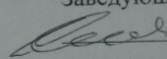


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»
Направление 27.04.04 – «Управление в технических системах»
Профиль – «Управление и информатика в технических системах»

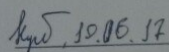
К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ
Заведующий кафедрой

 В.А. Соловьев
«5» 06 2017г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

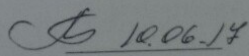
Синтез и исследование систем управления электромеханическим
объектом на основе многоструктурных наблюдателей

Студент группы 5АУм-1


подпись, дата

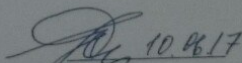
Н.А. Куприн

Научный руководитель,
канд. техн. наук, доцент


подпись, дата

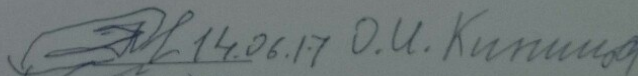
А.И. Горькавый

Нормоконтролёр


подпись, дата

Н.Е. Дерюжкова

Рецензент


подпись, дата

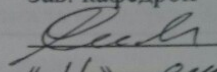
2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Кафедра Электропривод и автоматизация промышленных установок

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 В.А. Соловьев
«11» сентября 2015 г.

ЗАДАНИЕ на магистерскую диссертацию

Выдано студенту Куприну Никите Андреевичу

Тема магистерской диссертации Синтез и исследование систем
управления электромеханическим объектом на основе многоструктурных
наблюдателей

утверждена приказом по университету № 1692 от 27.11.2015

Срок сдачи студентом законченной работы _____

Исходные данные к работе Структурная схема двухмассового
упругого объекта; $T_{i\bar{z}} = 0.01$ с; $T_{m1} = 0.313$ с; $T_{m2} = 0.0049$ с; $T_c = 5.72$ с; b
 $= 0.0017$; $\omega_0 = 20$ с⁻¹; $\omega_0^H = 30$ с⁻¹;

Перечень подлежащих разработке вопросов: _____

Введение

- 1 Электромеханические системы в современных технологиях
- 2 Характеристика электромеханической системы, как объекта управления.
- 3 Синтез системы управления двухмассовым объектом на принципах
модального управления с многоструктурным наблюдателем

Заключение

Список использованных источников

Перечень графического материала:

Задание принял к исполнению _____ « 1 » 12 2015 г.
(подпись)

Научный руководитель, _____ А.Н. Горькавый
(подпись) (Ф.И.О.)

должность, ученая степень _____
в.т.н., доцент

« 1 » 12 2015 г.

Содержание

Введение.....	6
1 Электромеханические системы в современных технологиях	8
1.1 Мехатронный модуль, как основной элемент технологического оборудования	8
1.2 Промышленный робот, как совокупность мехатронных модулей, в технологическом оборудовании	10
1.3 Классификация промышленных роботов, проблемы функционирования.....	11
1.4 Конструкция промышленных роботов, как совокупности мехатронных модулей	17
2 Характеристика электромеханической системы, как объекта управления	21
2.1 Электромеханическая система и ее основные блоки	21
2.2 Электромеханические объекты с упругими связями	23
3 Синтез системы управления двухмассовым объектом на принципах модального управления с многоструктурным наблюдателем.....	25
3.1 Синтез модального регулятора	25
3.1.1 Определение векторно-матричного описания	25
3.1.2 Проверка условия полной управляемости объекта.....	30
3.1.3 Расчет модального регулятора	30
3.2 Расчет коэффициента прямой связи по возмущающему воздействию.....	40
3.3 Расчет наблюдающего устройства в системе «Объект– наблюдатель – регулятор».....	47
3.3.1 Расчет наблюдающего устройства полного порядка	47
3.3.2 Адаптивные системы	61
3.3.3 Синтез многоструктурного наблюдателя	64

3.3.4 Расчет астатического наблюдающего устройства с компенсационным каналом по возмущающему воздействию.....	71
3.3.5 Синтез многоструктурного астатического наблюдающего устройства.....	88
3.3.6 Синтез многоструктурного наблюдателя при изменением двух переменных объекта	94
3.3.7 Синтез многоструктурного астатического наблюдающего устройства при изменением двух переменных объекта	100
Заключение	103
Список использованных источников	104

Введение

В настоящее время современные технологии требуют от входящих в них локальных систем высокой точности и быстродействия в технологическом процессе.

Основными локальными системами современного технологического оборудования являются электропривода, которые совместно с оборудованием образуют электромеханические системы [1].

Маломощные электропривода совместно с системами управления всех уровней рассматриваемых, как мехатронные модули.

Высокие требования к точности и быстродействию современного технологического оборудования вынуждают применять современные принципы построения силовой части мехатронного модуля.

Мехатронные модули находят широкое применение в промышленных роботах, к которому необходимо применять сложные законы управления. Из этого следует, что нужно учитывать сложность математического описания робота, как объекта управления.

Принципы модального, оптимального и адаптивного управления преобладают при синтезе современных систем. Модальное управление является методом формирования цепей обратных связей, придающих замкнутой системе заранее выбранное распределение корней. Оптимальное управление является путем сведения к минимуму некоторого функционала, характеризующего качество регулирования. Адаптивное управление позволяет эффективно функционировать системе в условиях изменения параметров [14].

Реализация перечисленных методов управления часто невозможны без наблюдающего устройства полного или пониженного порядка [15]. Их реализации затрудняется при изменении параметров объекта. В этом случае применяются адаптивные наблюдающие устройства, которые сложны и не стабильны.

В работе предлагается синтезировать многоструктурные наблюдатели с логическим блоком, позволяющим переключать структуру наблюдателя в процессе функционирования системы для придания наблюдателю, а в целом системе, адаптивных свойств, что и является целью работы.

Для достижения поставленной цели решались задачи:

- 1) Анализировались требования, предъявляемые к оборудованию технологических процессов, в частности к электромеханической части
- 2) По научно-техническим источникам формировалось математическое описание электромеханической системы с упругими связями.
- 3) Синтезировались модальные регуляторы.
- 4) Синтезировались многоструктурные наблюдатели различной конфигурации.
- 5) Производилось исследование синтезированных систем управления электромеханическим объектом.

1 Электромеханические системы в современных технологиях

1.1 Мехатронный модуль, как основной элемент технологического оборудования

В настоящее время маломощные электромеханические системы совместно с системами программного управления (локальные системы) рассматриваются как мехатронные модули, что вполне корректно при описании и характеристике технологическим процессом.

Современный термин «Мехатроника», был введен фирмой Yaskawa Electric в 1969 году и зарегистрирован как торговая марка в 1972 году. Это наименование получено из двух слов «МЕХАника» и «ЭлекТРОНИКА». Объединение этих понятий в едином словосочетании означает интеграцию знаний в соответствующих областях науки и техники, которая позволила произвести качественный скачок в создании техники новых поколений и производстве новейших видов систем и оборудования [2].

Мехатроника является областью науки, посвященная разбору функционального взаимодействия энергетических и исполнительных состояний мехатронных объектов, механических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов. С другой стороны, мехатроника – это область техники, обеспечивающая полный жизненный цикл мехатронного объекта.

Мехатронный объект синтезируется на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин с интеллектуальным управлением их функциональными состояниями, при котором положительный эффект увеличивается по сравнению с отдельным исполнением тех же компонентов.

Такая много профильность небезосновательна, поскольку мехатронные системы интегрируют механические, электромеханические, электронные и компьютерные компоненты в единую систему автоматического управления.

Задачей мехатронной системы является преобразование входной информации, начинающейся с верхнего уровня управления, в целенаправленное механическое движение с управлением на основе принципа обратной связи.

Обычно мехатронная система является союзом собственно электромеханических компонентов с силовой электроникой, которые управляются с помощью различных персональных компьютеров, микроконтроллеров или других электронных вычислительных устройств. При этом система в истинно мехатронном подходе, несмотря на использование стандартных компонентов, строится как можно более монолитно, конструкторы стараются объединить все части системы воедино без использования лишних интерфейсов между модулями. Любая система, управляющая группой приводов, может считаться мехатронной.

Главным признаком мехатронной системы это именно то, что она является электромеханической системой и ее задача является преобразование электрической энергии в механическую и управление движением рабочего органа (исполнительного механизма) в соответствии с технологическим процессом.

Наиболее сильным примером мехатронных устройств являются роботы и манипуляторы, нашедшие благодаря гибкости и приспособляемости к технологическим процессам, обширное применение в сварочном, лакокрасочном производстве, в выполнении пайке электронных плат, сборочных операций, выборке и комплектации изделий, прокладке труб, укладке текстиля, лазерной, ножевой и шлифовании, водной порезке материала, космических исследованиях, исследовании морского дна, складировании и др.

Объемы мирового производства мехатронных устройств ежегодно увеличиваются, охватывая все новые сферы.

Мехатронные модули находят широкое применение в промышленных роботах.

1.2 Промышленный робот, как совокупность мехатронных модулей, в технологическом оборудовании.

Впервые промышленные роботы работали, как человек-оператор в режиме обучения с помощью ручки координат задавал последовательность точек, через которые должна была пройти рука за один рабочий цикл. В это время робот запоминал координаты этих точек и мог автоматически с большой точностью перемещаться от одной точки к другой в заданной последовательности, т.е. мог воспроизводить полный рабочий цикл необходимое число раз. Таким образом были конкретизированы и практически реализованы принципы управления программируемыми устройствами для передачи детали [3].

Промышленные роботы предназначены в основном для автоматизации всех видов ручных и транспортных операций в различных отраслях промышленности. Наибольшее применение они нашли в машиностроении и приборостроении, в горнодобывающей, нефтехимической, металлургической и атомной промышленности.

Внедрение промышленных роботов позволило автоматизировать многие производственные операции, которые ранее выполнялись вручную. А также существенное сокращение тяжелого и монотонного труда. Широкое использование промышленных роботов для автоматизации производственных операций дает высокий технико-экономический эффект. По мере совершенствования промышленных роботов, расширения их функции, повышения точности и быстродействия приводит к уменьшению ручного труда и к идеальному изготовлению изделия.

В качестве средств автоматизации промышленные роботы принципиально отличается от всевозможных манипуляторов и автооператоров своей

многофункциональность, гибкостью, точностью и быстродействию, т.е. способностью к быстрому и точному переходу на выполнение новых операций. При высоких требованиях в управлении промышленных роботов по точности и быстродействию проявляются упруго вязкие свойства, которые необходимо учитывать в математическом описании.

Под многофункциональностью понимают универсальность рабочих органов промышленного робота, их движений и возможность их быстрой смены в процессе выполнения операций. Универсальность управления движения рабочих органов позволяет выполнять и такие операции, которые невозможно заранее запрограммировать.

Универсальность промышленного робота позволяет автоматизировать любые операции, выполняемые человеком. Способность к быстрому переходу на выполнение новых операций при освоении новой продукции или изменениях в производстве позволяет сохранить за автоматизируемыми с помощью промышленных роботов технологическими процессами по крайней мере ту же гибкость, которую имеют процессы, обслуживаемые человеком.

1.3 Классификация промышленных роботов, проблемы функционирования

Промышленные роботы классифицируются по способу управления, по направлению, по степени специализации, по характеру осуществляемых операций, по типу привода, по количеству манипуляторов, по грузоподъемности, по точности движений и быстродействию, по способу размещения, по числу степеней подвижности [4].

По способу управления различают:

– роботы с интеллектуальным управлением (с искусственным интеллектом), которые наряду с осязанием имеют систему обработки внешней информации, обеспечивающую им возможность интеллектуального поведе-

ния, подобного поведению человека в аналогичных ситуациях (роботы третьего поколения).

- роботы с программным управлением, работающие по заранее заданной жесткой программе (роботы первого поколения);

- роботы с адаптивным управлением, которые обладают средствами осязания и поэтому могут работать в заранее не регламентированных и меняющихся условиях, например, брать произвольно расположенные предметы, обходить препятствия и т. д. (роботы второго поколения);

Управление движением по некоторым степеням подвижности может быть дискретным (позиционным) и непрерывным (контурным). В последнем случае управление движением выполняют, задавая конечную последовательность точек и последующее перемещение по ним шагами от точки к точке. Простейшим вариантом дискретного управления является цикловое, при котором количество точек позиционирования по каждой степени подвижности минимально и чаще всего ограничено двумя – начальной и конечной координатами.

По назначению промышленные роботы могут быть разделены на несколько групп. Различают роботы для автоматизации процессов машиностроения, нефтяной промышленности и горнодобывающей (обслуживание бурильных установок, монтажные и ремонтные работы), в строительстве (монтажные, отделочные, транспортные работы), металлургии, рыбной промышленности, в легкой, пищевой. В последние годы роботы были внедрены на транспорте (включая создание шагающих транспортных машин), в сельское хозяйство, здравоохранение и в военной отрасли.

Таким образом, по служебному назначению можно выделить прежде всего исполнительные, обслуживающие и транспортные промышленные роботы. Исполнительные промышленные роботы осуществляют основные технологические операции и процессы, обслуживающие промышленные роботы автоматизируют вспомогательные операции, а транспортные промышленные роботы выполняют транспортирование грузов и манипулирование ими.

Промышленные роботы необходимы в экстремальных средах, к которым относятся: токсичные, с высокими и низкими температурами, вакуумные, с повышенным давлением, радиоактивные, химически агрессивные, взрывоопасные.. Действительно, условия функционирования промышленных роботов, выполняющего точные сборочные операции, и промышленные роботы, берущего пробы расплавленного металла, разные. В зависимости от состава рабочей среды меняются и условия функционирования промышленных роботов, а следовательно, и требования к их конструкции.

Служебное назначение промышленных роботов определяет также степень их универсальности. Универсальные промышленные роботы предназначены для работы совместно с различными видами обслуживаемого оборудования. Специализированные промышленные роботы имеют более узкое назначение, обслуживая оборудование определенного вида и выполняя определенный технологический процесс. Специальные промышленные роботы обслуживают только конкретную модель технологического оборудования.

В промышленных роботах используют электрические, гидравлические и пневматические приводы как с вращательным, так и поступательным движением. В состав привода входят источники движения (двигатели), устройства управления ими, муфты, тормоза и различные механизмы для передачи и преобразования движений. Все более широкое применение электромеханических приводов связано с развитием новых типов электрических двигателей, специально предназначенных для роботов.

По грузоподъемности промышленные роботы подразделяют на сверхлегкие, имеющие грузоподъемность до 1 кг, легкие – до 10 кг, средние – до 200 кг, тяжелые – до 1000 кг и сверхтяжелые – свыше 1000 кг. Этот параметр промышленных роботов характеризует наибольшую грузоподъемность его рабочих органов (манипуляторов), которая определяется массой перемещаемых объектов и в зависимости от назначения промышленные роботы может составлять от нескольких граммов в производстве микроэлектронной техники до многих тонн у транспортных промышленных роботов в литейном и

кузнечно-штамповочном производстве, металлургической промышленности. У сверхлегких и легких промышленных роботы наиболее распространены пневматические приводы, что объясняется простотой, надежностью и взрывобезопасностью этих типов приводов. У тяжелых и сверхтяжелых промышленных роботы обладают наилучшими массогабаритными характеристиками гидравлические приводы.

Число манипуляторов у промышленных роботов в большинстве случаев ограничено одним, но в соответствии с назначением промышленных роботов создаются конструкции с двумя, тремя и четырьмя одинаковыми или разными манипуляторами.

Различают переносные и ориентирующие степени подвижности манипулятора. Переносные степени подвижности обеспечивают возможность перемещения объектов манипулирования в пределах рабочей зоны манипулятора, а ориентирующие — возможность их ориентации.

Теоретически минимально необходимое число переносных степеней подвижности для перемещения объектов в любую точку свободной рабочей зоны равно трем. Однако для расширения манипуляционных возможностей и обеспечения требуемых значений кинематических и динамических параметров манипулятора его обычно снабжают избыточными переносными степенями подвижности.

Максимально необходимое число ориентирующих степеней подвижности тоже равно трем. Обычно они реализуются кинематическими парами с угловым перемещением, обеспечивающими поворот рабочего органа манипулятора относительно его продольной и двух других взаимно перпендикулярных осей.

Место размещения приводов манипулятора, чаще всего отдельных для каждой степени подвижности, существенно влияет на его конструкцию. Размещение приводов непосредственно в кинематических звеньях манипулятора делает более простыми кинематические связи, что способствует повышению точности промышленных роботов. Недостатком такой компоновки является

увеличение массы подвижной части манипулятора, что ухудшает динамические характеристики и снижает грузоподъемность промышленных роботов.

Размещение приводов на основании манипулятора приводит к появлению различного вида передаточных механизмов, необходимых для связи приводов с подвижными звеньями. Достоинства и недостатки такой компоновки — противоположные тем, которые характерны для первого варианта. Поэтому в оптимальных конструкциях манипуляторов комбинируют оба варианта размещения приводов для разных степеней подвижности.

Рабочая зона манипулятора — это пространство, в котором находится его рабочий орган при всех возможных положениях звеньев. Форма рабочей зоны зависит от числа степеней подвижности манипулятора и используемой системы координат, в которой осуществляется движение рабочего органа. В промышленных роботах используются прямоугольная, цилиндрическая, сферическая, угловая системы координат и их комбинации. Размер рабочей зоны обусловлен диапазоном поступательных и угловых перемещений звеньев манипулятора по отдельным степеням подвижности.

Манипуляторы, работающие в прямоугольной системе координат, имеют рабочую зону в виде параллелепипеда. Такая система координат удобна при выполнении прямолинейных движений.

В манипуляторах, использующих цилиндрическую систему координат, наряду с поступательными перемещениями производится одно угловое (круговое) перемещение. Соответственно, рабочая зона имеет форму цилиндра. В случае сферической системы координат осуществляются два угловых перемещения наряду с поступательными и рабочая зона имеет форму шара.

Манипуляторы с угловой системой координат обладают только угловым перемещением. Все их звенья представляют собой шарниры, поэтому их называют шарнирными и антропоморфными. Промышленные роботы с такого типа манипуляторами обладают наибольшей компактностью, хотя и сложны в управлении. Тип и параметры рабочих зон манипуляторов промышленных роботов определяют область окружающего пространства, в пределах ко-

торой робот может осуществлять при неподвижном основании манипулирование объектами.

По способу размещения стационарные и подвижные промышленных роботов могут быть напольными, подвесными и встраиваемыми в основное технологическое оборудование.

Системы управления промышленных роботов реализуют алгоритмы управления по программе манипуляторами и устройствами передвижения, перепрограммирование, хранение информации о задаваемых параметрах движений и выполняемых функциях, а также синхронизацию действий промышленного робота с работой обслуживаемого оборудования. В режиме обучения составление и ввод управляющей программы осуществляют в ходе предварительного пошагового выполнения программы с участием человека. При этом система управления запоминает параметры текущих положений звеньев манипуляторов и выполняемых команд. В режиме самообучения формирование параметров движения осуществляется при наличии заданной цели автоматически путем анализа внешней среды. При аналитическом программировании промышленные роботы управляющую программу составляют расчетным путем и затем вводят в систему управления. Управление движением по отдельным степеням подвижности может быть цикловым, позиционным и контурным [5].

Большинство применяемых систем управления промышленные роботы функционируют с априорно заданными программами, т. е. с неизменяемыми в процессе отработки каждой программы последовательностью и набором команд. Промышленные роботы с адаптивным управлением осуществляют свои функции, имея возможность автоматического изменения заданной программы в зависимости от контролируемых параметров состояния внешней среды. Интеллектуальные промышленные роботы способны самостоятельно формировать программу действий на основе поставленной цели с учетом всех имеющихся информационных потоков.

В процессе работы технологического процесса изменяются параметры входящие в математическое описание промышленных роботов в частности момент инерции.

1.4 Конструктивное исполнение промышленных роботов, как совокупности мехатронных модулей

Для перемещения тела в пространстве и для его произвольной ориентации исполнительный механизм должен иметь не менее шести степеней подвижности: три – для осуществления транспортных движений и три – для ориентирующих движений. Промышленный робот обладает шесть основных степеней подвижности $X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma$ (рисунок 1).

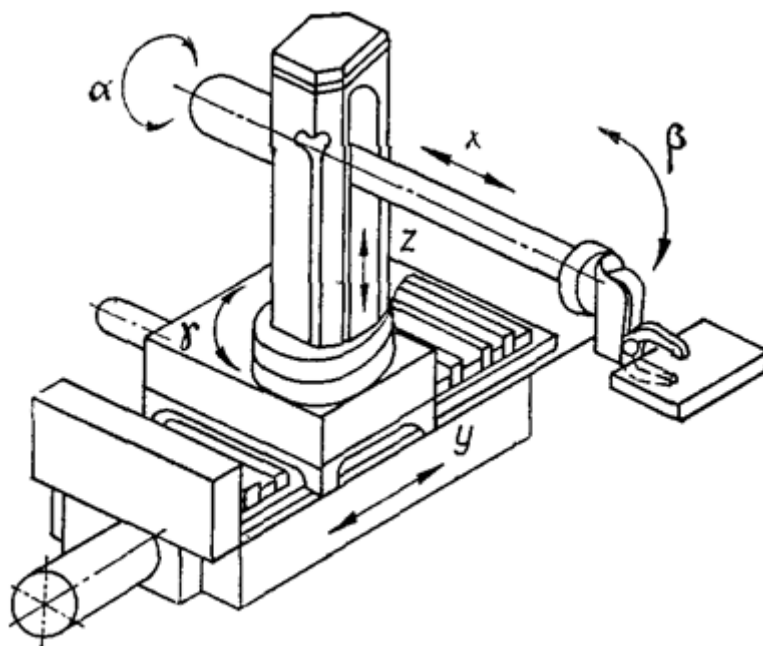


Рисунок 1 – Промышленный робот с основными степенями подвижности

Кинематическая структура промышленных роботов и их двигательные потенциалы определяются видом и последовательностью расположения кинематических пар. В свою очередь, требуемый характер движения рабочих органов промышленных роботов при выполнении вспомогательных и техно-

логических операций и переходов обуславливается производственными условиями [6].

Как транспортные, так и ориентирующие движения должны выполняться с высокой точностью совокупного участия всех звеньев кинематической структуры промышленных роботов. Потому при создании копирующих физические функции руки роботов доводится учитывать не только наличие звеньев, обеспечивающих совокупность движений, но также вид и последовательность их расположения в структуре.

