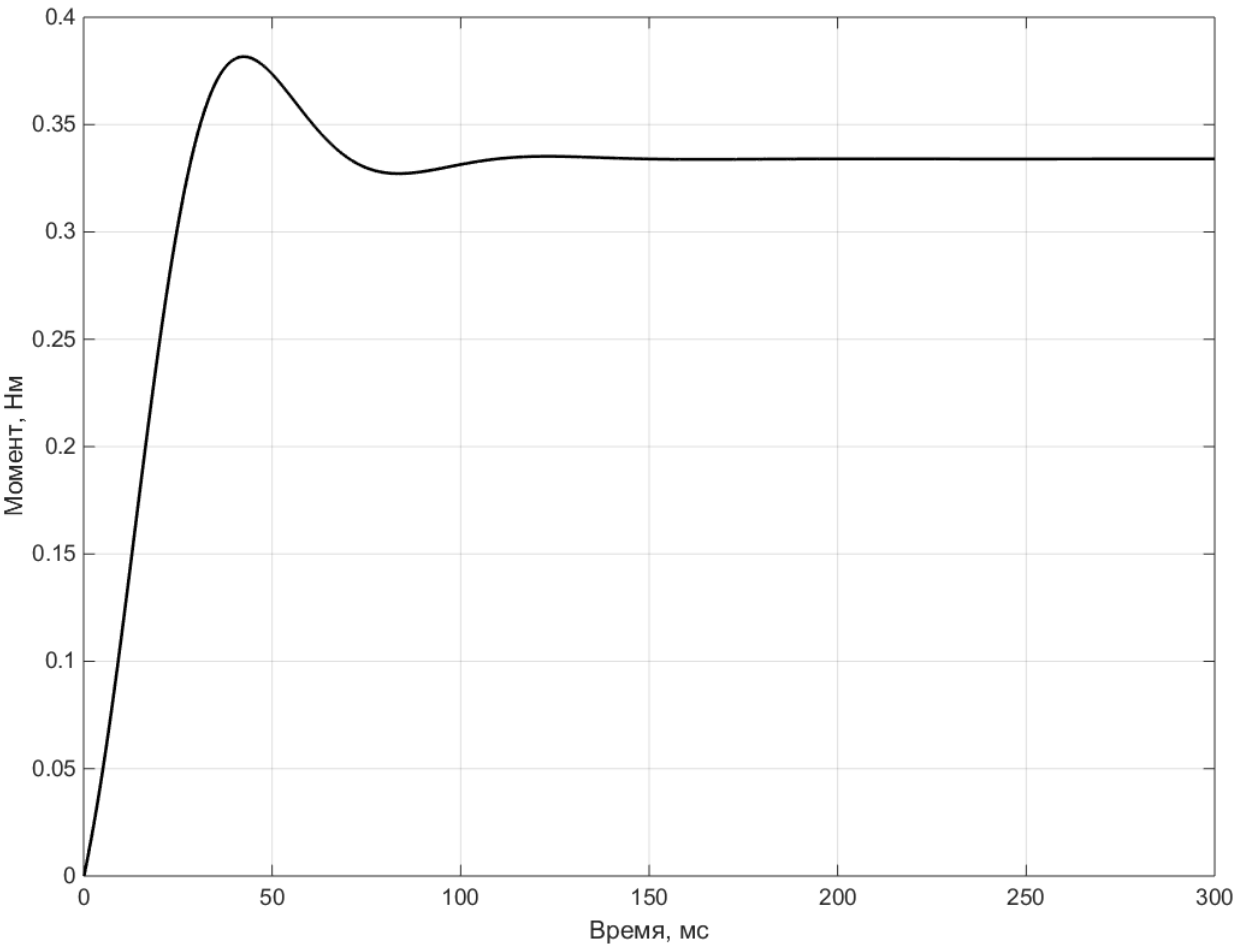


Рисунок 3.1 – Момент нагрузки

Как видно из графика, необходимый момент достигается менее чем за 0.3 секунды, что позволяет быстро и точно настраивать струну до конкретного значения.

Подпись и дата	
Инв. № ауд.	
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

4 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБРАННОГО АЛГОРИТМА

Сравним последовательный компенсатор с известными методами управления, в том числе при наличии паразитирующей динамики.

Для начала возьмем П-регулятор и применим его к модели ДПТ. Сигнал управления в таком случае выглядит как

$$u = k_p y(t), \quad (4.1)$$

где k_p – коэффициент передачи регулятора.

График момента на валу при использовании предложенного регулятора и ПИ-регулятора представлен на рисунке 4.1.

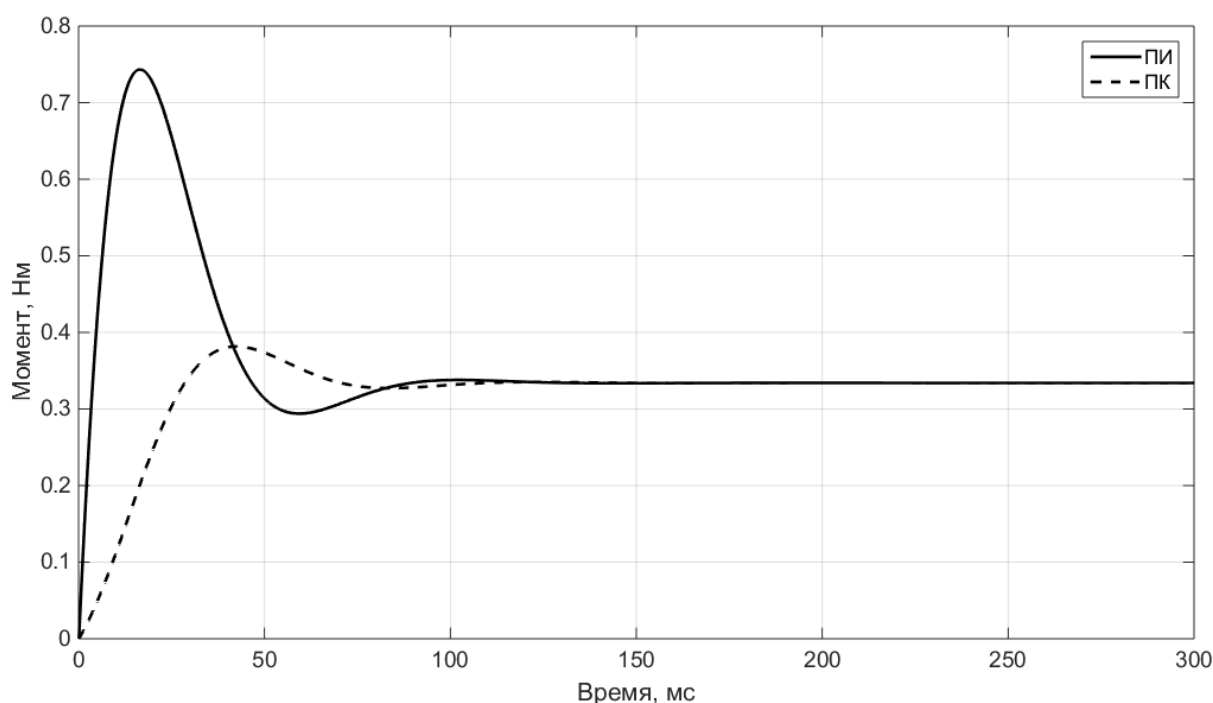


Рисунок 4.1 – Моделирование ПИ- и ПК-регулятора

Как видно из графиков, последовательный компенсатор имеет меньшее значение перерегулирования, одновременно с этим значительно быстрее приходит в желаемое значение момента нагрузки. Настройка пропорционально-интегрального регулятора проводилась автоматическими средствами среды моделирования *Matlab/Simulink*.