Промышленный робот включает в себе несколько мехатронных модулей, которые необходимы для совершения операций в технологическом процессе.

В зависимости от используемых видов кинематических пар (рисунок 2) в структуре промышленных роботов создаются поступательные, вращательные и комбинированные группы движений.

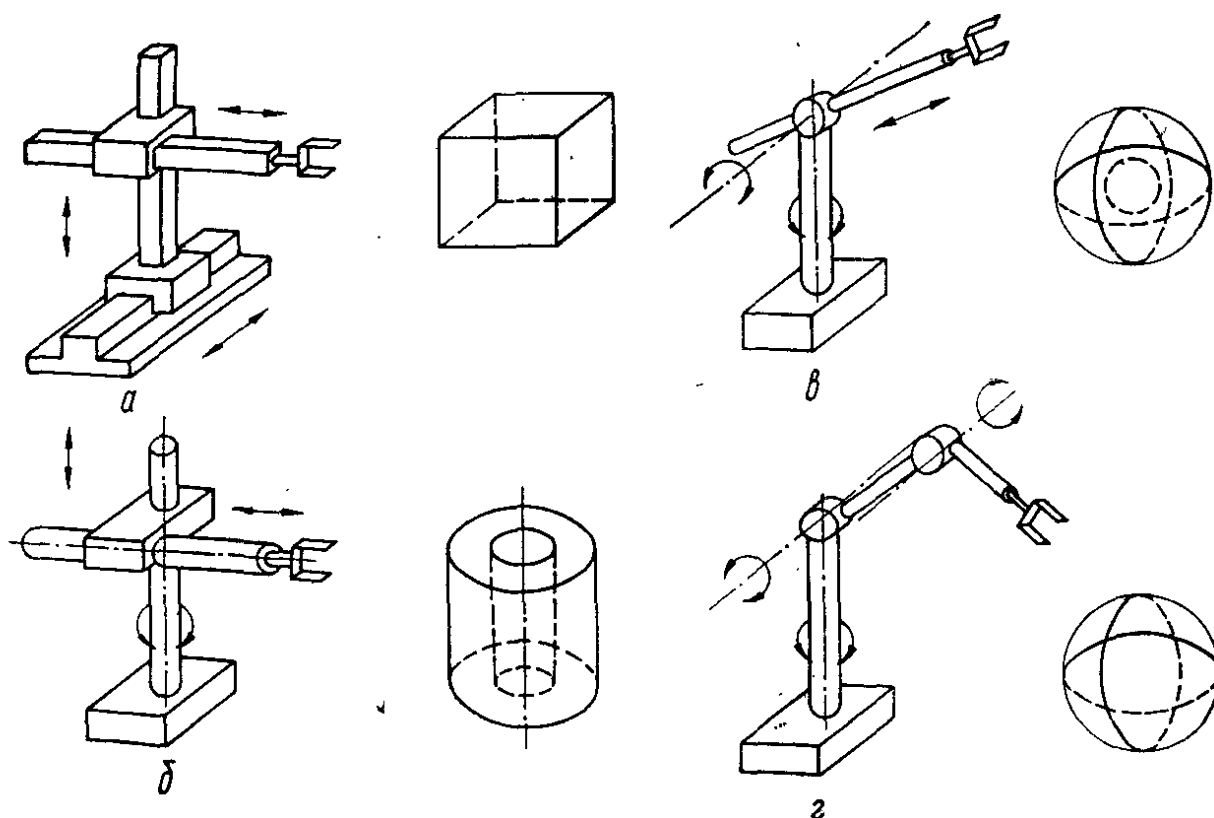


Рисунок 2 – Рабочие сочетания кинематических пар в промышленных роботах в прямоугольной (а), цилиндрической (б) и сферической (в, г) системах координат

Каждый вариант кинематической структуры в соответствующей системе координат иллюстрируется конфигурацией рабочей зоны, обслуживаемой промышленными роботами. В пределах этого пространства рука робота может вывести захватное устройство в любую точку. Возникающие при этом ограничения угловых и линейных перемещений в парах, вызванные особенностями конструктивного оформления промышленных роботов, обуславливают запретные зоны, в которые захватное устройство не может быть введено.

Геометрия рабочих зон для промышленных роботов, работающих в прямоугольной цилиндрической и сферической системах координат изображена на рисунке 3.

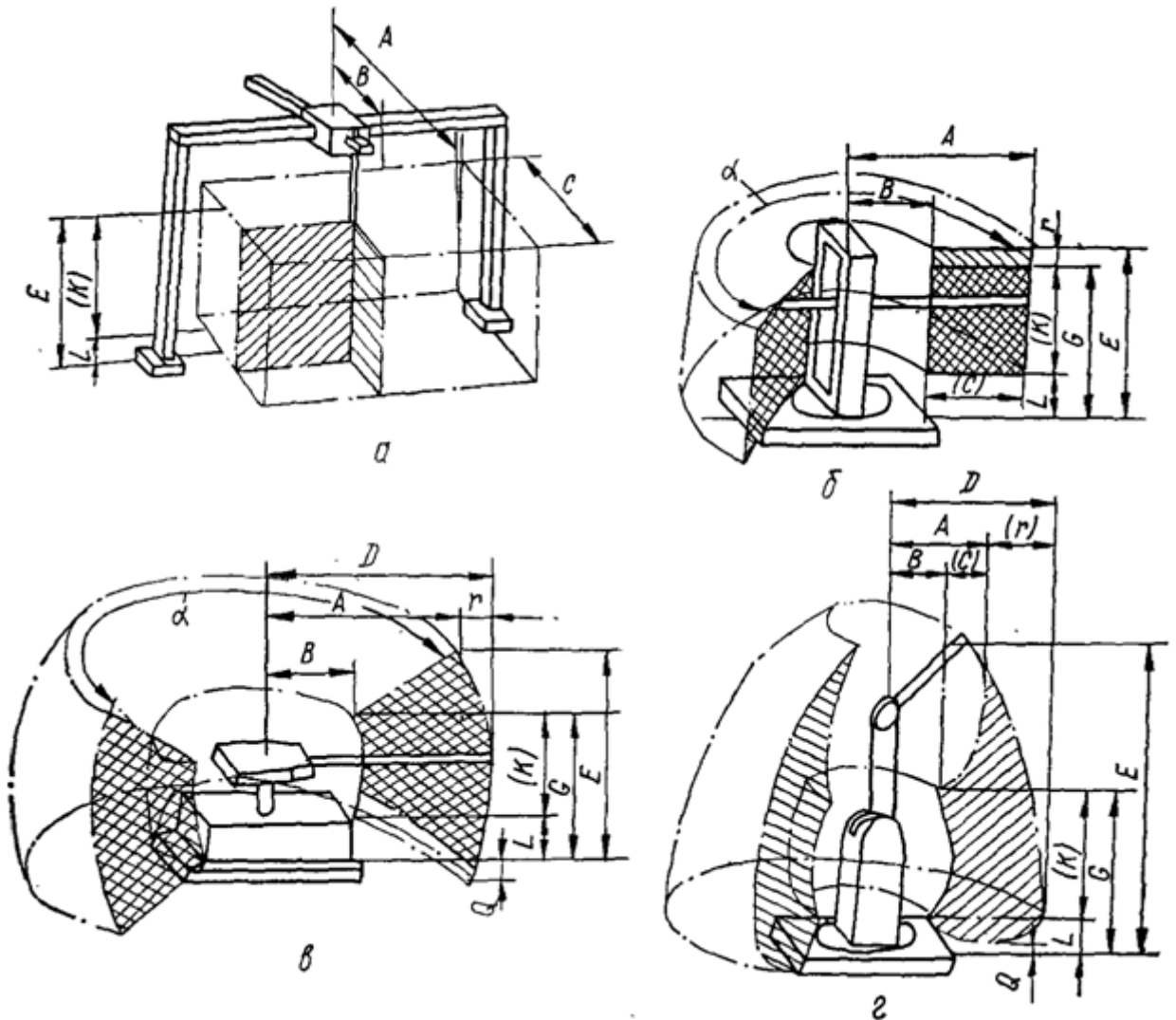


Рисунок 3 – Геометрия рабочих зон для ПР в прямоугольной (а), цилиндрической (б) и сферической (в, г) системах координат

Геометрические параметры, число степеней подвижности и способ установки на рабочем месте являются исходными данными при разработке компоновочных схем и планировок робототехнических комплексов. В целом рабочая зона характеризуется следующими геометрическими параметрами: L, G – крайние нижнее и верхнее положения руки; А – положение максимально выдвинутой руки; В – исходное положение руки; С, К – ход (вылет) и подъем руки; Е, Q – крайние верхнее и нижнее положения захватывающего устройства; r – радиус качания захватывающего устройства; α – максимальный угол поворота (ротации) руки (колонны).

Конфигурации рабочих зон промышленных роботов могут быть самыми разнообразными и определяться как сочетанием пар пятого класса, так и последовательностью их расположения.

2 Характеристика электромеханической системы, как объекта управления

2.1 Электромеханическая система и ее основные блоки

Электромеханической системой (ЭМС) содержащее: управляемый электрический преобразователь (УЭП), электромеханический преобразователь (ЭМП), передаточный механизм (ПМ), рабочий механизм (РМ) и устройство управления (УУ). Структурная схема системы представлена в следующем виде (рисунок 4).

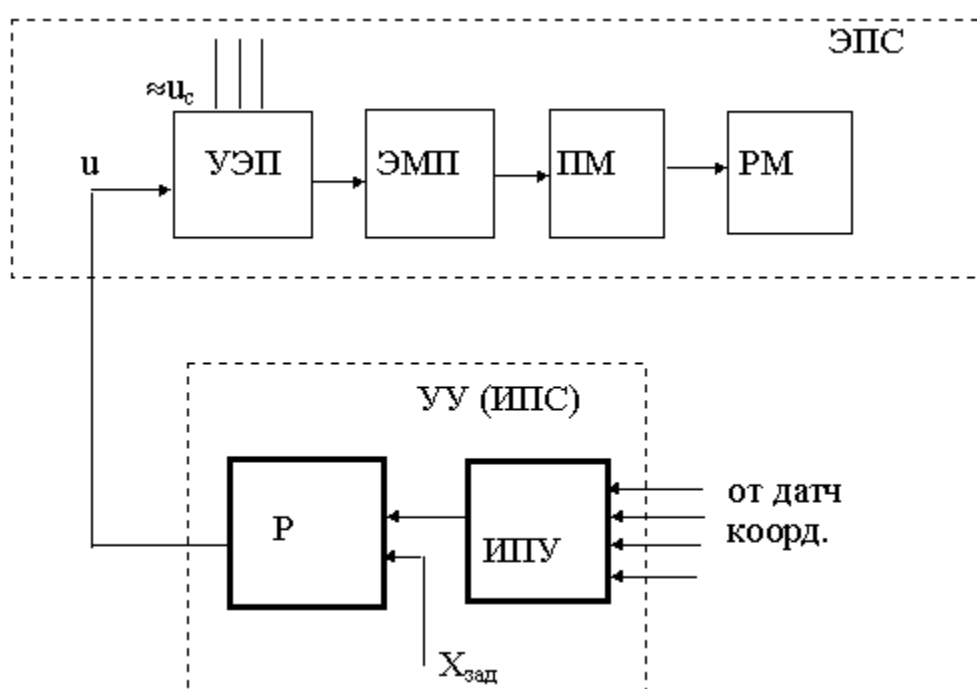


Рисунок 4 – Структурная схема электромеханической системы

Электромеханический преобразователь (электрический двигатель) преобразует электрическую энергию на выходе электрического преобразователя в механическую энергию на своем валу.

Эта энергия через передаточный механизм, содержащий механические передачи и соединительные муфты, передается рабочему механизму. В ряде случаев передаточный механизм может отсутствовать (в без редукторных системах) или входить конструктивно в состав рабочего механизма.

Управляемый электрический преобразователь предназначен для управления потоком электрической энергии, поступающей из сети с целью регулирования режимов работы. Управляющим воздействием является электрический сигнал U_y [7].

Управляющее устройство в электромеханической системой представляет собой информационную слаботочную часть системы, предназначенную для обработки информации о задающих воздействиях и координатах состояния системы и выработки на ее основе сигнала управления преобразовательным устройством U_y с целью обеспечения желаемого характера изменения координат системы. В состав устройства управления входят измерительно-преобразовательные устройства (ИПУ) и регулятор (Р). Выходные переменные силовой части системы и механизма измеряются и преобразуются в пропорциональные им электрические сигналы с помощью измерительно-преобразовательного устройства. В его состав могут входить тахогенераторы, измерители положения, напряжения, тока, аналого-цифровой преобразователь и цифро-аналоговый преобразователь и т.п.

Основные узлы энергетической подсистемы: управляемый преобразователь электрической энергии (УЭП), электромеханический преобразователь (ЭМП), передаточное устройство (ПУ) и рабочий механизм образуют энергетическую подсистему (ЭПС).

Информационную подсистему (ИПС) образуют устройства управления, а в ряде случаев и устройства диагностирования (УД) и защиты (УЗ). Взаимосвязь информационных и энергетических подсистем обычно осуществляется по принципу обратной связи.

Наличие в электромеханической системой обратных связей приводит к необходимости описания и анализа электромеханической системой как многоконтурной и многосвязной системы. Указанное обстоятельство, а также то, что электромеханическая система являются автоматическими системами, работающими в режимах с непрерывным и дискретным управлением, застав-

ляют при разработке математических моделей и методик анализа и синтеза ЭМС использовать методологию теории автоматического управления.

2.2 Электромеханические объекты с упругими связями

В реальности все элементы механической системы электропривода обладают упругими свойствами, что в отдельных случаях определяет принципиальное различие их движения от движения механической системы с жесткими связями. При резком изменении момента сопротивления движению на валу рабочей машины из-за упругости соединительного вала не будет мгновенного изменения момента сопротивления движению на конце гибкого вала, связанного с двигателем, так же при передаче меняющегося момента сопротивления движению от рабочей машины к двигателю имеется некоторое запаздывание, величина которого зависит от упругости соединительного вала.

При анализе динамических нагрузок тяговых и подъемных лебедок, механизмов передвижения и поворота механические связи между движущимися массами системы предполагались абсолютно жесткими. Из курса теории электропривода известно, что представление механической части электропривода жестким приведенным звеном отражает действительный характер движения масс в системе только в среднем, так как не учитывает влияния упругости реальных механических связей. Из-за конечной жесткости этих связей механическая часть электропривода представляет собой упругую систему, приложение к которой возмущающих (нагрузки) или управляющего (момент двигателя) воздействий вызывает колебания связанных масс, увеличивающие максимальные нагрузки связей и осложняющие точность отработки требуемых траекторий движения рабочего органа промышленного робота.

Более детальный анализ кинематических схем типовых общепромышленных механизмов циклического действия показывает, что их характерной особенностью является, с одной стороны, повышенная податливость механических связей, а с другой — наличие рабочих режимов, динамику которых

без учета упругих связей анализировать невозможно. Повышенная податливость ряда механизмов обусловлена наличием упругости канатов, связывающих рабочий орган с приводом, удлинённых по конструктивным соображениям валов, особенно в случаях, когда двигатель удален от механизма и передача крутящего момента к конечному элементу кинематической цепи осуществляется длинным жестким или гибким валом. Последние характерны для электроприводов манипуляторов промышленных роботов [9].

Простейший учет упругих деформации в электромеханической системе учитывается при представлении механической части в виде двухмассового объекта (рисунок 5). Учет деформаций при разработке системы обеспечивает повышение эффективности функционирования мехатронных промышленных комплексов, повышении быстродействия и точности промышленных роботов, а так же занимают одно из передовых мест по числу применений для высокотехнологичных и прецизионных установок в промышленности [8].

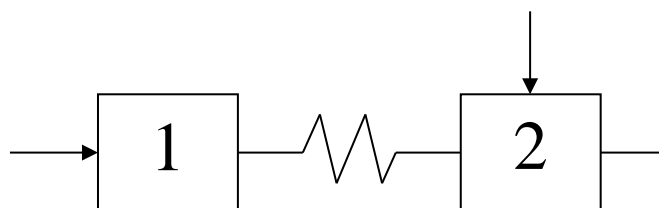


Рисунок 5 – Двухмассовая модель

3 Синтез системы управления двухмассовым объектом на принципах модального управления с многоструктурным наблюдателем

3.1 Синтез модального регулятора

3.1.1 Определение векторно-матричного описания

Наиболее просто упругие свойства электромеханической системы двигатель-механизм при общепринятых допущениях учитываются с помощью эквивалентной двух массовой модели (рисунок 5). С замкнутым токовым контуром в соответствии с [11, 12] ее линеаризованная нормированная структурная схема с замкнутым контуром тока имеет вид, как показано на рисунке 6.

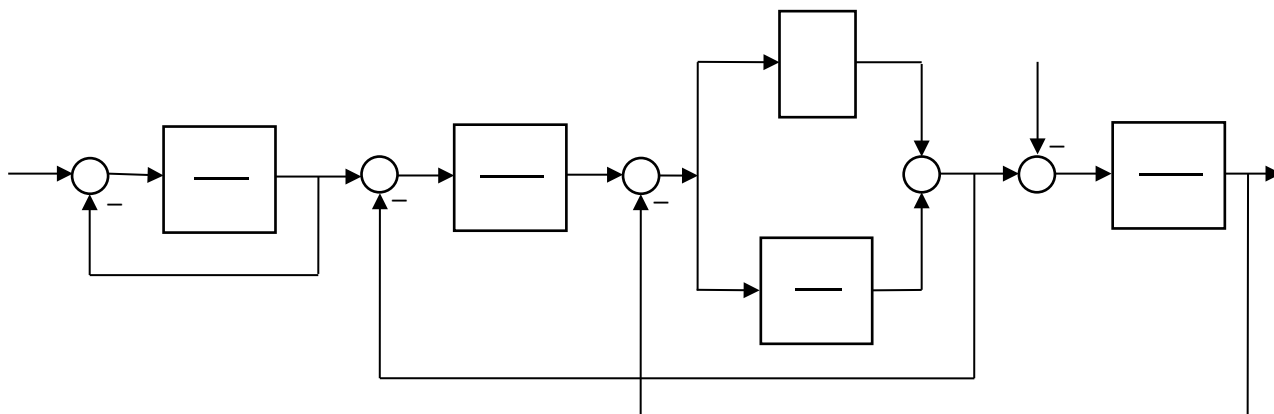


Рисунок 6 – Структурная схема двухмассового упругого объекта

Согласно структурной схеме обозначено:

где

В соответствии с введенным обозначением координат:

где

Переходные процессы всех координат данного объекта (рисунок 7-10)

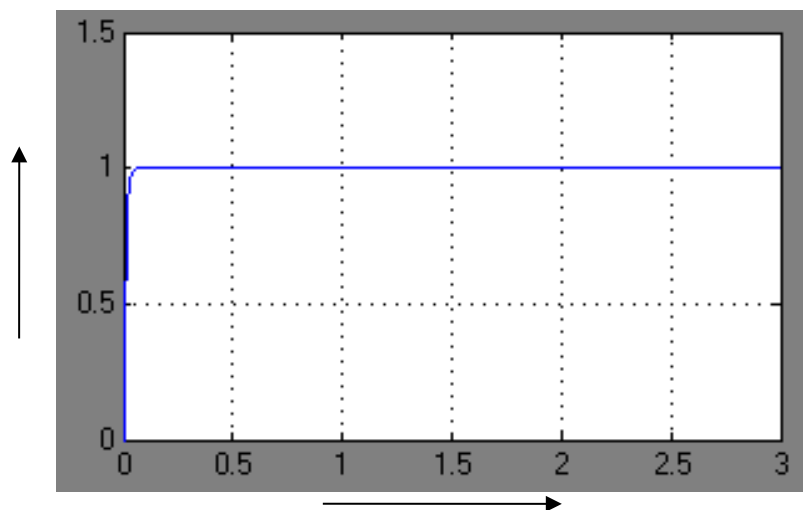
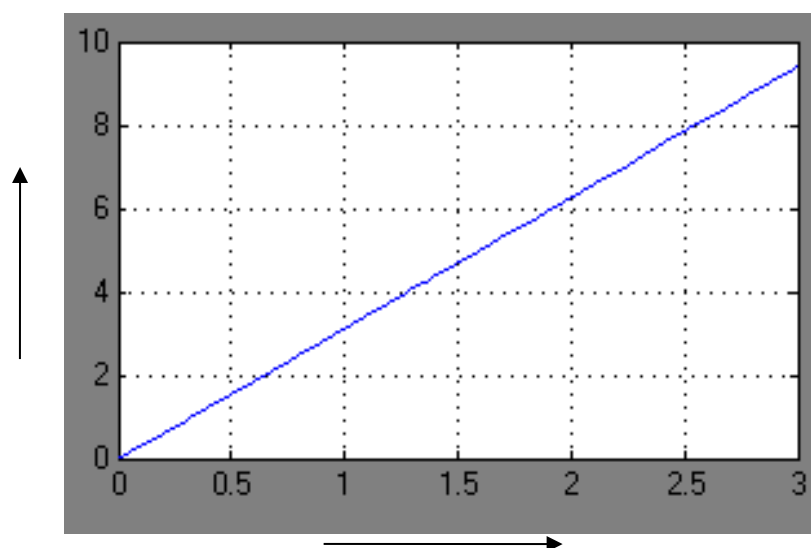


Рисунок 7 – Переходный процесс исходной системы координаты



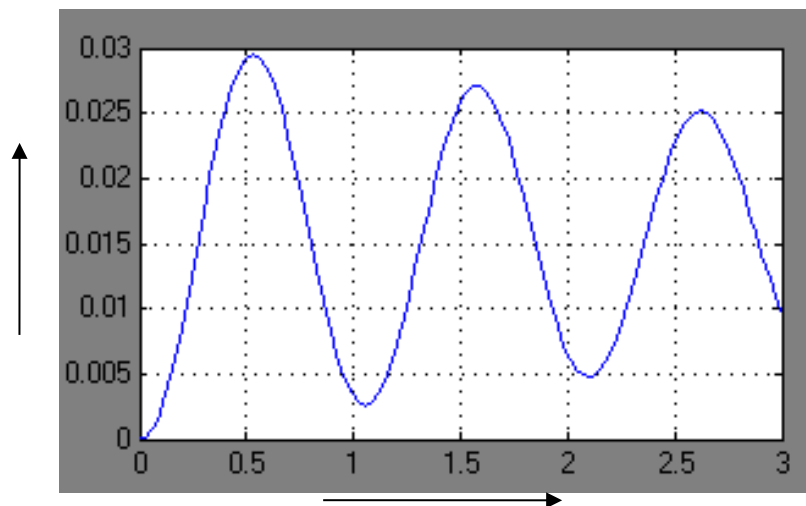
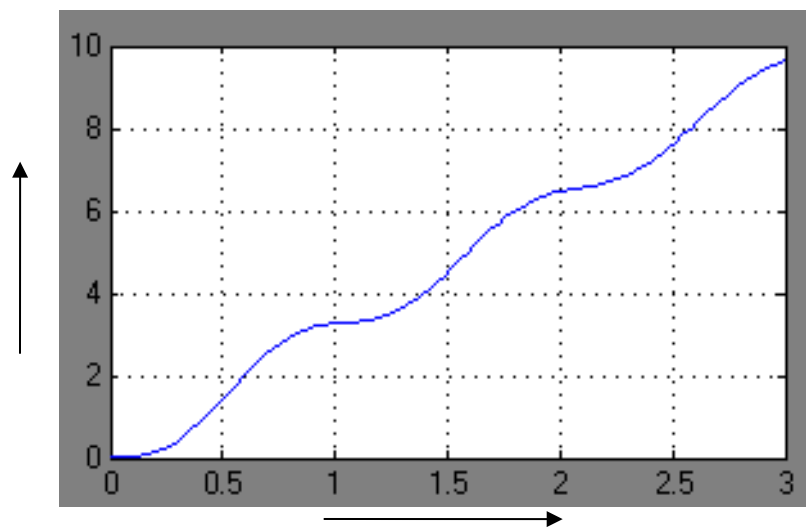


Рисунок 9 – Переходный процесс исходной системы координаты



3.1.2 Проверка условия полной управляемости объекта

Если система выполняет условия полной управляемости объекта, то это означает существование входного сигнала переводящего систему из любого начального состояния в любое наперед заданное состояние [13].