Сравним данные регуляторы при наличии паразитной динамики, реализованной с помощью апериодического звена первого порядка в математической модели ДПТ. Результаты моделирования приведены на рисунке 4.2

Подпись и дата	
Инв. № з/д.	
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

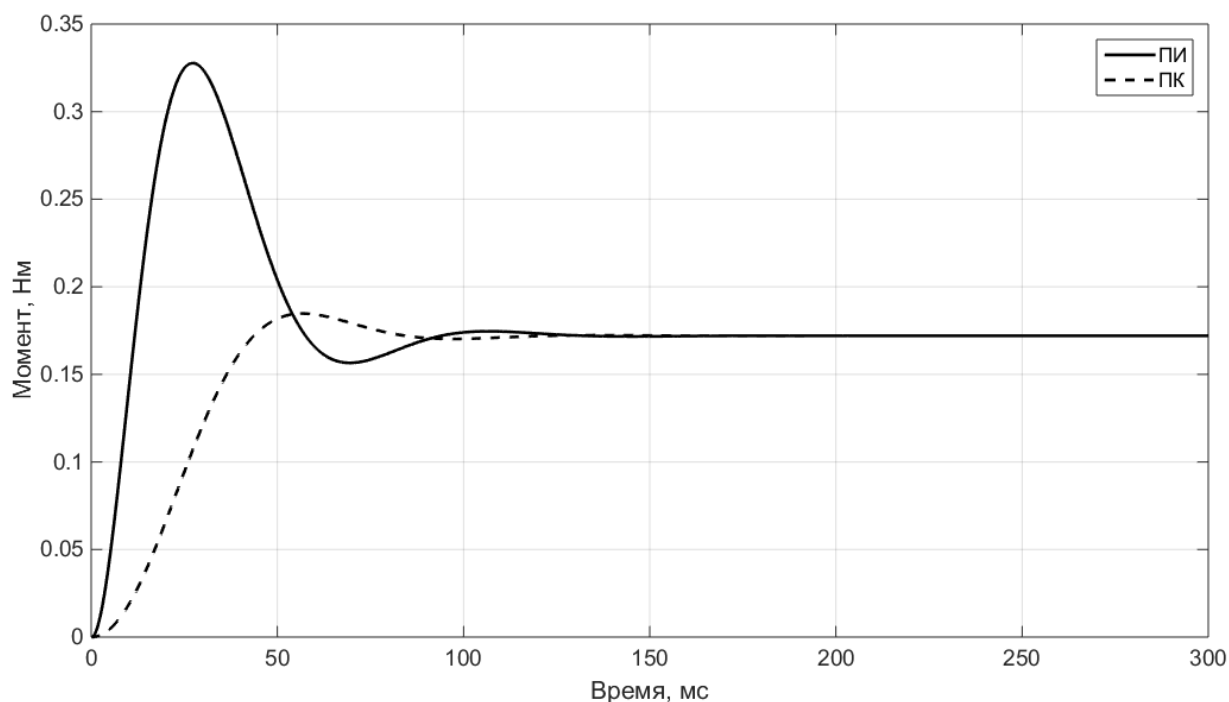


Рисунок 4.2 – Моделирование ПИ- и ПК- регулятора при наличии паразитной динамики

Наличие паразитной динамики уменьшило перерегулирование у ПИ-регулятора и сократило время переходного процесса, в то время как на предложенный регулятор паразитная динамика значительно не повлияла.

Далее сравним предложенный метод управления с пропорционально-дифференциальным (ПД) регулятором, описываемый следующим уравнением

$$u = k_p y(t) + k_d y(t)p, \quad (4.2)$$

где k_d – коэффициент усиления дифференцирующей части.

Настройка ПД-регулятора так же, как и в предыдущем пункте произведена автоматически с помощью *Matlab*. Ниже приведен график переходного процесса момента на редукторе

Подпись и дата

Инв. № з/дл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

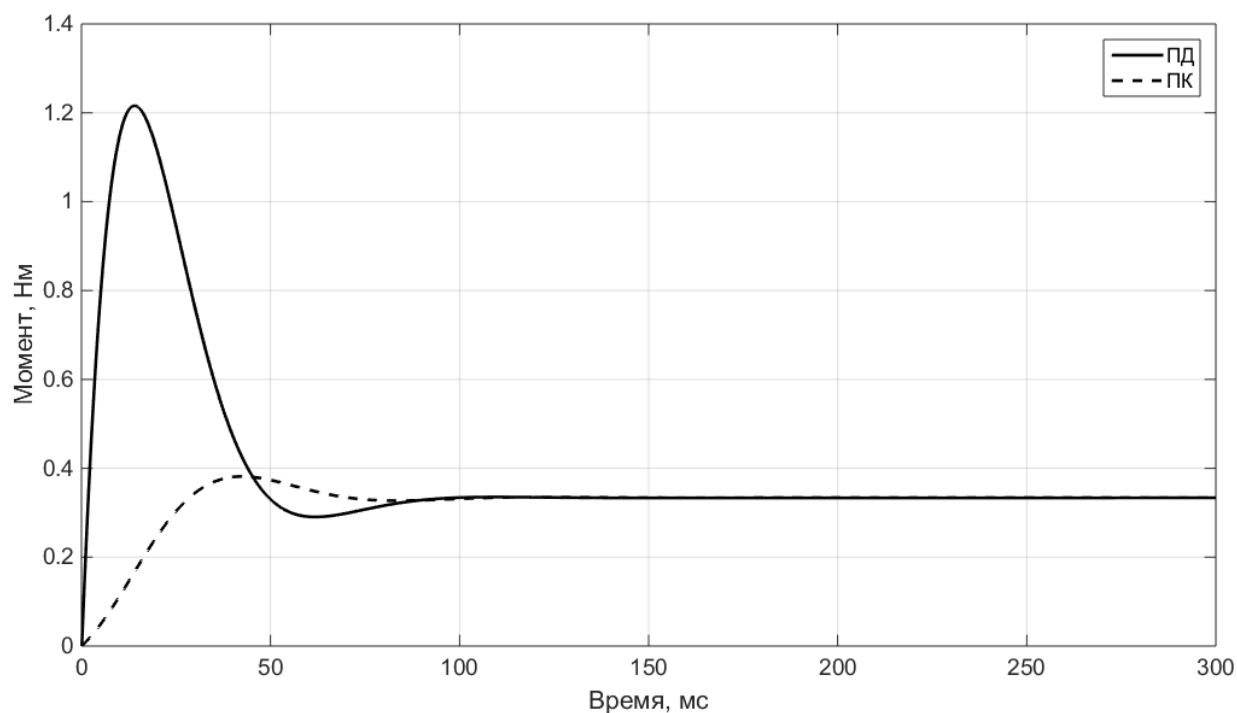


Рисунок 4.3 – Моделирование ПД- и ПК-регулятора

Значительное увеличение сигнала управления и, как следствие, увеличение перерегулирования при использовании ПД-регулятора может пагубно сказаться на продолжительности стабильной работы системы, даже если бы был дан вектор начальных значений и точно известна математическая модель объекта. Помимо этого, ПД-регулятор значительно дольше приходит в необходимое значение момента нагрузки.

Зачастую при моделировании синтезируют ПИД-регулятор, который дает нужные разработчику характеристики, при наличии необходимых для настройки регулятора данных. Управление в ПИД-регуляторе задается следующим образом

$$u = k_p y(t) + k_d y(t)p + k_i y(t) \frac{1}{p}, \quad (4.3)$$

где k_i – коэффициент усиления интегральной части.