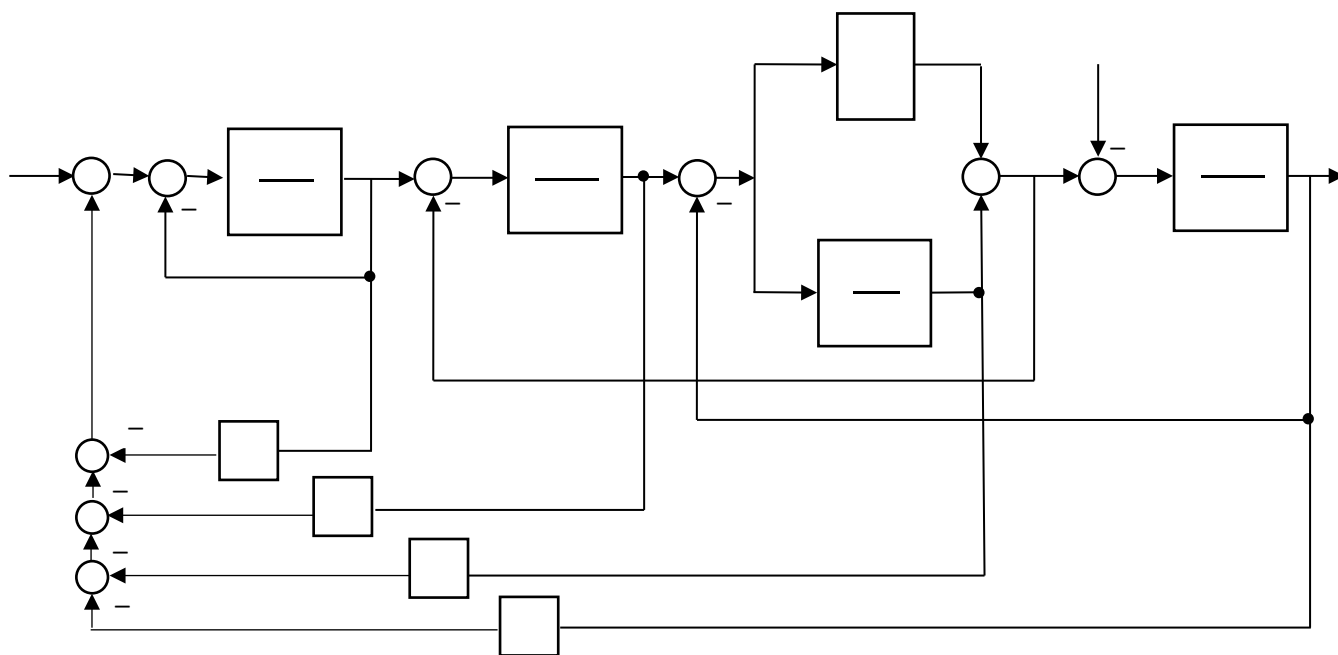


Рисунок 11 – Структурная схема системы с модальным регулятором

В настоящее время в теории управления разработаны стандартные характеристики уравнения (стандартные формы) соответствующие стандартным переходным характеристикам. Наиболее часто используемая стандартная форма Биномиальная и Баттерворта [16].

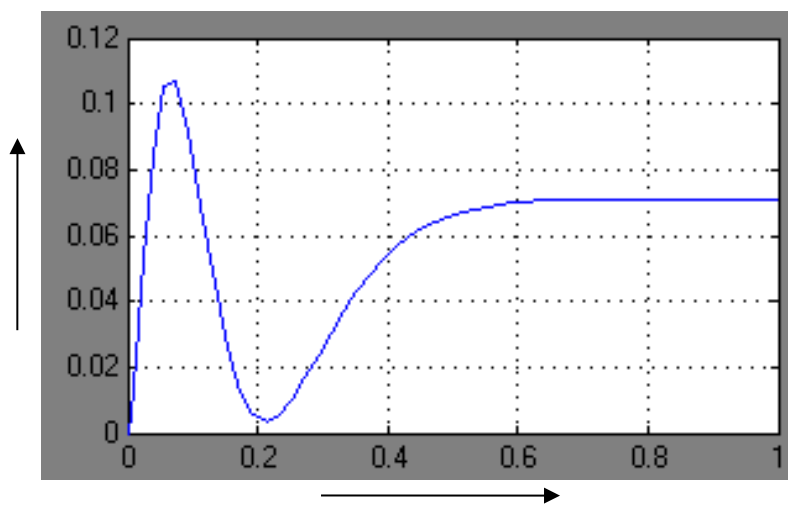
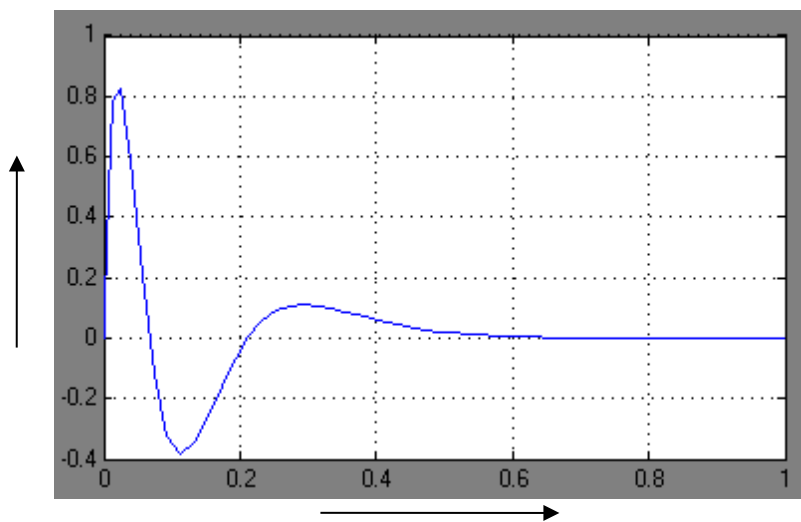
В данном случае будем использовать стандартную Биномиальную форму.

Стандартная Биномиальная форма:

Определим характеристическую матрицу системы:

Найдем коэффициенты регулятора f_1, f_2, f_3, f_4 :

Переходные процессы всех координат данного объекта с модальным регулятором при разных



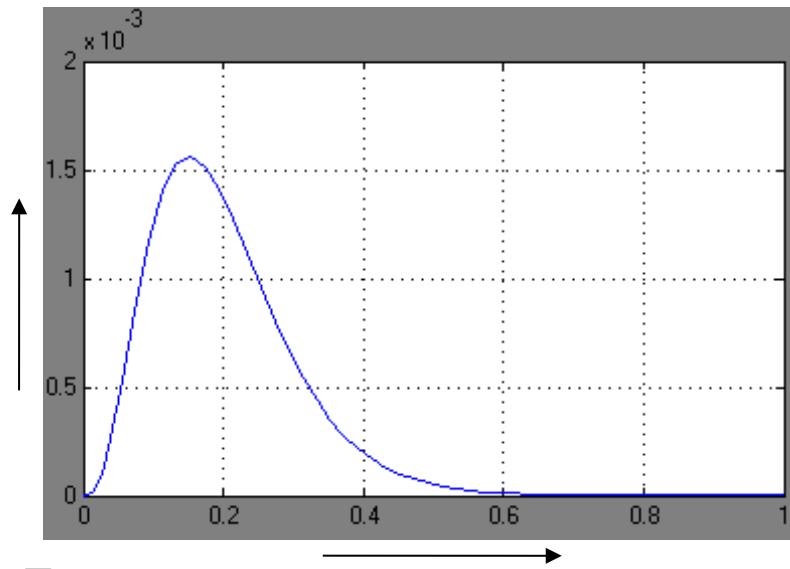
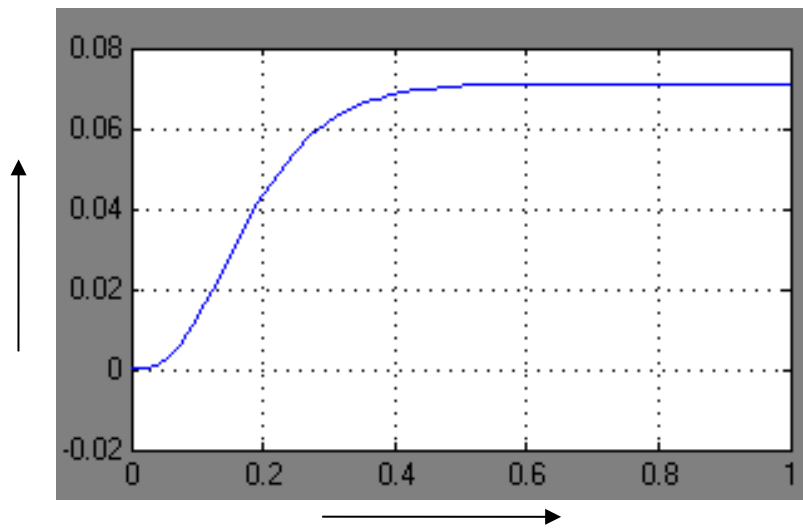
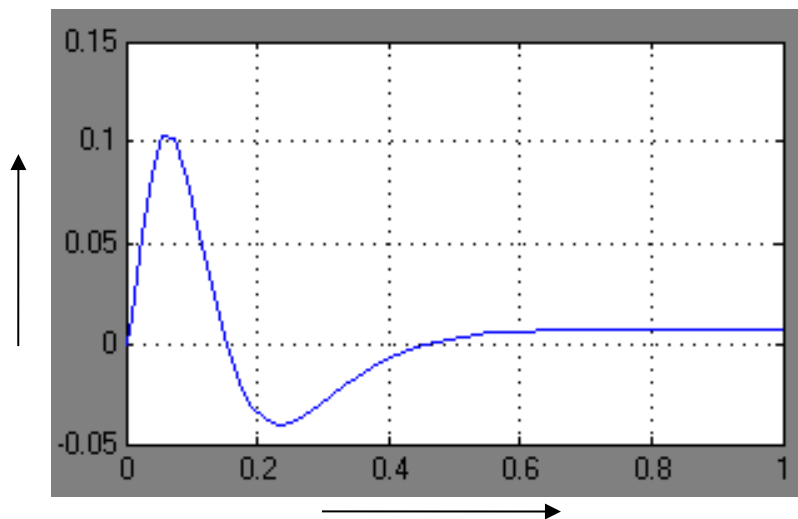
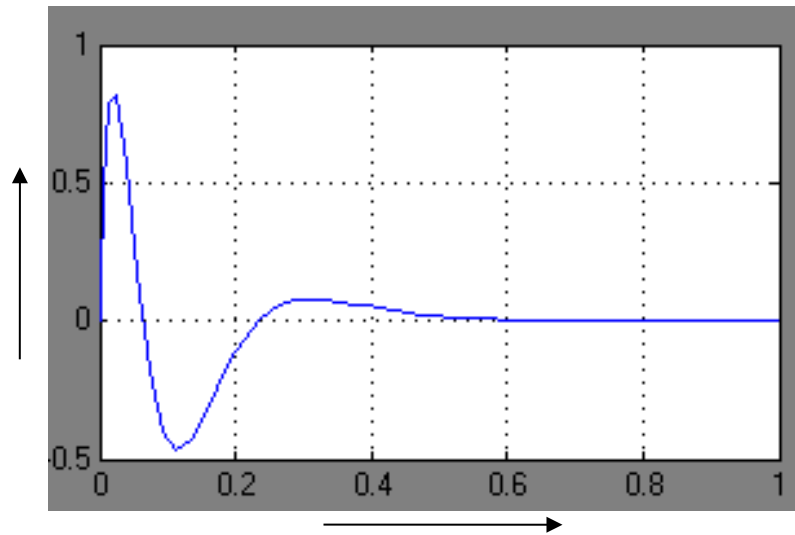


Рисунок 14 – Переходный процесс системы с модальным регулятором координаты



б) При



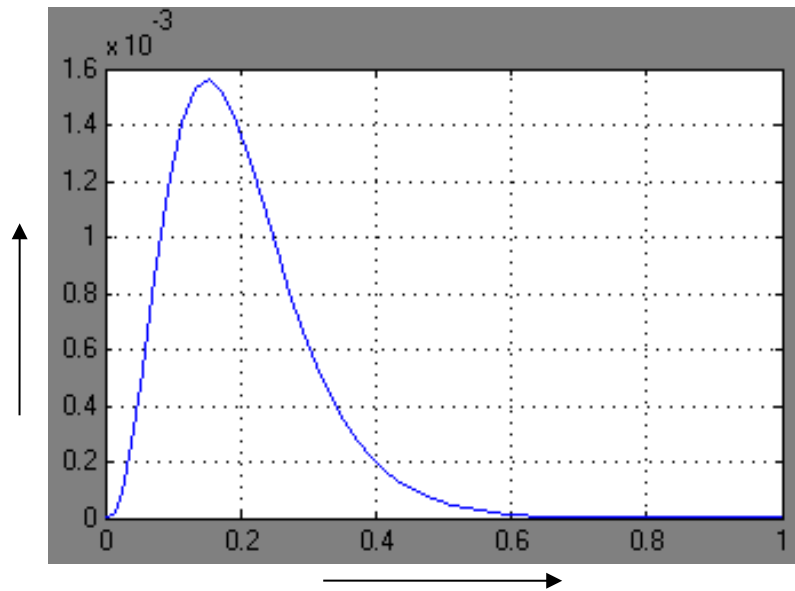
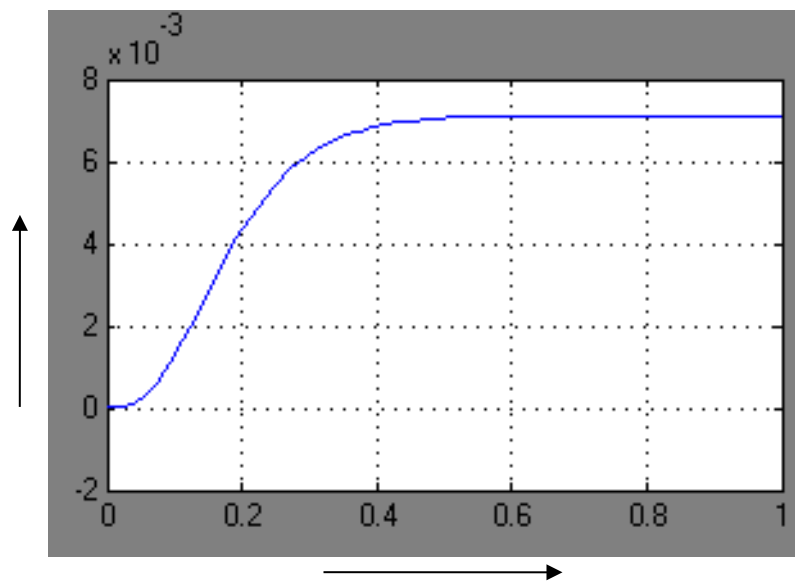
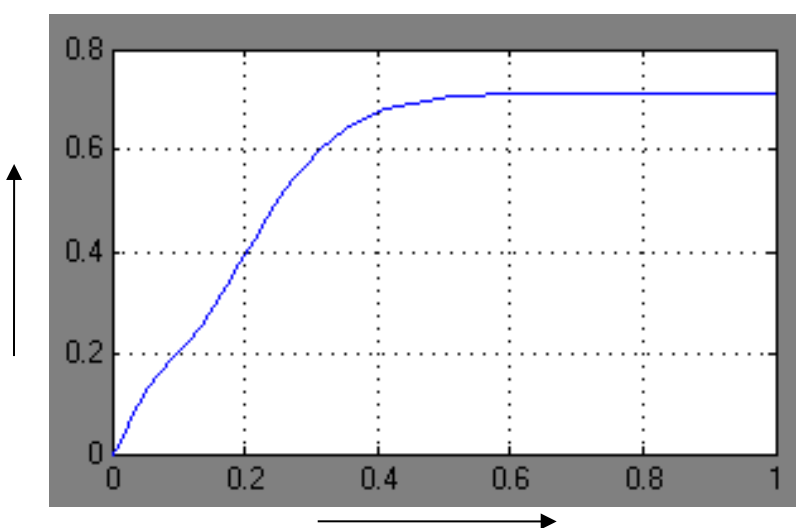
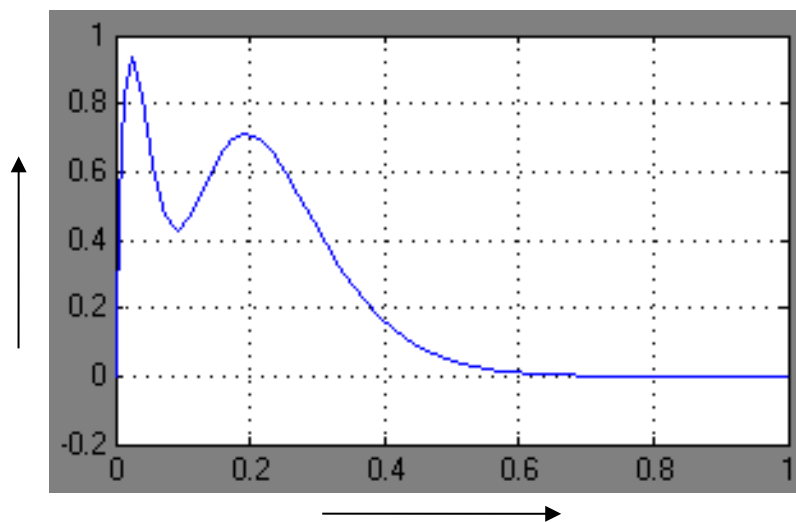


Рисунок 18 – Переходный процесс системы с модальным регулятором координаты



с) При



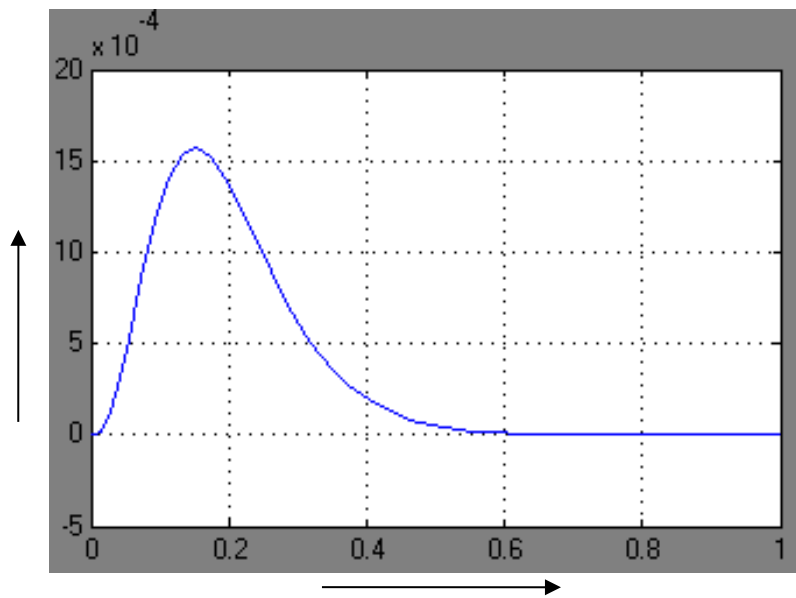
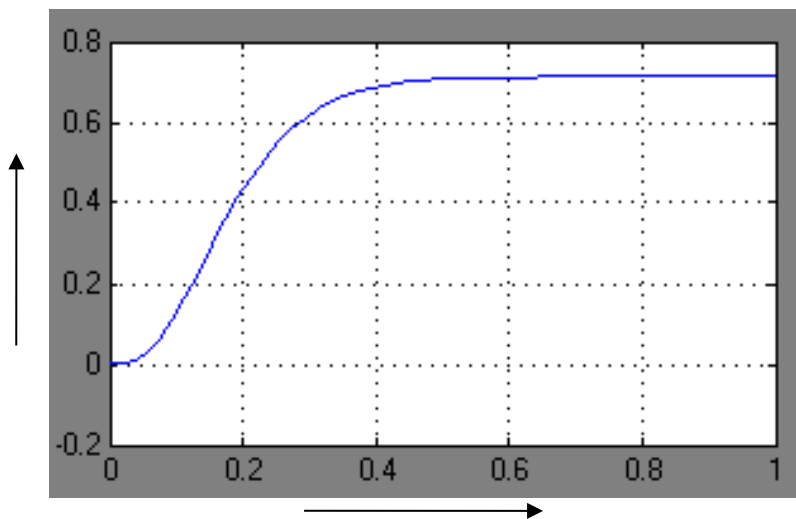


Рисунок 22 – Переходный процесс системы с модальным регулятором координаты



3.2 Расчет коэффициента прямой связи по возмущающему воздействию

Расчет коэффициента прямой связи по возмущающему воздействию введенного с целью уменьшения влияния возмущения на выходную переменную в установившемся режиме. Получаем в итоге систему с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом (рисунок 24).

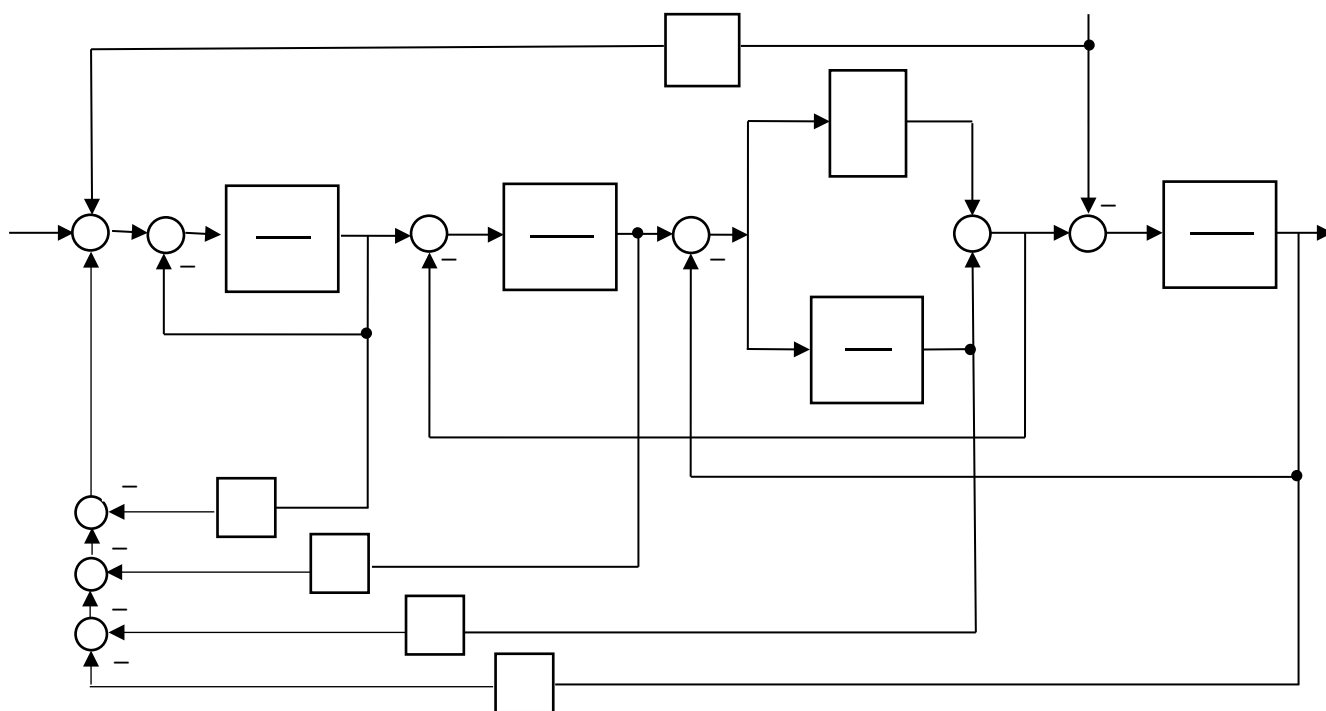
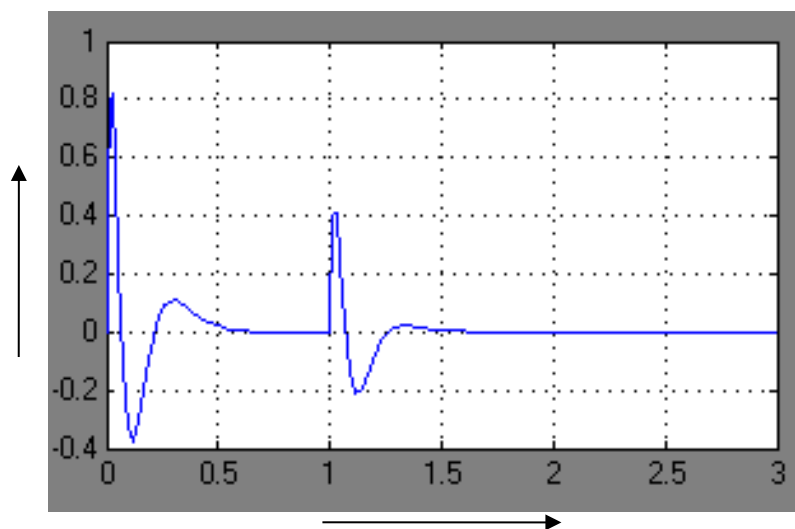


Рисунок 24 – Структурная схема системы с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом

Передаточная функция по возмущающему воздействию имеет вид:

Подставим значение в уравнение и присвоим



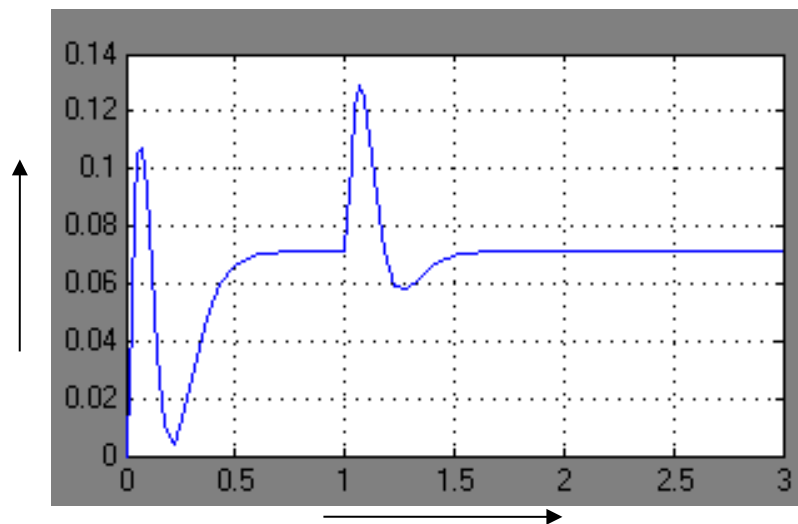
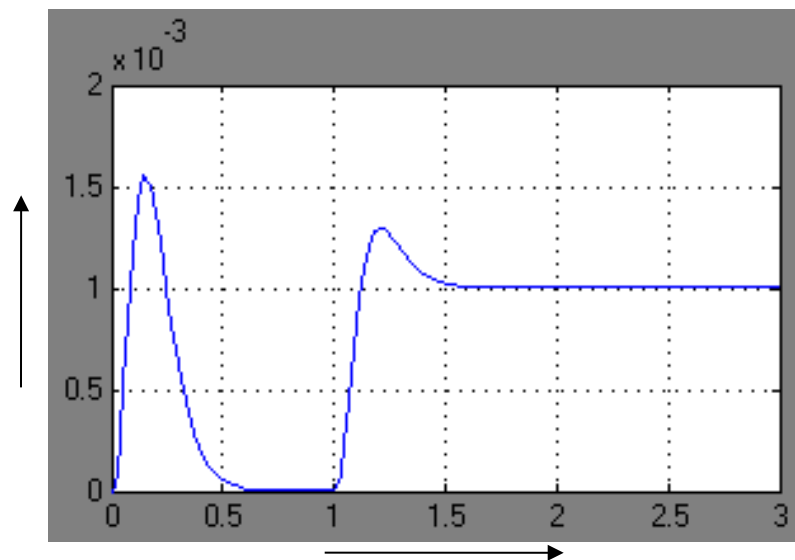


Рисунок 26 – Переходный процесс системы с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом координаты



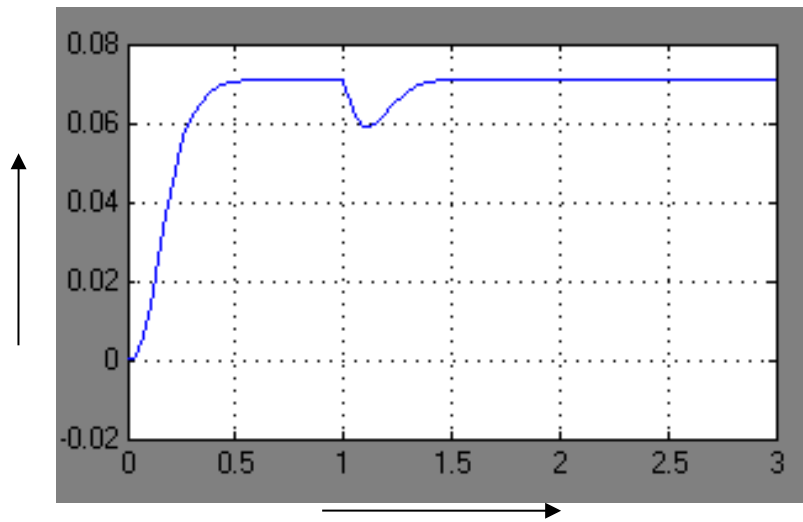
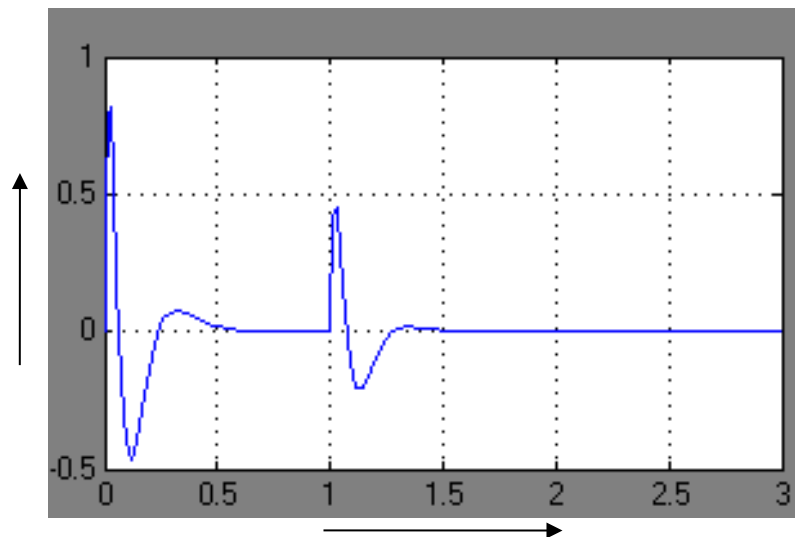


Рисунок 28 – Переходный процесс системы с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом координаты



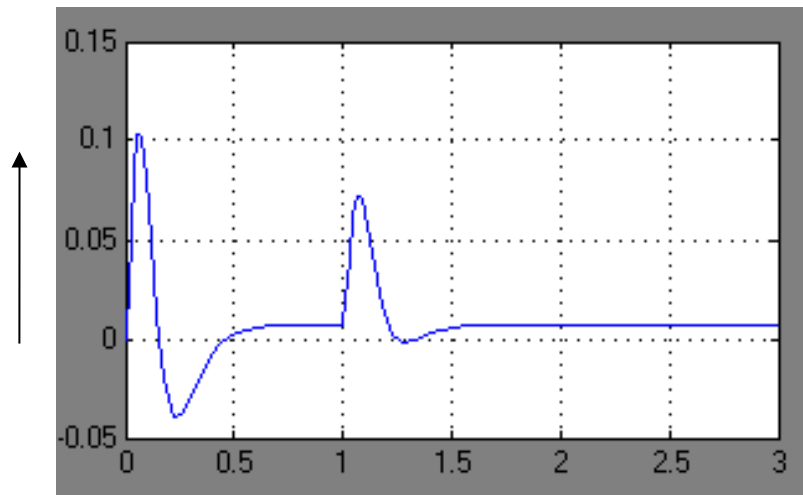
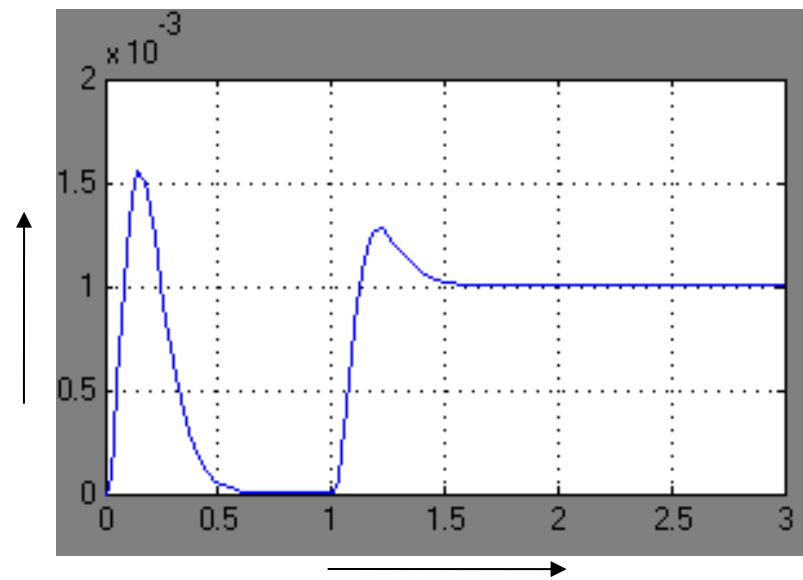


Рисунок 30 – Переходный процесс системы с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом координаты



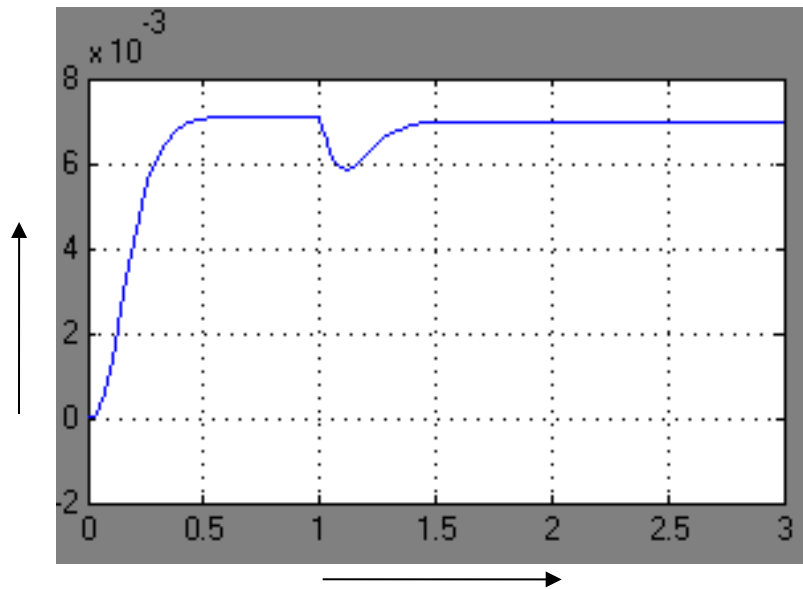
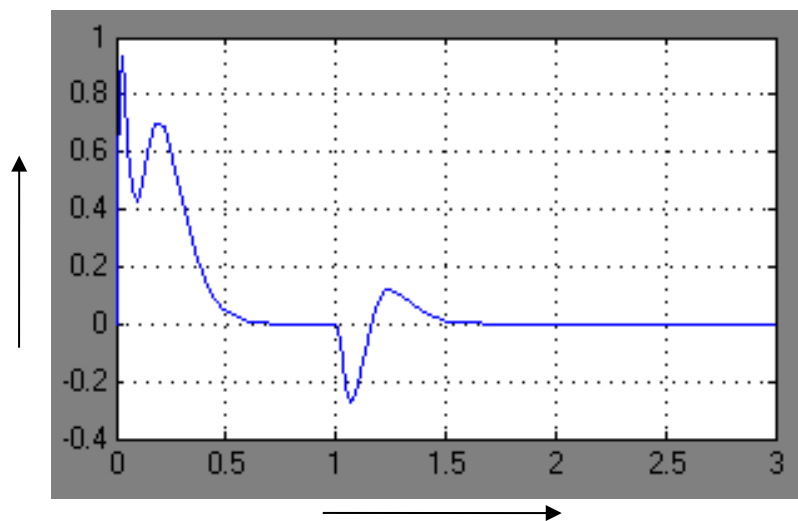


Рисунок 32 – Переходный процесс системы с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом координаты



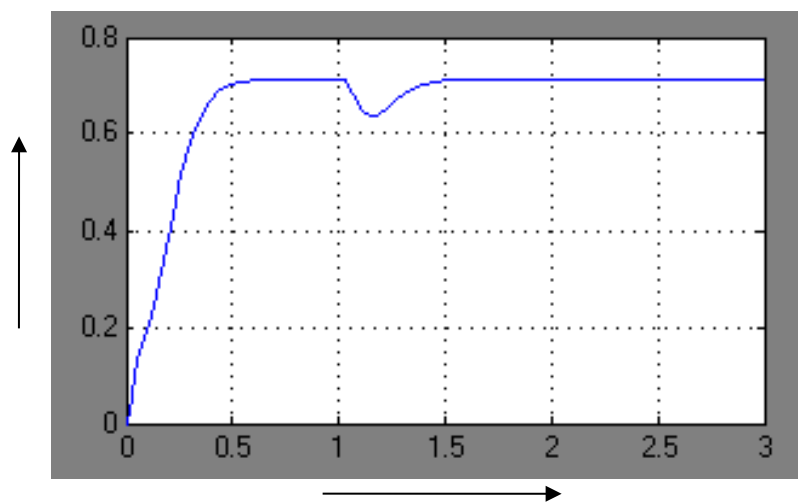
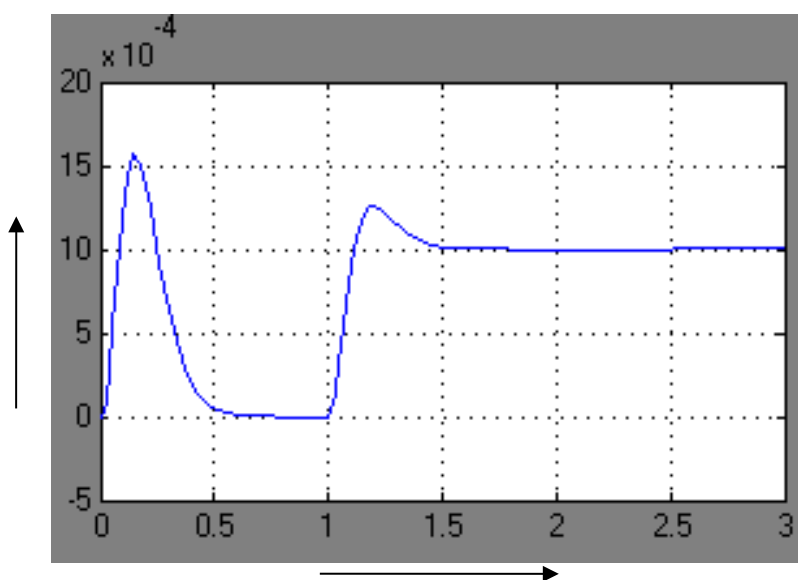


Рисунок 34 – Переходный процесс системы с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом координаты



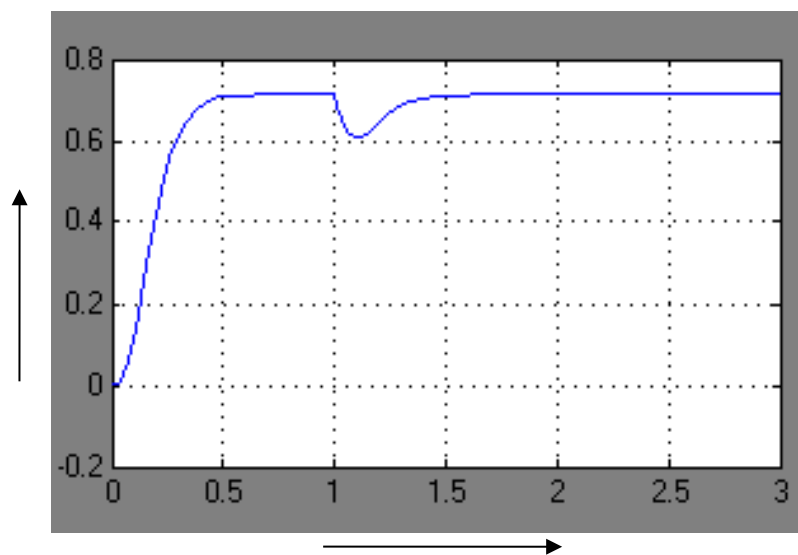


Рисунок 36 – Переходный процесс системы с модальным регулятором и компенсационным коэффициентом координаты

Оценку состояния объекта, т.е. синтез наблюдающего устройства можно произвести только тогда, когда объект полностью наблюдаем для этого необходимо, чтобы ранг матрицы наблюдаемости был равен порядку объекта. Если это условие не выполняется, то объект не наблюдаем полностью, но может быть наблюдаем частично.

Условие полной наблюдаемости:

емые координаты $x_1(t)$, $x_2(t)$. Составим структурная схема системы «объект-наблюдатель-регулятор» (рисунок 37).