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

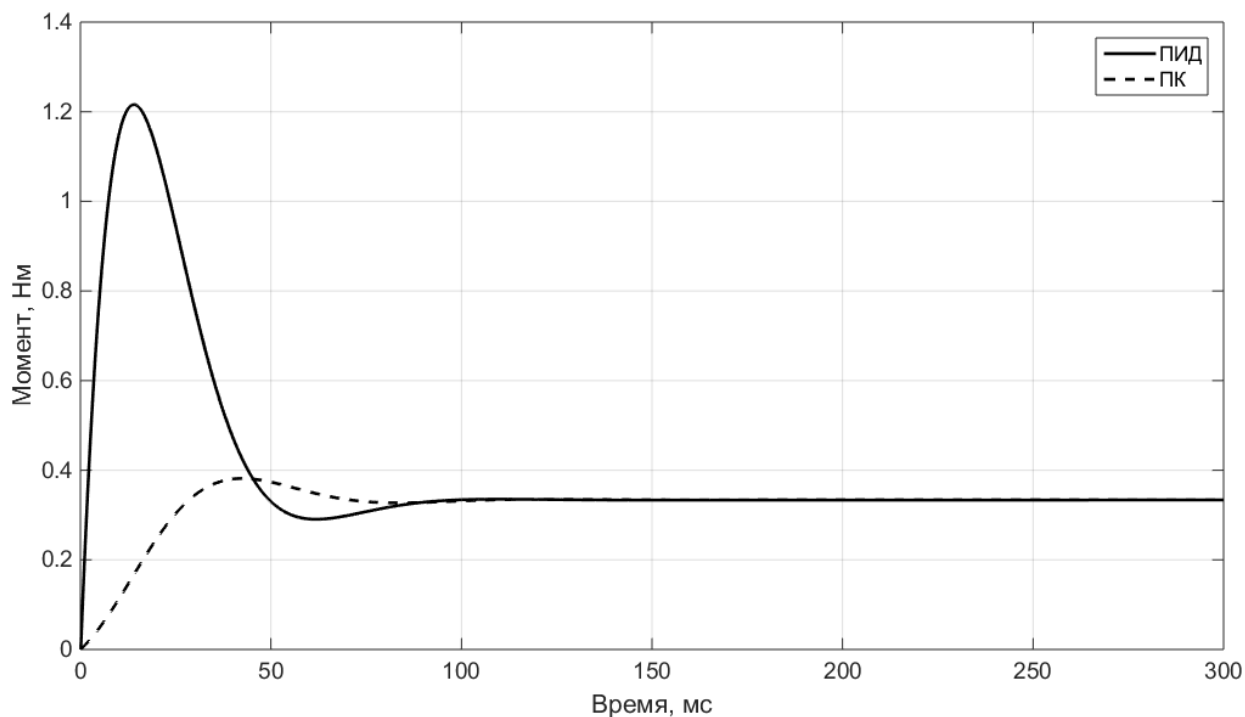


Рисунок 4.4 – Моделирование ПИД- и ПК-регулятора

Из графика видно, что предложенный регулятор достигает необходимого значения быстрее и с меньшим перерегулированием, что значительно повышает качество системы.

Математическая модель двигателя постоянного тока является моделью, чья относительная степень равна 2. Оптимальный порядок последовательного компенсатора в таком случае равен 1. Графики сравнения переходного процесса при последовательном компенсаторе разного порядка представлены ниже.

Подпись и дата

Инв. № з/удл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе приведен обзор методов управления по выходу. Описан закон управления, благодаря которому при отсутствии или не возможности определить точно математическую модель объекта, можно управлять им на основе выходной переменной.

Проведен анализ объекта управления в виде автоматической настройки гитары и применен описанный закон управления для регулирования частоты струны. Рассмотрен случай, когда на объект воздействует паразитная динамика, ухудшающая динамические свойства рассматриваемого объекта.

Осуществлено компьютерное моделирование в среде *Matlab/Simulink* данного объекта управления с использованием предложенного регулятора и известных методов управления.

В результате работы выявлено, что предложенный регулятор может быть применен для управления параметрически и структурно неопределенным объектом, а также, что наличие паразитной динамики при применении данного регулятора не повлияет на переходный процесс.

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ	Лист
											31

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Adjustment drive for adjusting the string tension of a stringed instrument [Электронный ресурс]. <http://www.google.ch/patents/US8772615> (дата обращения: 23.04.17)

2 Никифоров В.О. Интеллектуальное управление в условиях неопределенности / В.О.Никифоров, О.В.Слита, А.В.Ушаков. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 252 с.

3 Бобцов А. А., Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. – 2002. - №11, - С. 108–117.

4 Шаветов С.В. Адаптивные алгоритмы управления сложными мехатронными комплексами: дис. ... канд. техн. наук: защищена 25.09.2014: утв. 25.09.2014/ С.В. Шаветов. – СПб., 2014. – 130 с.

5 Коллекторные микродвигатели с полым ротором [Электронный ресурс]. <http://www.microprivod.ru/catalog/Faulhaber-roup/mikrodvigateli-s-polyim-rotorom.html> (дата обращения 01.05.17)

6 Бобцов А.А., Никифоров В.О. Адаптивное управление по выходу: проблематика, прикладные задачи и решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013 - №1. – с. 1-14.

7 Бобцов А.А., Никифоров В.О. Адаптивное управление по выходу: проблематика, прикладные задачи и решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013.

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Лист

32

КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Функциональная и структурная схемы

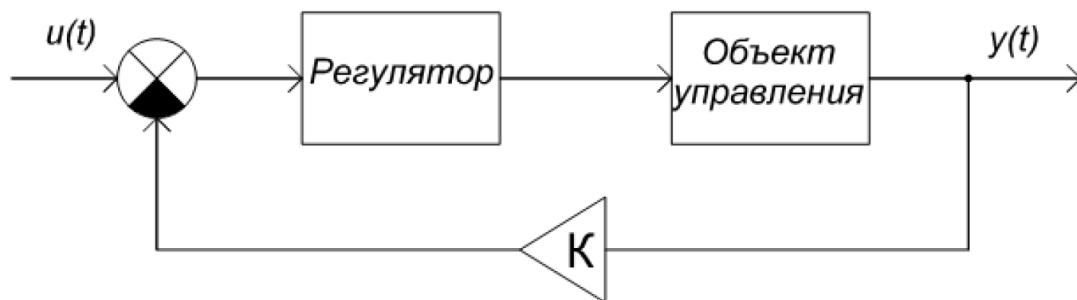


Рисунок А1 – Функциональная схема системы управления

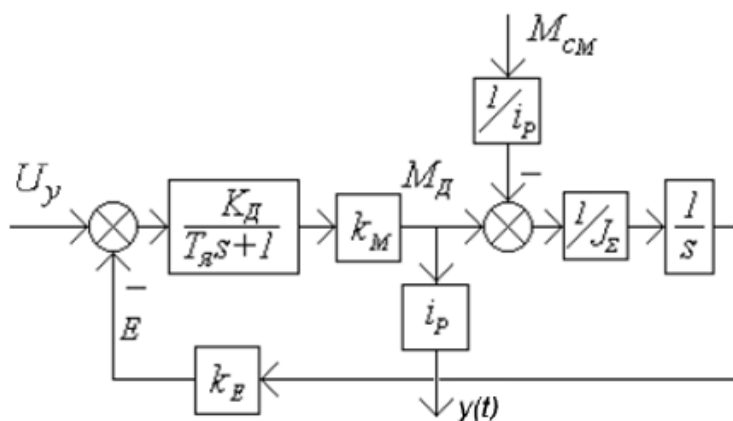


Рисунок А2 – Структурная схема объекта управления

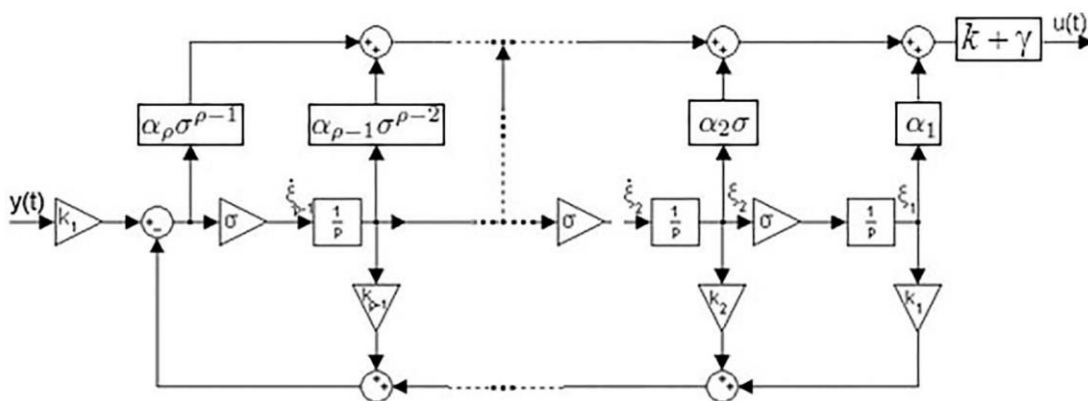


Рисунок А3 – Структурная схема регулятора

Подпись и дата

Инв. № з/удл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



DC-Micromotors

Precious Metal Commutation

6,8 mNm

8,5 W

Series 2224 ... SR

Values at 22°C and nominal voltage		2224 U	003 SR	006 SR	012 SR	018 SR	024 SR	036 SR	
1	Nominal voltage	U_N	3	6	12	18	24	36	V
2	Terminal resistance	R	0,56	1,94	8,71	17,5	36,3	91,4	Ω
3	Output power	$P_{nom.}$	3,92	4,55	4,05	4,54	3,88	3,46	W
4	Efficiency, max.	$\eta_{max.}$	80	82	82	82	81	80	%
5	No-load speed	n_0	8 100	8 200	7 800	8 100	7 800	7 800	min ⁻¹