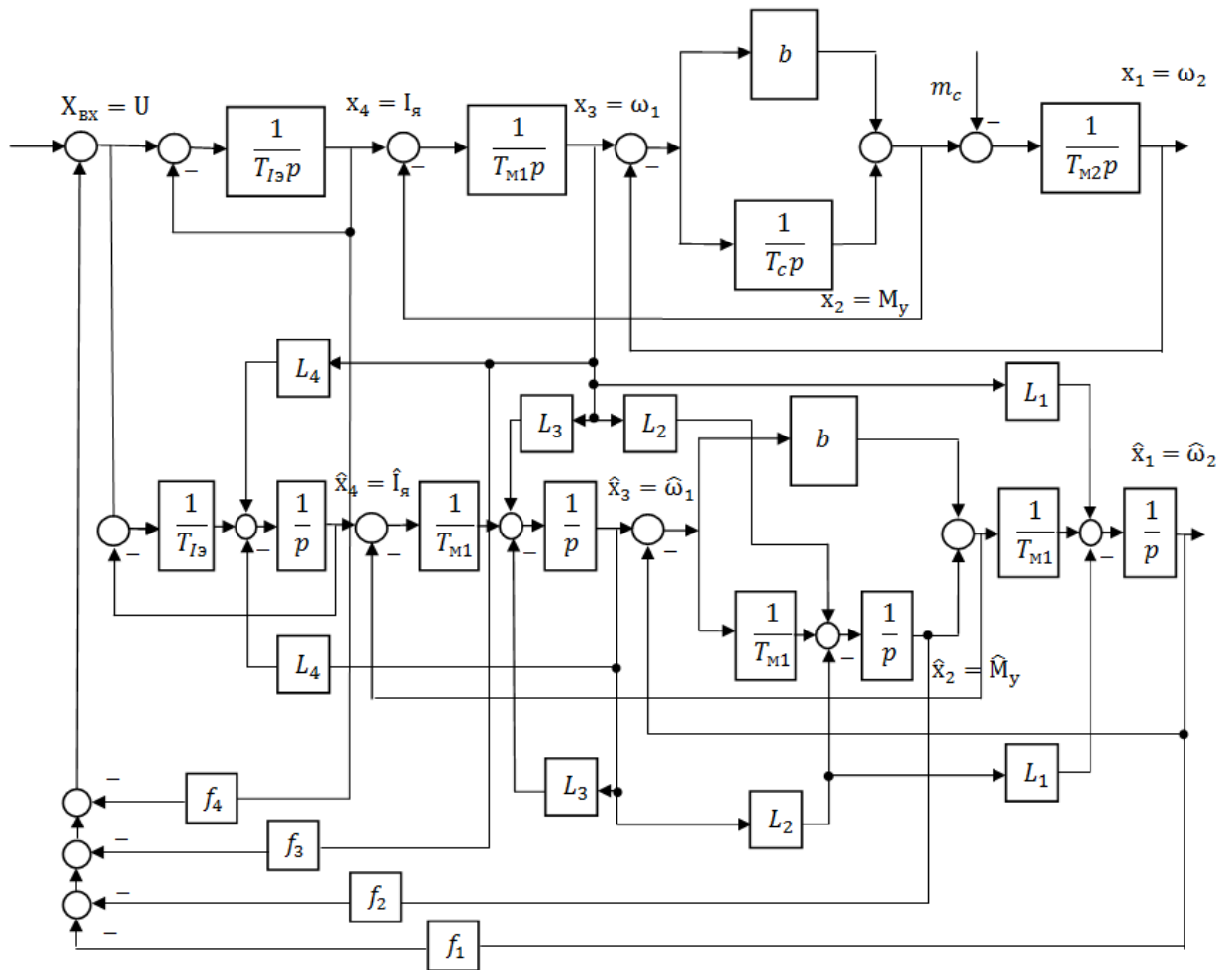
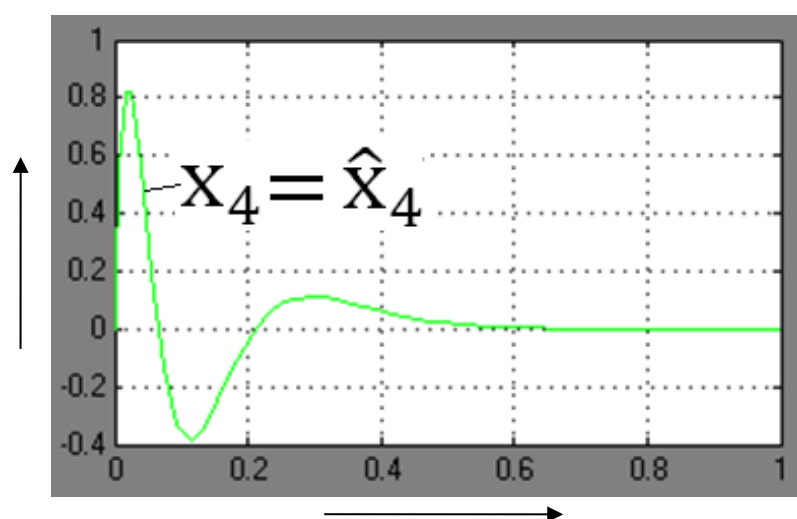


Рисунок 37 – Структурная схема системы «объект-наблюдатель-регулятор»

Уравнение наблюдающего устройства:

Найдем коэффициенты наблюдателя L_1, L_2, L_3, L_4 :

Отсюда находим коэффициенты наблюдателя L_1, L_2, L_3, L_4 :



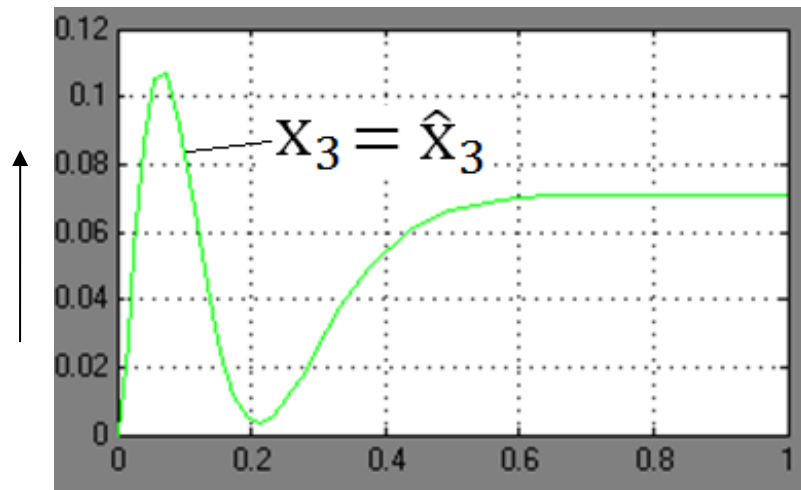
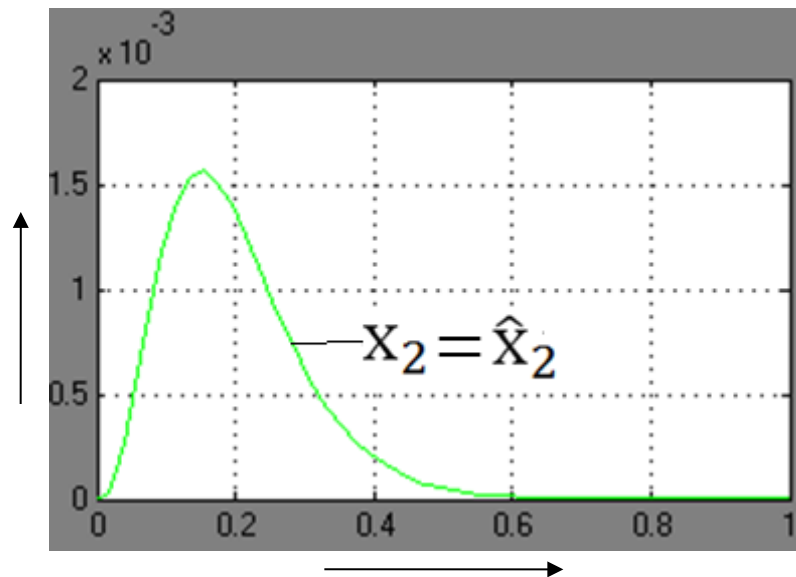


Рисунок 39 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор»
координат



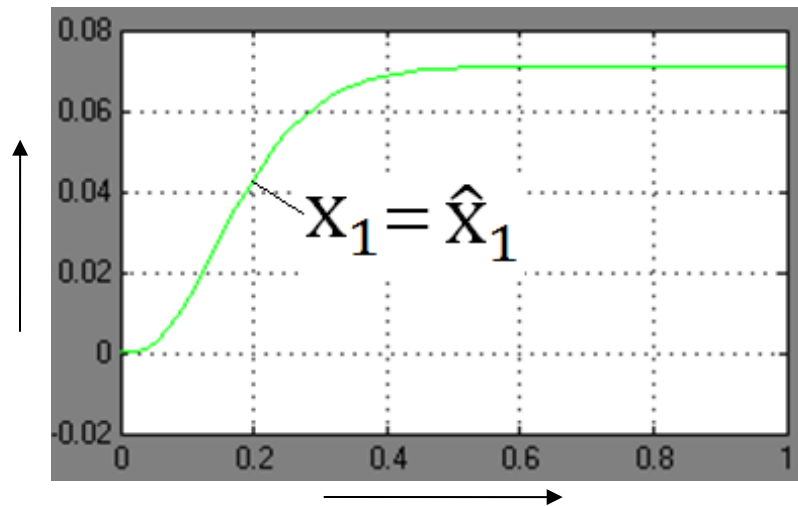
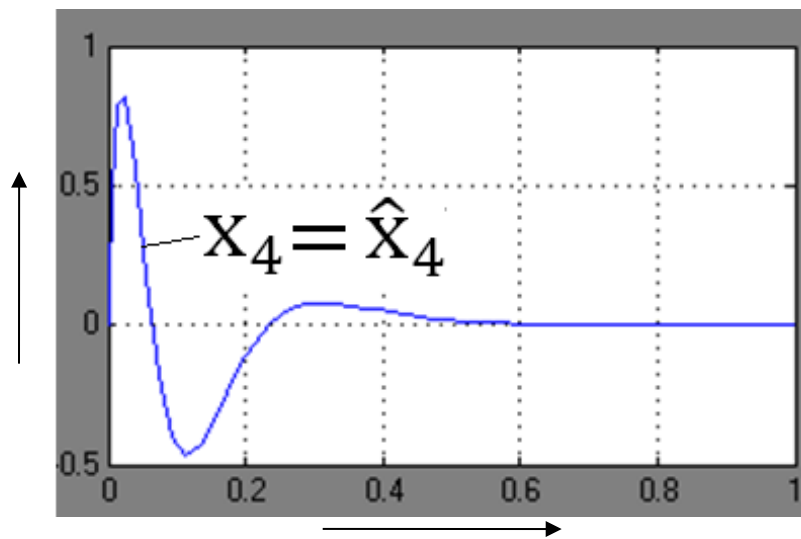


Рисунок 41 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор»
координат



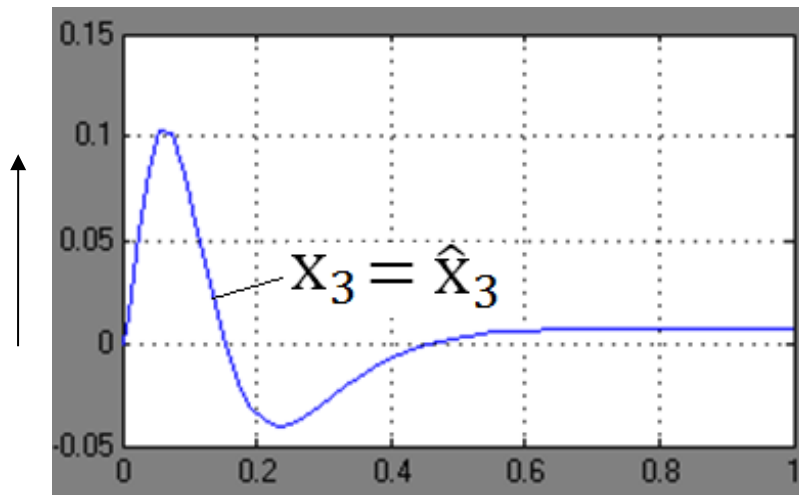
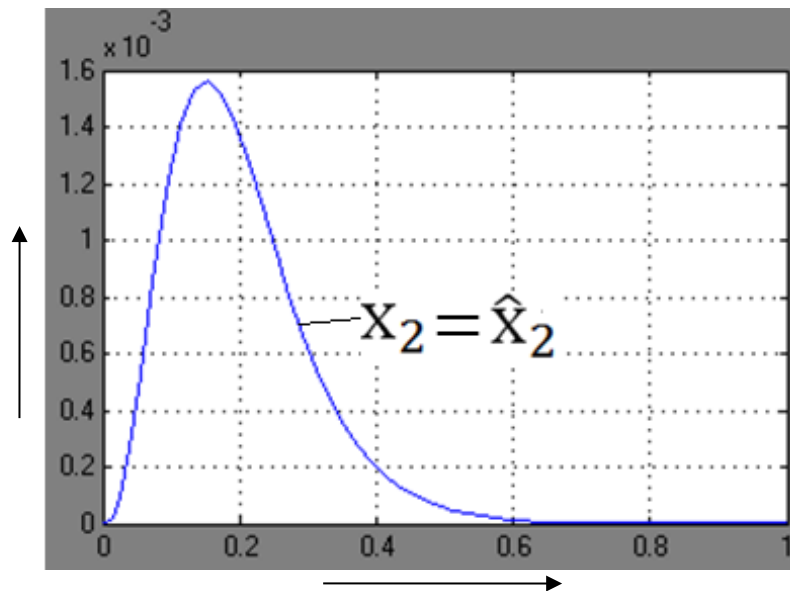


Рисунок 43 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор» координат



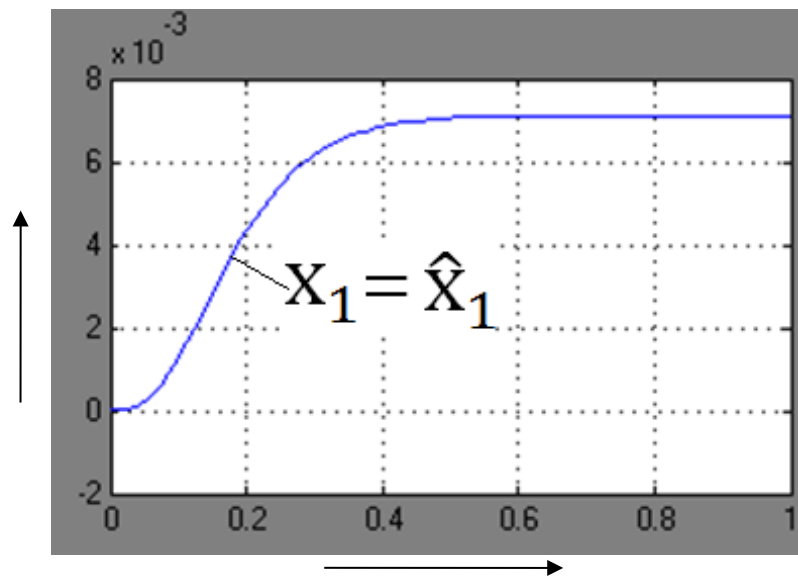
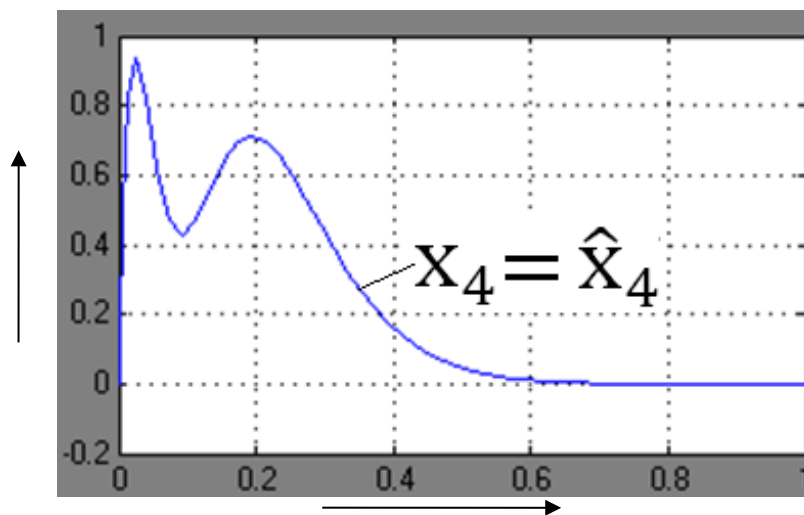


Рисунок 45 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор» координат



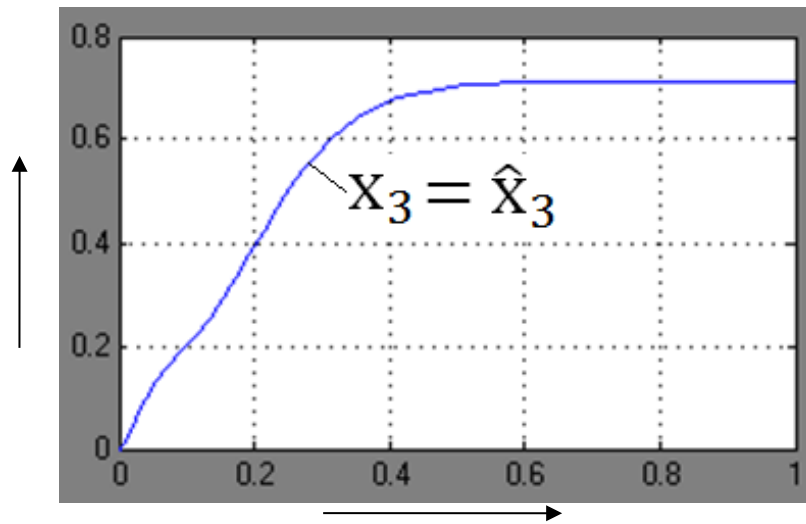
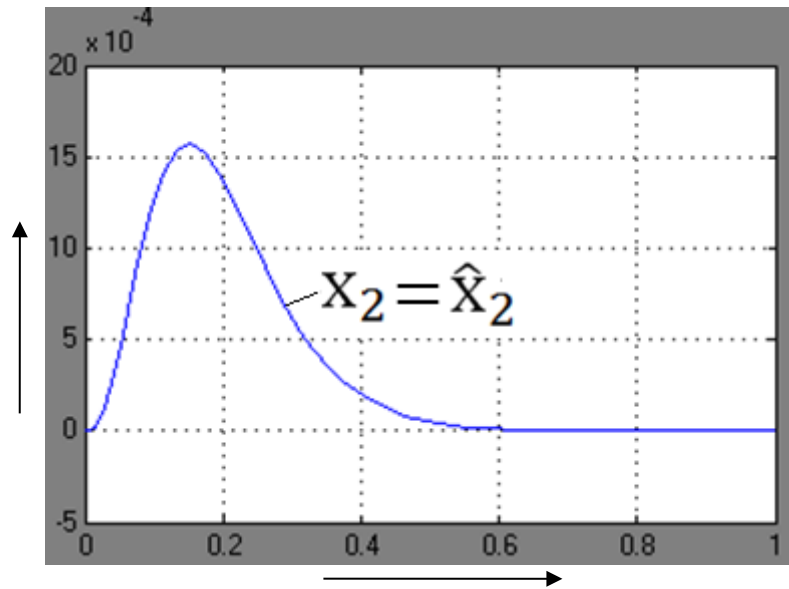


Рисунок 47 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор» координат



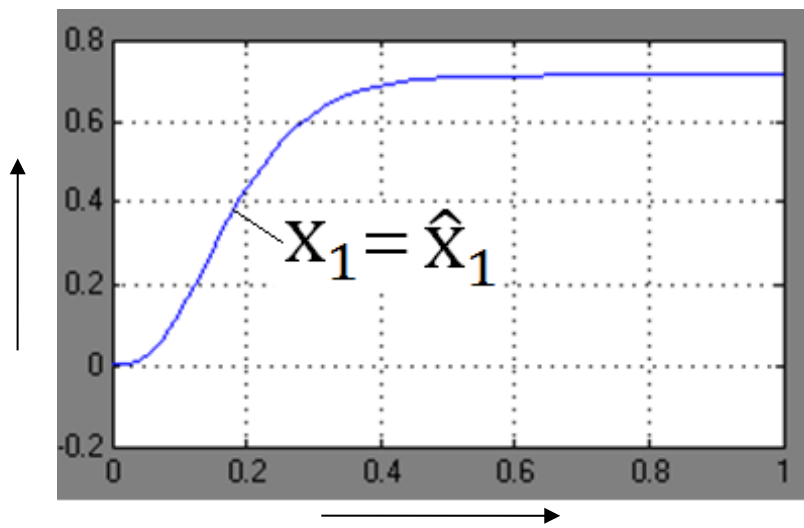


Рисунок 49 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор» координат

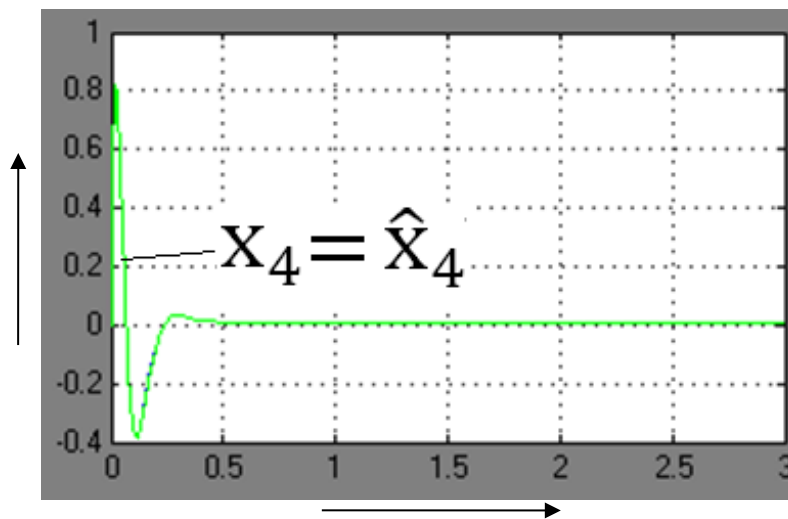
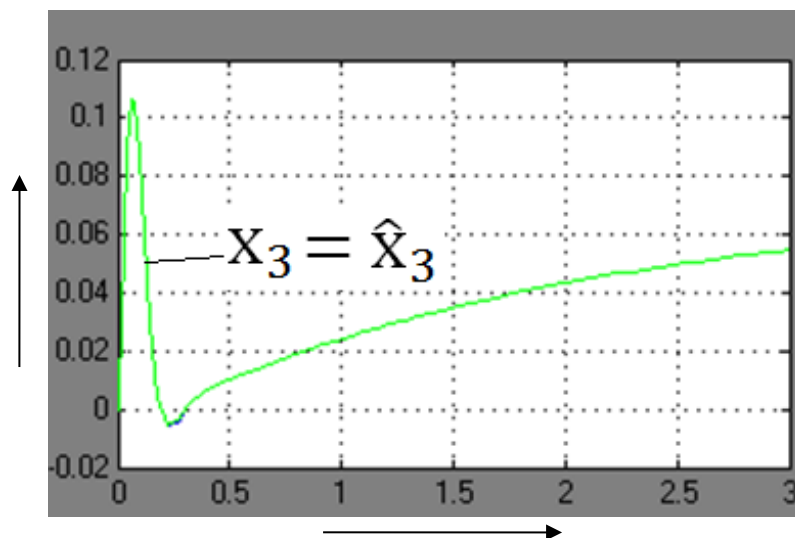