6	No-load current, typ. (with shaft ø 2 mm)	I_0	0,066	0,029	0,014	0,01	0,007	0,005	A
7	Stall torque	M_H	18,5	21,2	19,8	21,4	19	16,9	mNm
8	Friction torque	M_f	0,23	0,2	0,2	0,21	0,2	0,22	mNm
9	Speed constant	k_s	2 730	1 380	657	454	328	219	min ⁻¹ /V
10	Back-EMF constant	k_E	0,366	0,725	1,52	2,2	3,04	4,56	mV/min ⁻¹
11	Torque constant	k_M	3,49	6,92	14,5	21	29,1	43,5	mNm/A
12	Current constant	k_I	0,286	0,144	0,069	0,048	0,034	0,023	A/mNm
13	Slope of n-M curve	$\Delta n / \Delta M$	438	387	394	379	411	462	min ⁻¹ /mNm
14	Rotor inductance	L	11	45	200	450	800	1 800	μH
15	Mechanical time constant	τ_m	11	11	11	11	11	11	ms
16	Rotor inertia	J	2,4	2,7	2,7	2,8	2,6	2,3	gcm ²
17	Angular acceleration	$\alpha_{max.}$	77	78	74	77	74	74	·10 ³ rad/s ²
18	Thermal resistance	R_{th1} / R_{th2}	5 / 20						K/W
19	Thermal time constant	τ_{w1} / τ_{w2}	6,8 / 440						s
20	Operating temperature range:		-30 ... +85 (optional version -55 ... +125)						°C
	– motor								
	– winding, max. permissible								
21	Shaft bearings		sintered bearings (standard)			ball bearings, preloaded (optional version)			
22	Shaft load max.:		2			2			mm
	– with shaft diameter		1,5			8			N
	– radial at 3 000 min ⁻¹ (3 mm from bearing)		0,2			0,8			N
	– axial at 3 000 min ⁻¹		20			10			N
	– axial at standstill								
23	Shaft play:								
	– radial	≤	0,03			0,015			mm
	– axial	≤	0,2			0			mm
24	Housing material		steel, black coated						
25	Mass		46						g
26	Direction of rotation		clockwise, viewed from the front face						
27	Speed up to	$n_{max.}$	9 000						min ⁻¹
28	Number of pole pairs		1						
29	Magnet material		NdFeB						

Подпись и дата

Инд. № з/д/д.

Взам. инд. №

Подпись и дата

Инд. № подл.

КСИУ.116.Р3440.001 ПЗ

Лист

34

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