Рисунок 50 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор»
координат



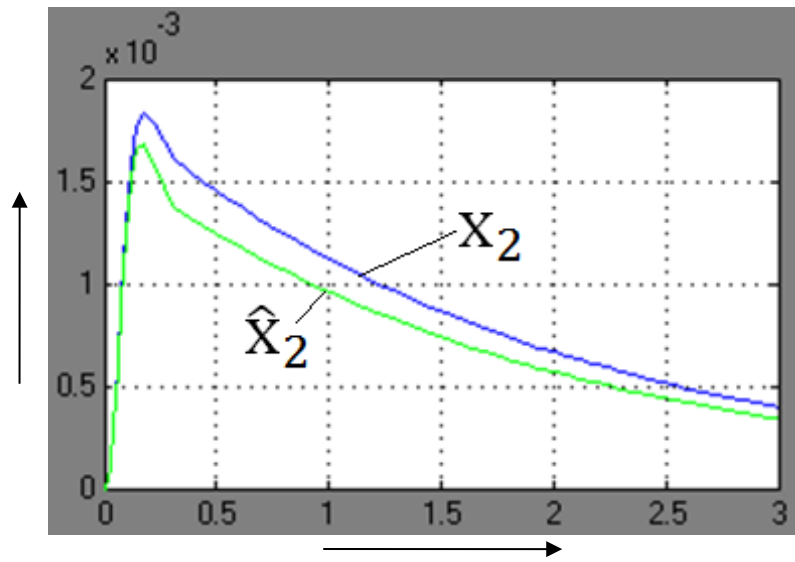
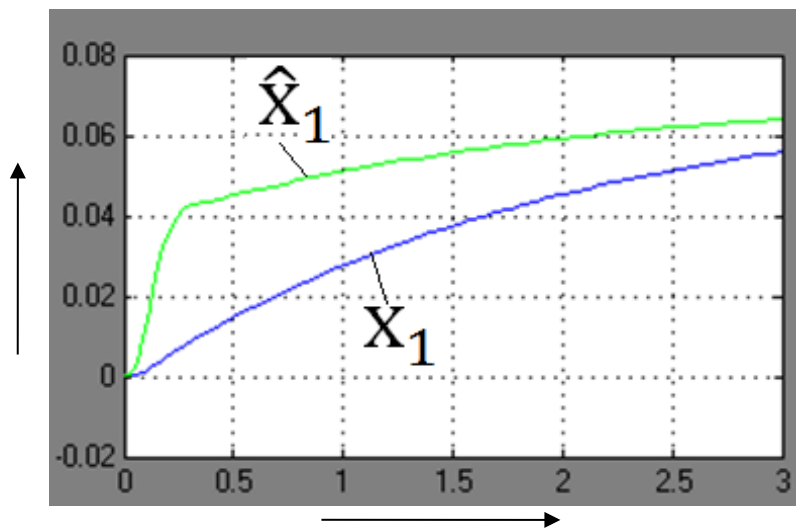


Рисунок 52 – Переходный процесс системы «объект-наблюдатель-регулятор» координат



3.3.2 Принципы адаптивные управления

Приспосабливающиеся (адаптивные) системы – системы, у которых управляющие параметры или алгоритмы управления адаптируются к возмущающим воздействиям с целью оптимального управления системой. В условиях, когда другие системы с заранее заданными входными параметрами и структурой не могут обеспечить требуемое управляющее воздействие из-за изменения динамических характеристик объекта управления, применяются адаптивные системы [20].

По способу управления адаптивные системы подразделяются на: самонастраивающиеся системы, самоорганизующиеся системы, самообучающиеся системы [19].

Самонастраивающиеся системы – системы, желаемое управляющее воздействие которых достигается изменением параметров управляющего устройства в зависимости от данных о внешнем возмущении, данных о изменении динамических характеристик объекта управления в процессе управления.

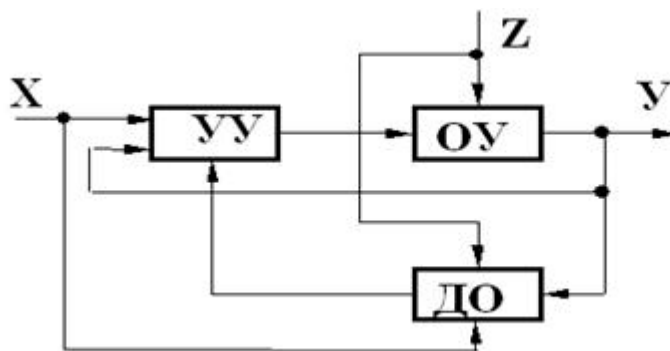


Рисунок 54 – Структурная схема самонастраивающейся системы управления

На рисунке 54 указаны УУ – управляющее устройство, ОУ – объект управления, ДО – датчик отклонений.

Датчик отклонений (ДО) вырабатывает сигнал, позволяющий определить изменение параметров соответствующего звена или внешнего возмущения и в соответствии с этим оптимизировать управляющее воздействие.

Экстремальные системы применяются для автоматического поиска экстремума управляемого параметра, и, в зависимости от изменения его положения, автоматически меняющие алгоритм действий.

Приспосабливающиеся системы в большинстве случаев являются оптимальными системами, т.к. в процессе работы находятся в автоматическом поиске оптимальных параметров. Существуют пассивные и активные методы адаптации систем.

При пассивном методе адаптации взаимосвязанность звеньев системы и ее настроек с меняющимися внешними возмущениями задается на основе аксиоматических данных и существующего опыта. В случае, если объект нестационарен и известны закономерности изменения величин его параметров, то возможно применение указанного метода [17].

Активный метод адаптации применяется в случае изменения параметров объекта по неустановленной закономерности, в виде изменения звеньев и их настроек в зависимости от текущих данных, поступающих в процессе управления.

В зависимости от применяемого метода адаптации самонастраивающиеся системы управления подразделяются на поисковые и беспойсковые.

Поисковые системы вносят пробное изменение в параметры управляющего устройства, контролируя при этом отклик системы на данное изменение. При улучшении управляющих параметров системы, система продолжает изменение параметров управляющего устройства в том же направлении, при ухудшении качества управления, система меняет направление изменения параметров.

Бспойсковые системы регулируют управляющие параметры на основе сравнения параметров заданной эталонной модели и фактических выходных параметров [18].

Самоорганизующиеся системы – системы, в которых изменяются управляющие параметры, структура системы (могут включаться дополнительные звенья) и могут изменяться параметры звеньев системы.

Самообучающиеся системы – системы, у которых могут изменяться управляющие параметры, структура и параметры самой системы, кроме того, данные системы способны улучшать качество управления на основании ранее полученного опыта, т.е. запоминать и изменять алгоритм своей работы в направлении улучшения качества.

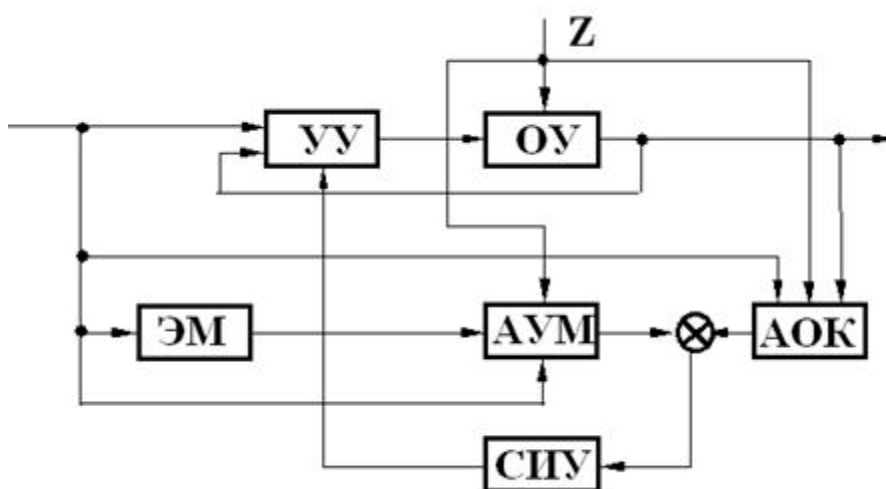


Рисунок 55 – Структурная схема беспойсковой системы

На рисунке 55 указаны УУ – устройство, ОУ – объект управления, ЭМ – эталонная модель, АУМ – анализатор управления эталонной Модели, АОК - анализатор основного контура системы, СИУ – самонастраивающееся исполнительное устройство.

По своим параметрам системы могут подразделяться на стационарные и нестационарные.

Принадлежность источника энергии, создающего управляющие воздействия, характеризует системы прямого и непрямого действия. В системах прямого действия объект управления использует свою энергию, в системах непрямого действия – энергию из другого источника. На основе самонастраивающейся системы разработаем многоструктурный наблюдатель.

3.3.3 Двухмассовый упругий объект с многоструктурным наблюдателем

Многоструктурный подход обеспечивает подключение различных структур наблюдателя в процессе функционирования системы. Переключение структур обеспечивает логический блок в зависимости от величины ошибки оценивания в системе «объект-многоструктурный наблюдатель-регулятор» (рисунок 56).

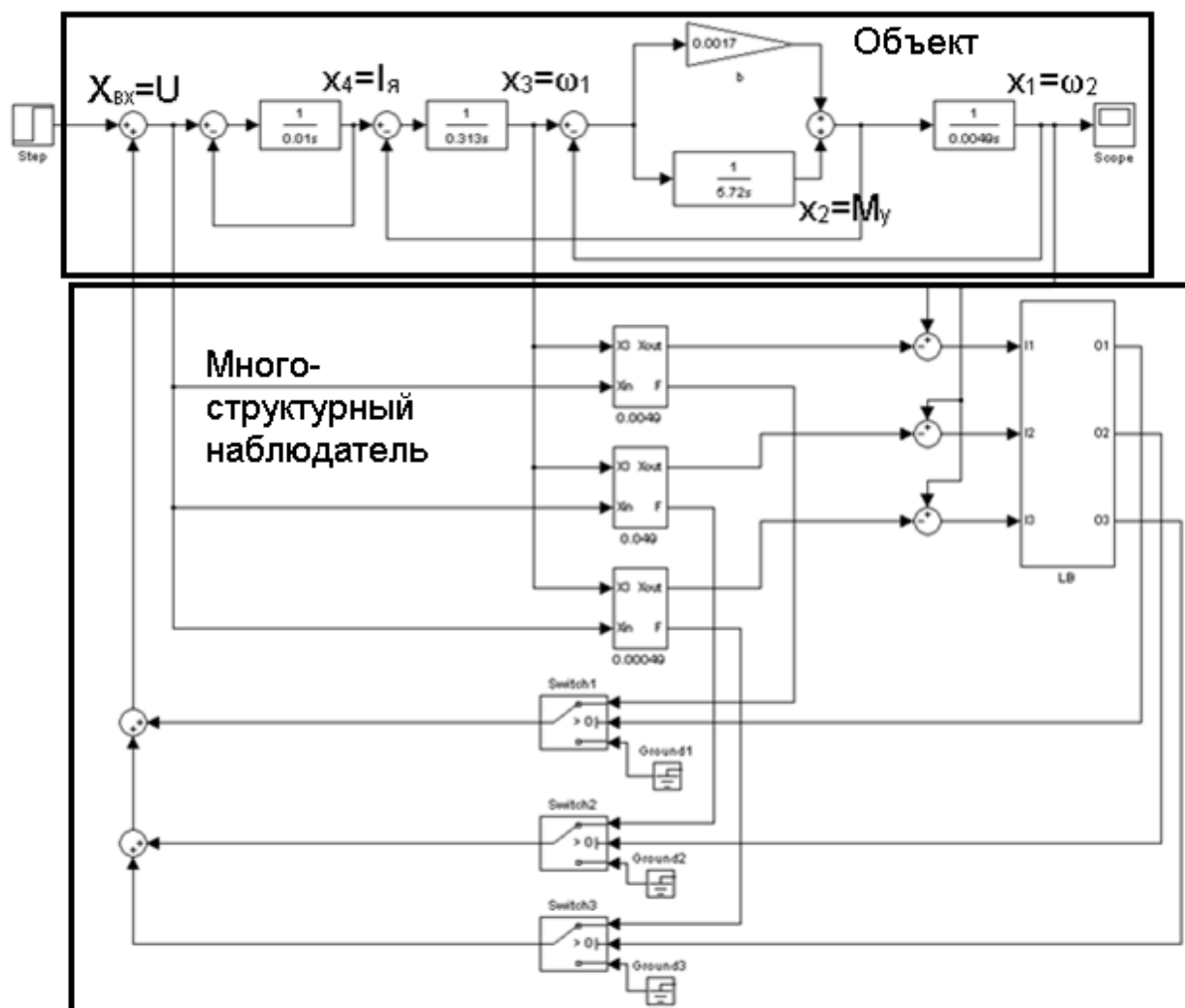


Рисунок 56 – Структурная схема системы «объект-многоструктурный наблюдатель-регулятор»

В данной системе логический блок переключает многоструктурный наблюдатель по наименьшей ошибки между объектом и одним из наблюдающих устройств. Логический блок представлен на рисунке 57.

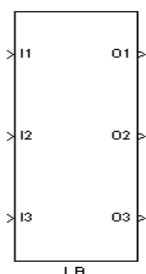
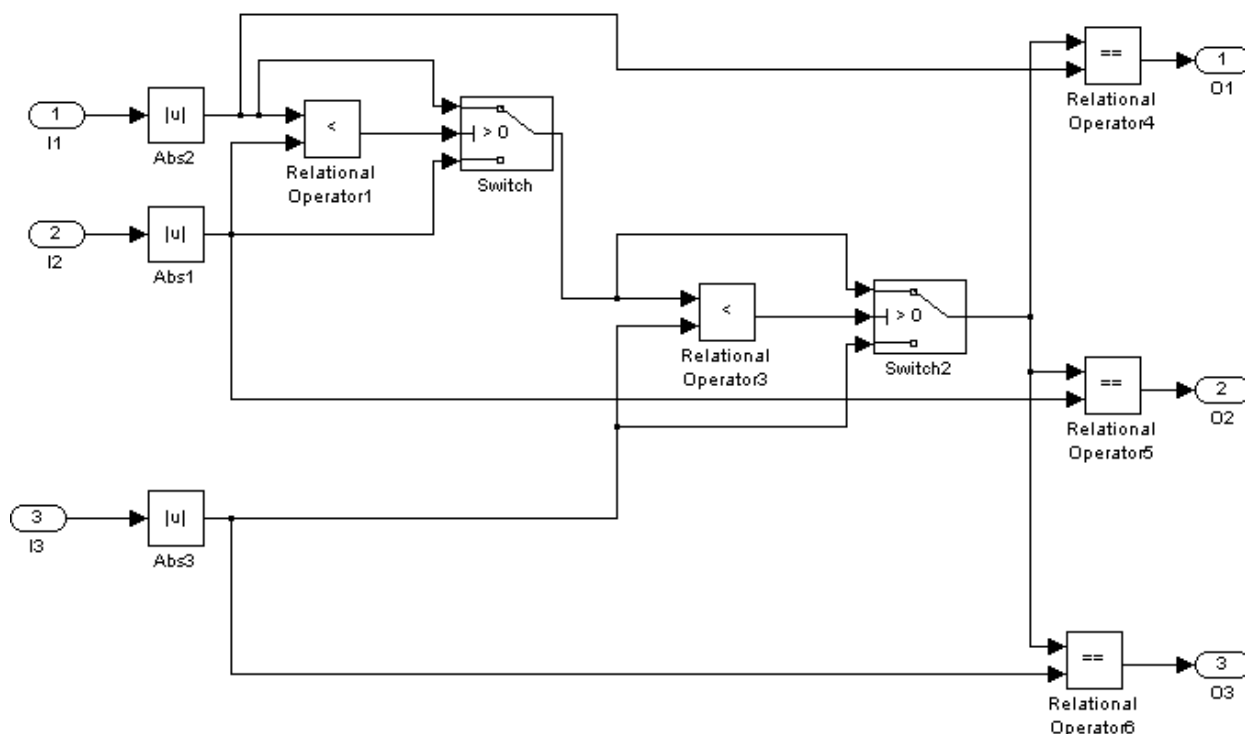


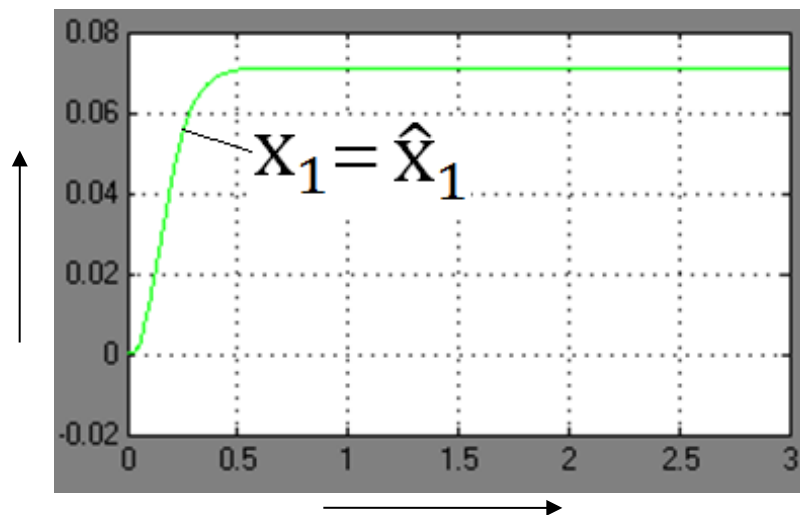
Рисунок 57 – Логический блок

На входы I1, I2, I3 логического блока приходят ошибки между координатой



Принцип работы логического блока состоит в том, что ошибки пришедшие на входы сравниваются между собой. Когда наименьшая ошибка найдена, то на один из выходов подается логическая единица, что будет показывать какой из наблюдателей будет включен в систему «объект-многоструктурный наблюдатель-регулятор»

Оценим работоспособность системы с многоструктурным наблюдателем при изменении значения



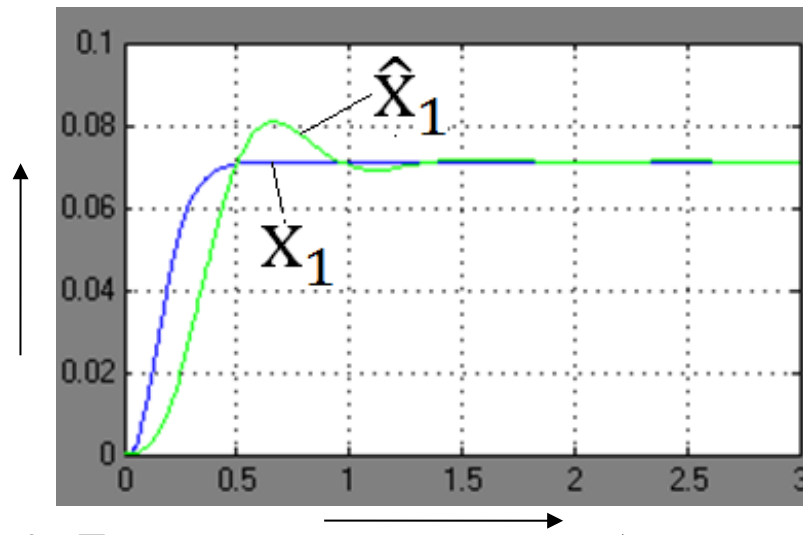
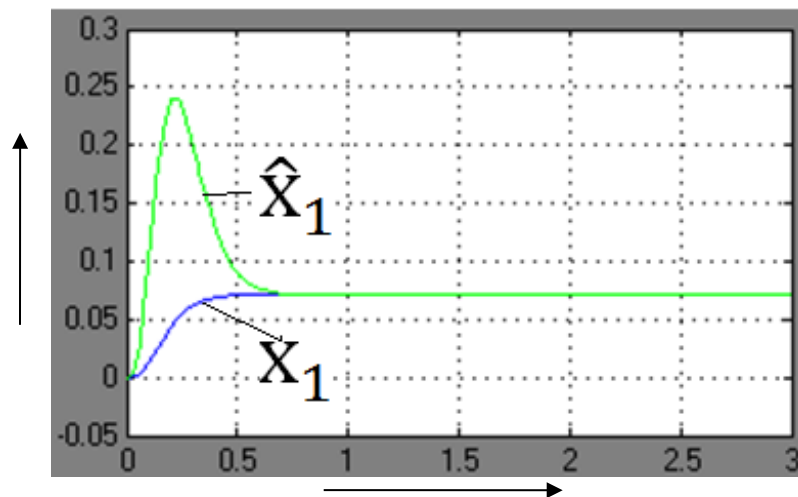
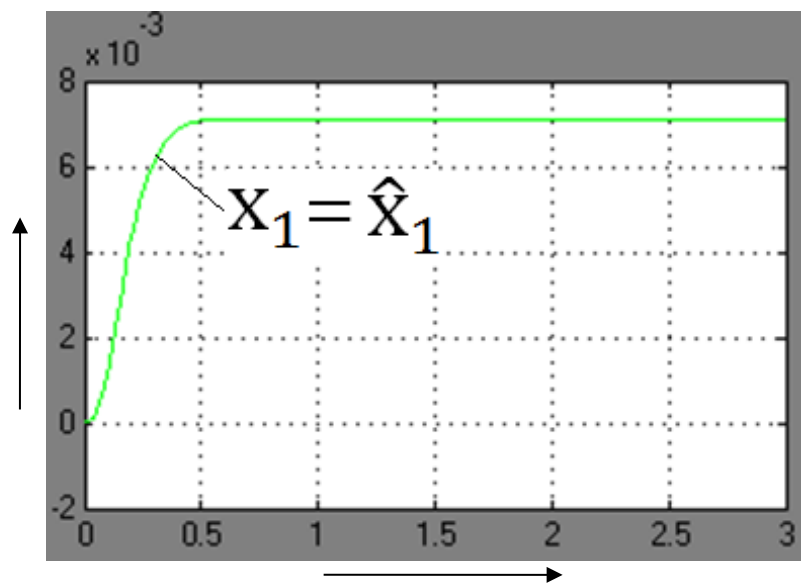
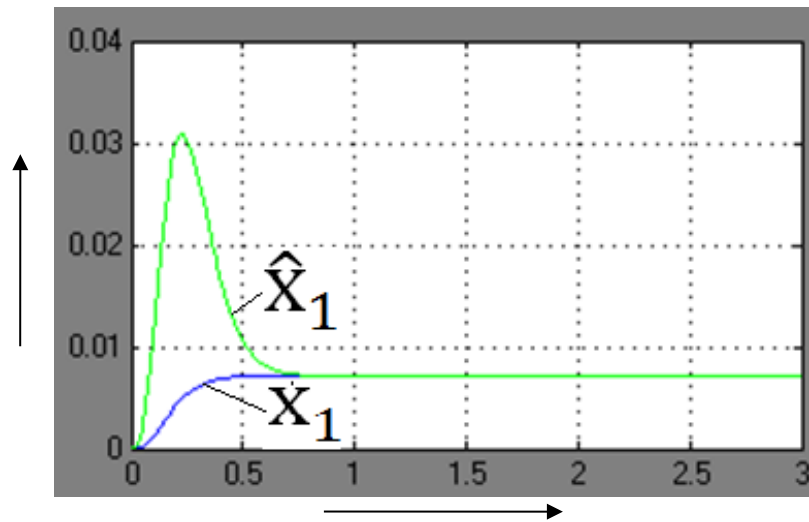


Рисунок 60 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурный наблюдатель-регулятор» координат



б) При



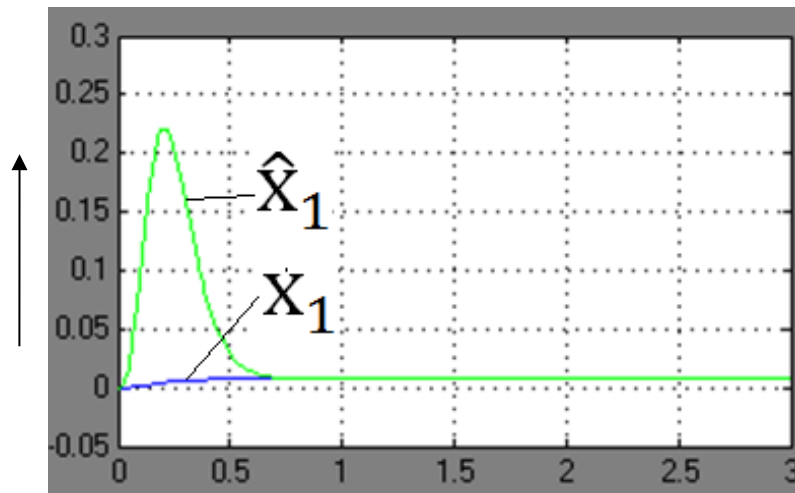
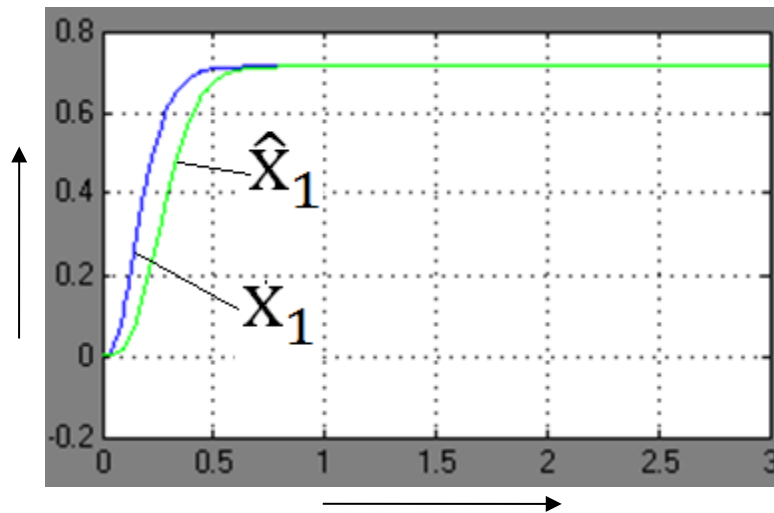


Рисунок 64 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурный наблюдатель-регулятор» координат



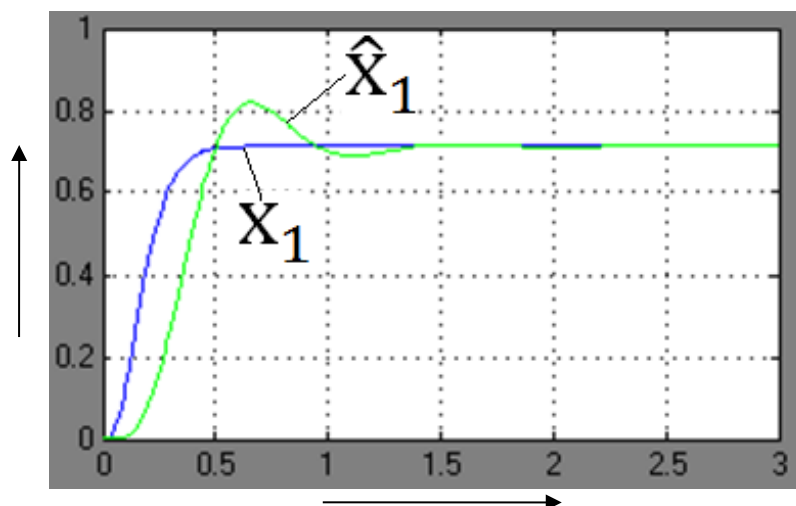
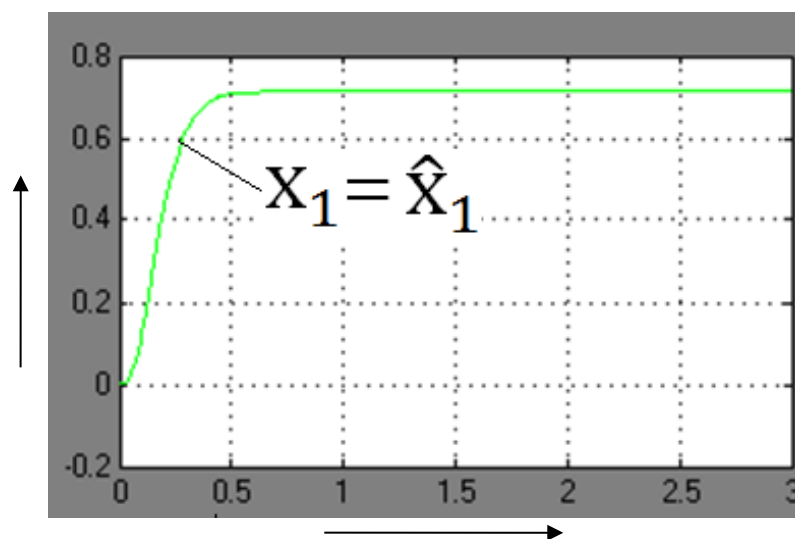


Рисунок 66 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурный наблюдатель-регулятор» координат



3.3.4 Расчет астатического наблюдающего устройства с компенсационным каналом по возмущающему воздействию

Одной из основных задач систем управления является уменьшение или исключение влияния возмущения на выходную переменную. Компенсационный канал с прямой связью по возмущающему воздействию исключает влияние возмущения на выходную переменную в установившемся режиме, но имеет недостаток такой подход: возмущающее воздействие не всегда доступно измерению. Астатическое наблюдающее устройство помимо координат оценивает и возмущающее воздействие, что позволяет реализовать компенсационный канал (рисунок 68).

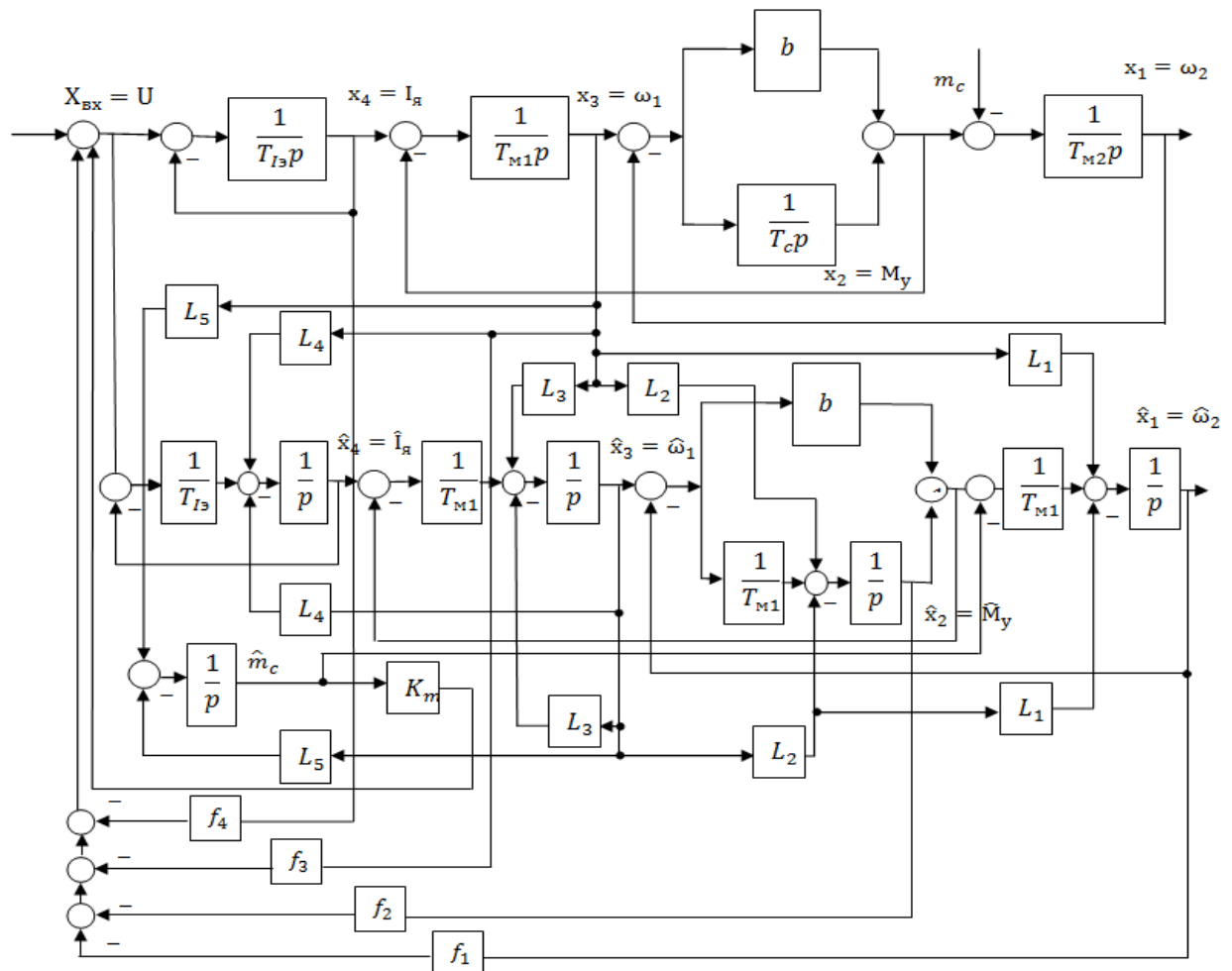
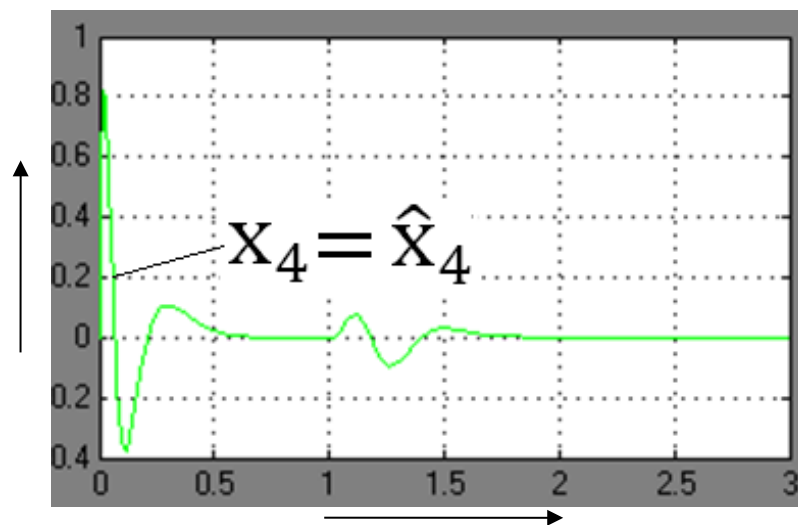


Рисунок 68 – Структурная схема системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор»

Уравнение наблюдающего устройства для расширенного объекта:

Найдем характеристическое уравнение наблюдателя при разных значениях

Отсюда находим коэффициенты наблюдателя L_1, L_3, L_5, L_7, L_9 :



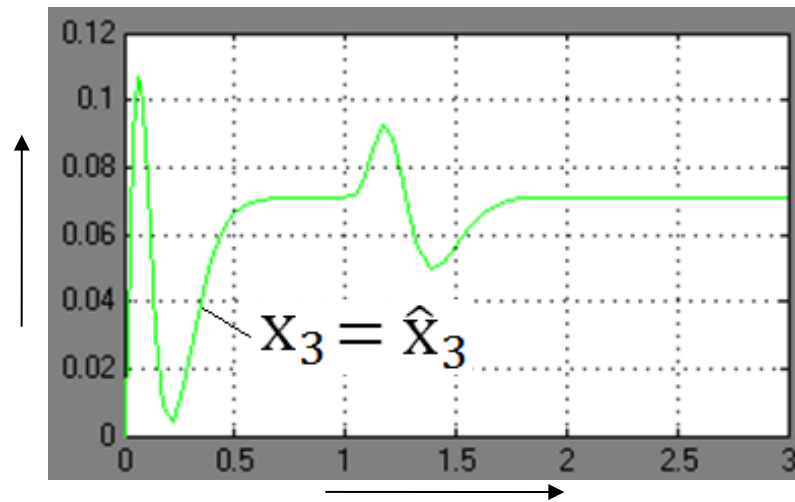
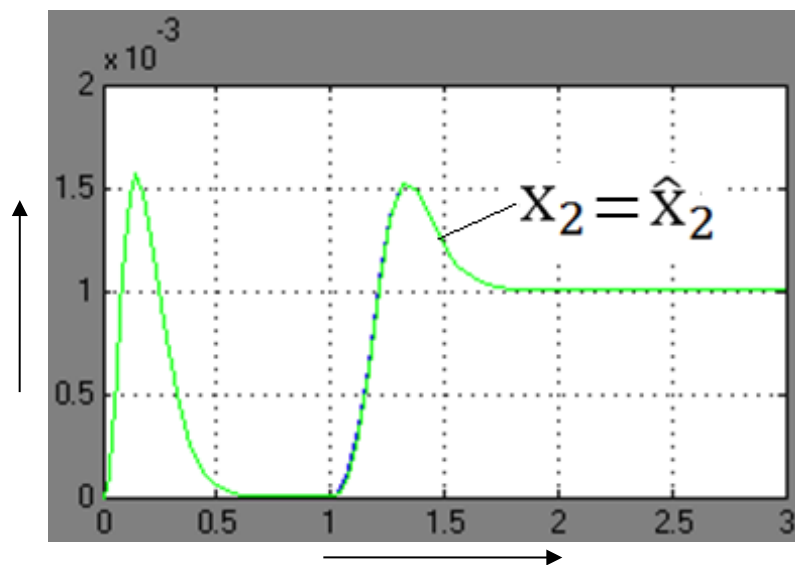


Рисунок 70 – Переходный процесс системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



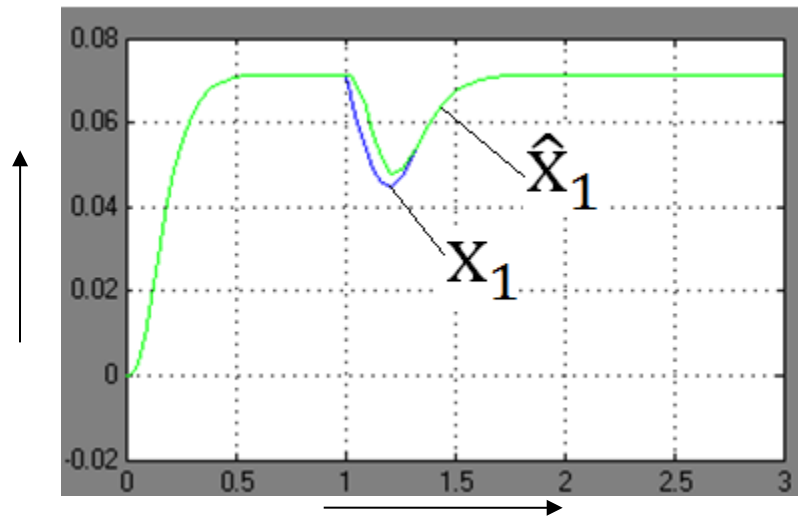
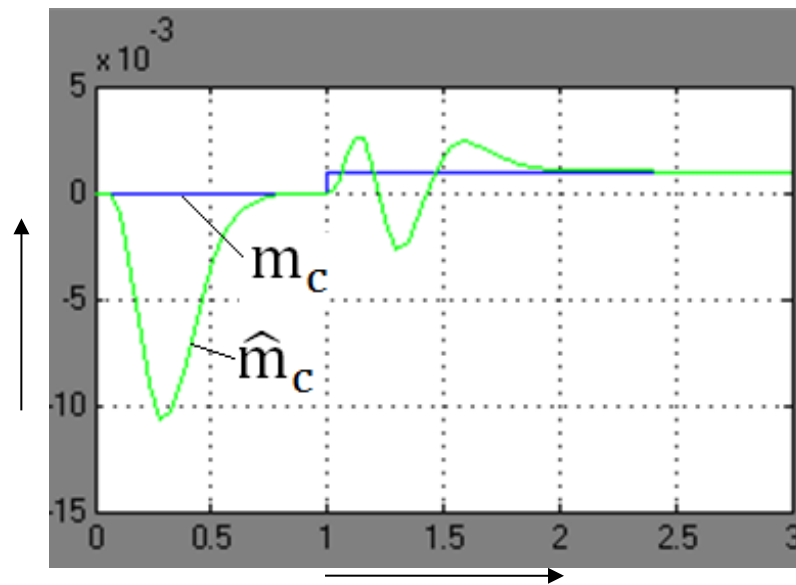
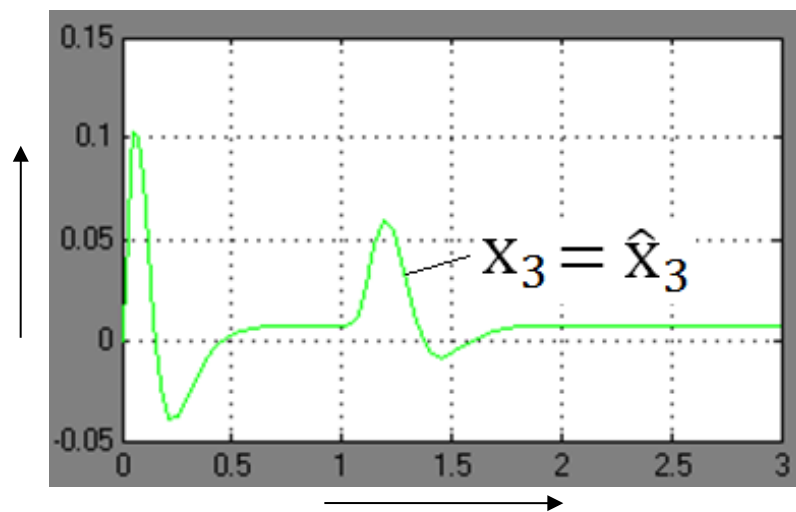
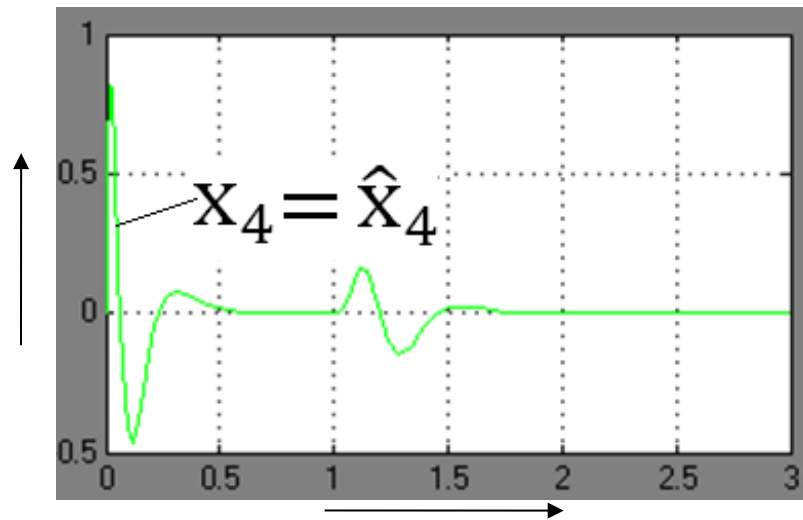


Рисунок 72 – Переходный процесс системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



б) При



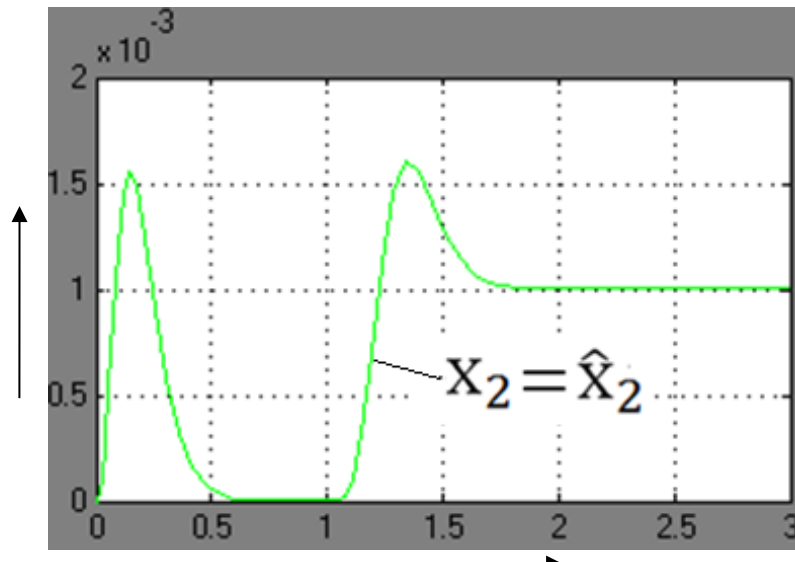
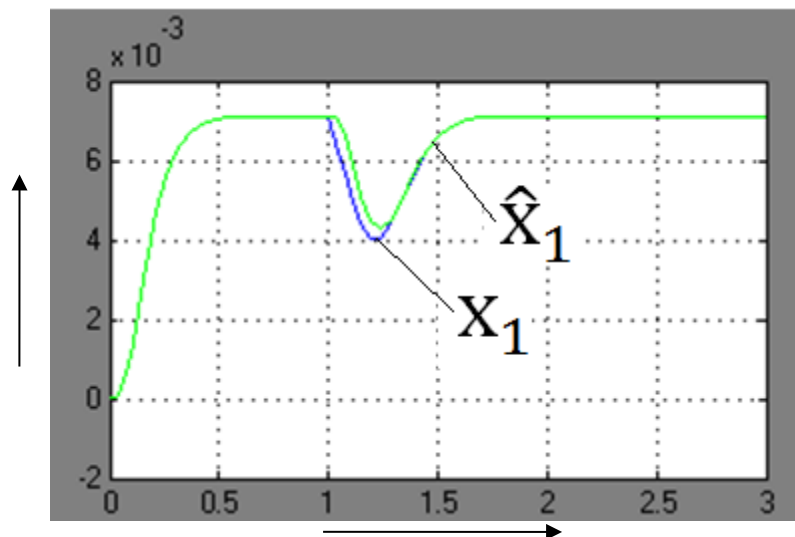


Рисунок 76 – Переходный процесс системы «объект- астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



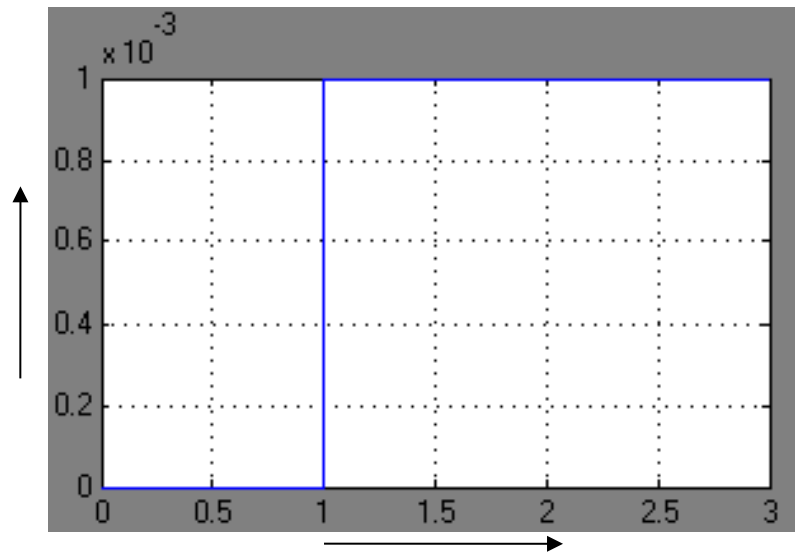
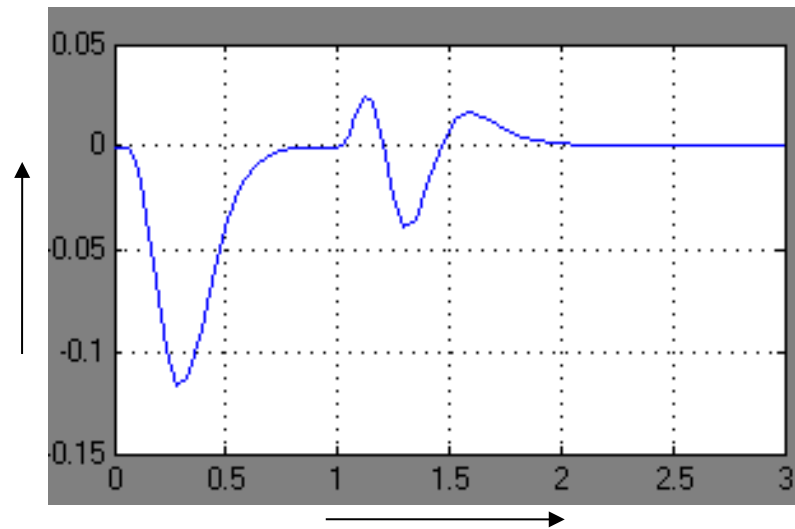
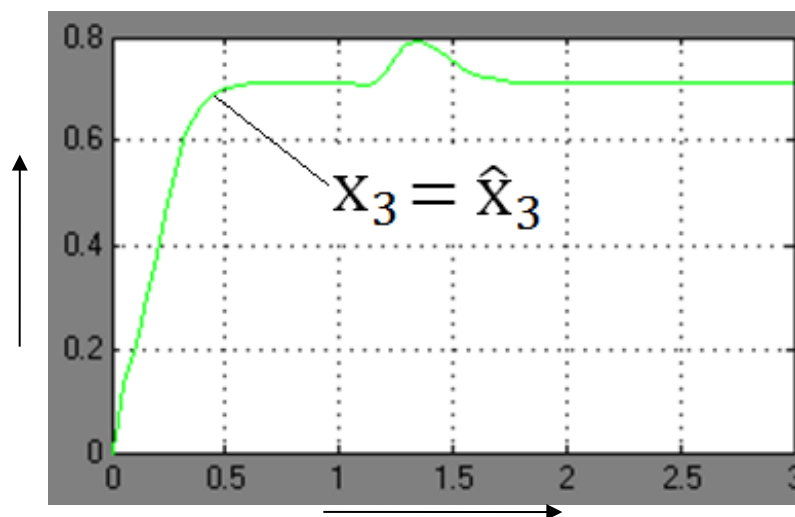
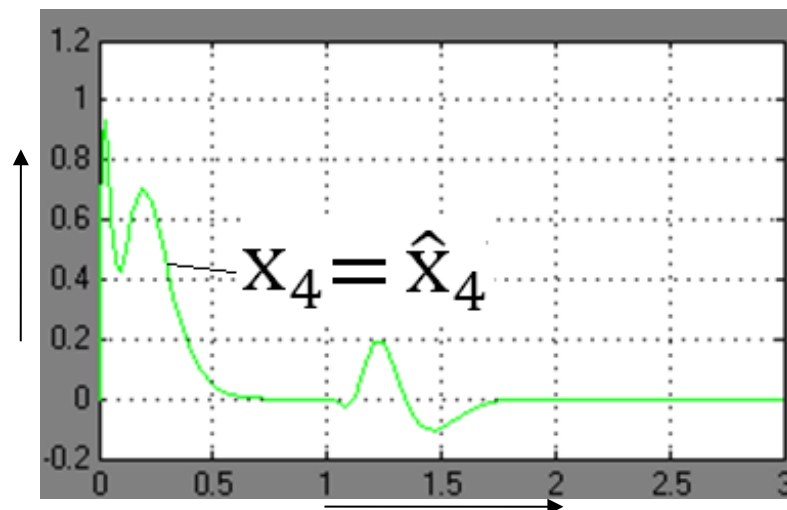


Рисунок 78 – Переходный процесс системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координаты



с) При



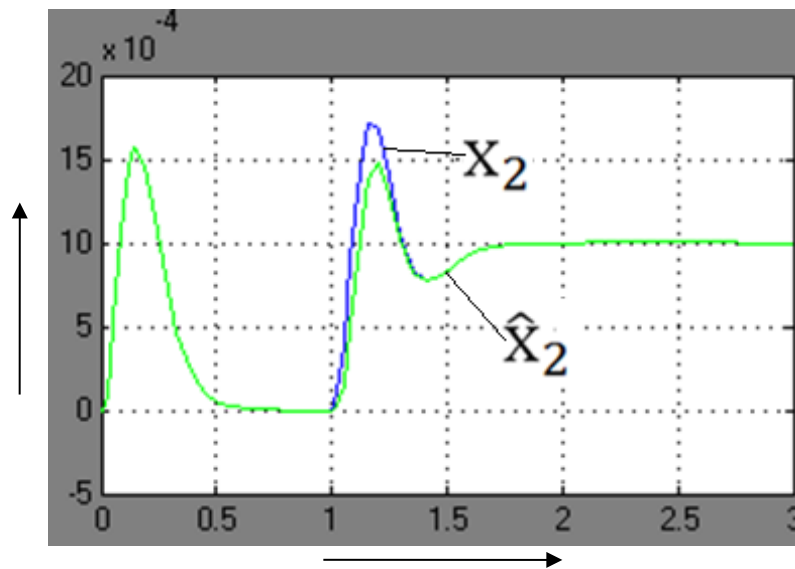
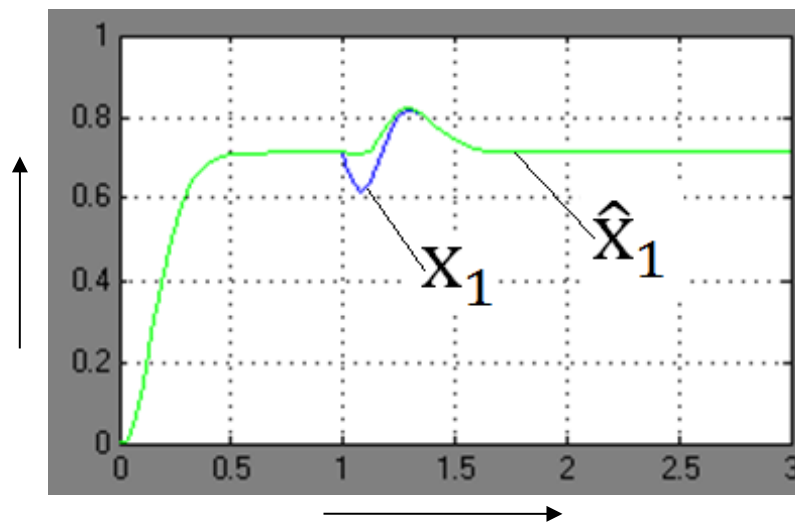


Рисунок 82 – Переходный процесс системы «объект-астигическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



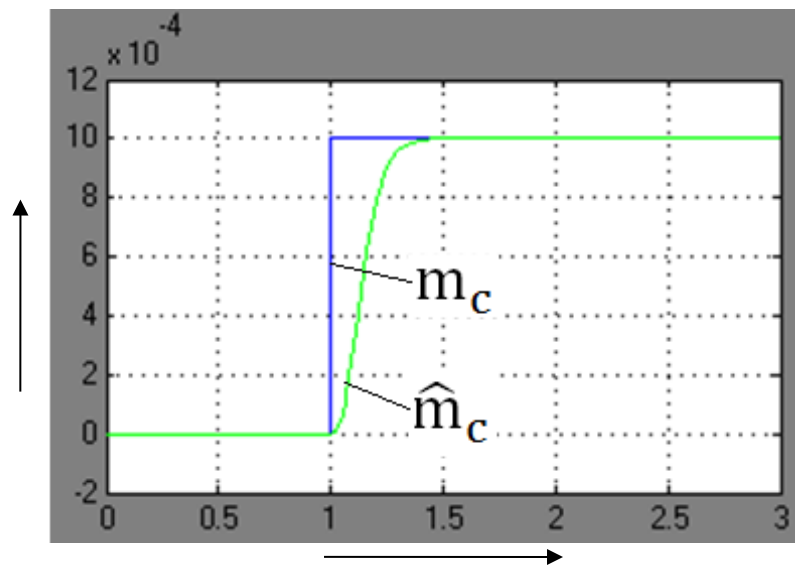


Рисунок 84 – Переходный процесс системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат

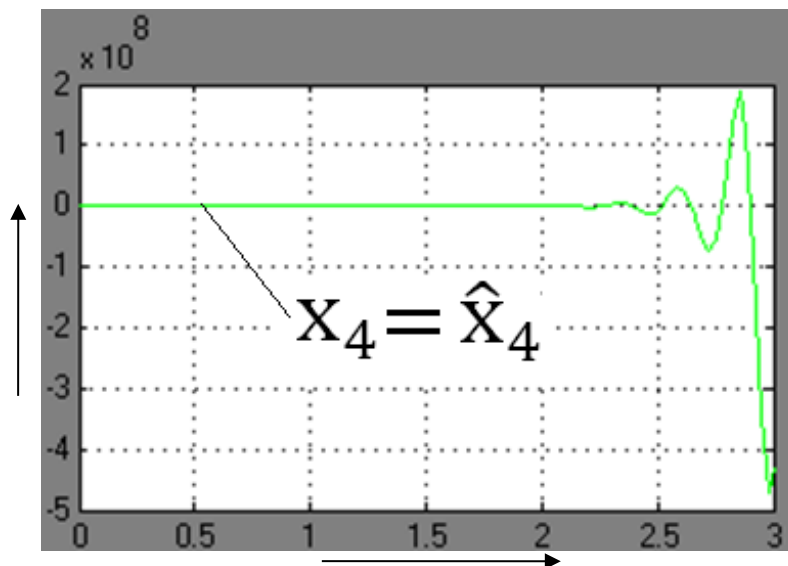
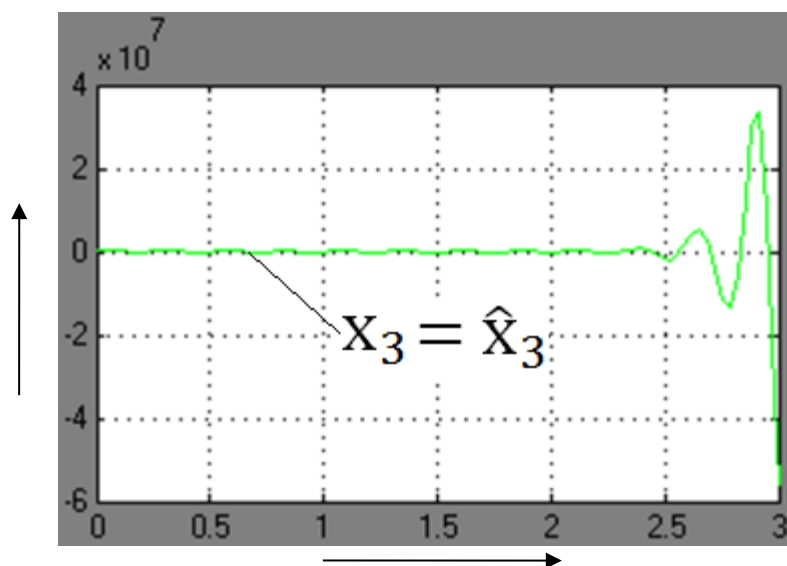


Рисунок 85 – Переходный процесс системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



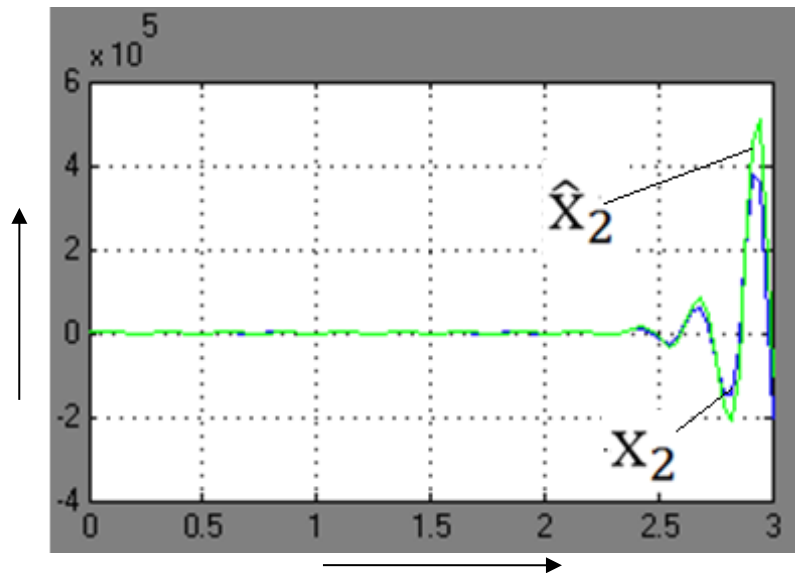
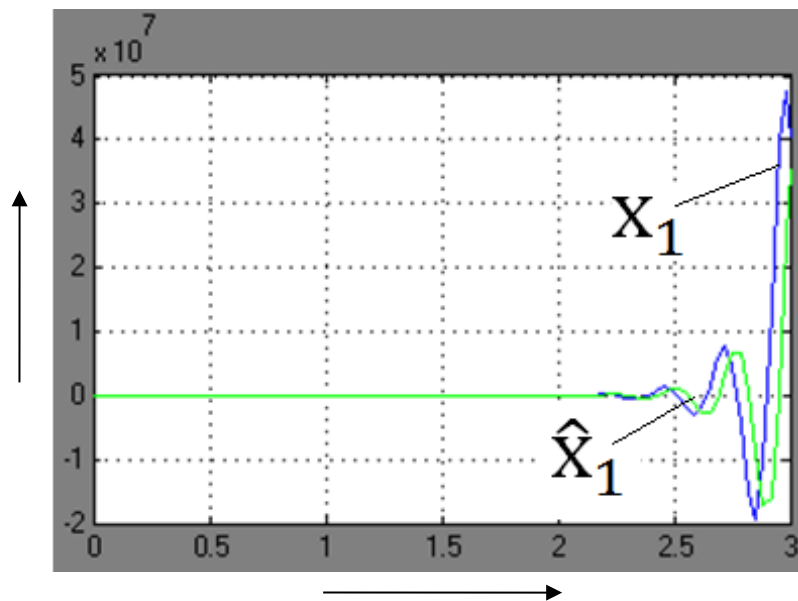


Рисунок 87 – Переходный процесс системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



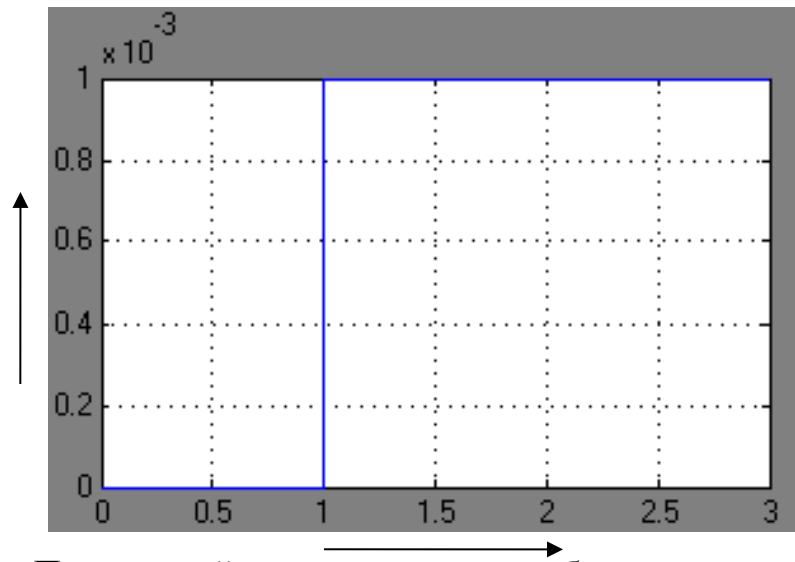
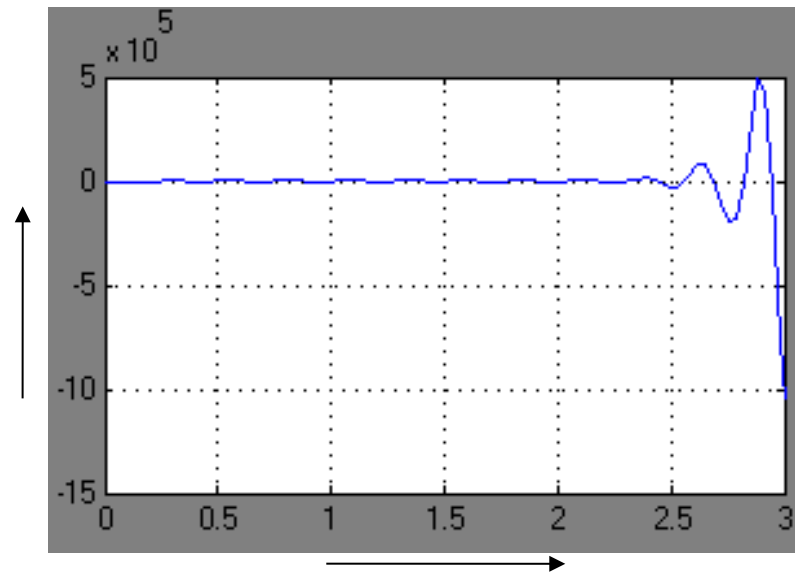


Рисунок 89 – Переходный процесс системы «объект-астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координаты



3.3.5 Двухмассовый упругий объект с многоструктурным астатическим наблюдающим устройством

Многоструктурное наблюдающее устройство обеспечивает подключение различных структур наблюдателя в процессе функционирования системы, но при подаче возмущающего воздействия многоструктурное наблюдающее устройство не сможет работать корректно. Для этого нам понадобится многоструктурное астатическое наблюдающее устройство, которое сможет убрать статическую ошибку (рисунок 91). А так же используем логический блок такой же как и в системе «объект-многоструктурный наблюдатель-регулятор»

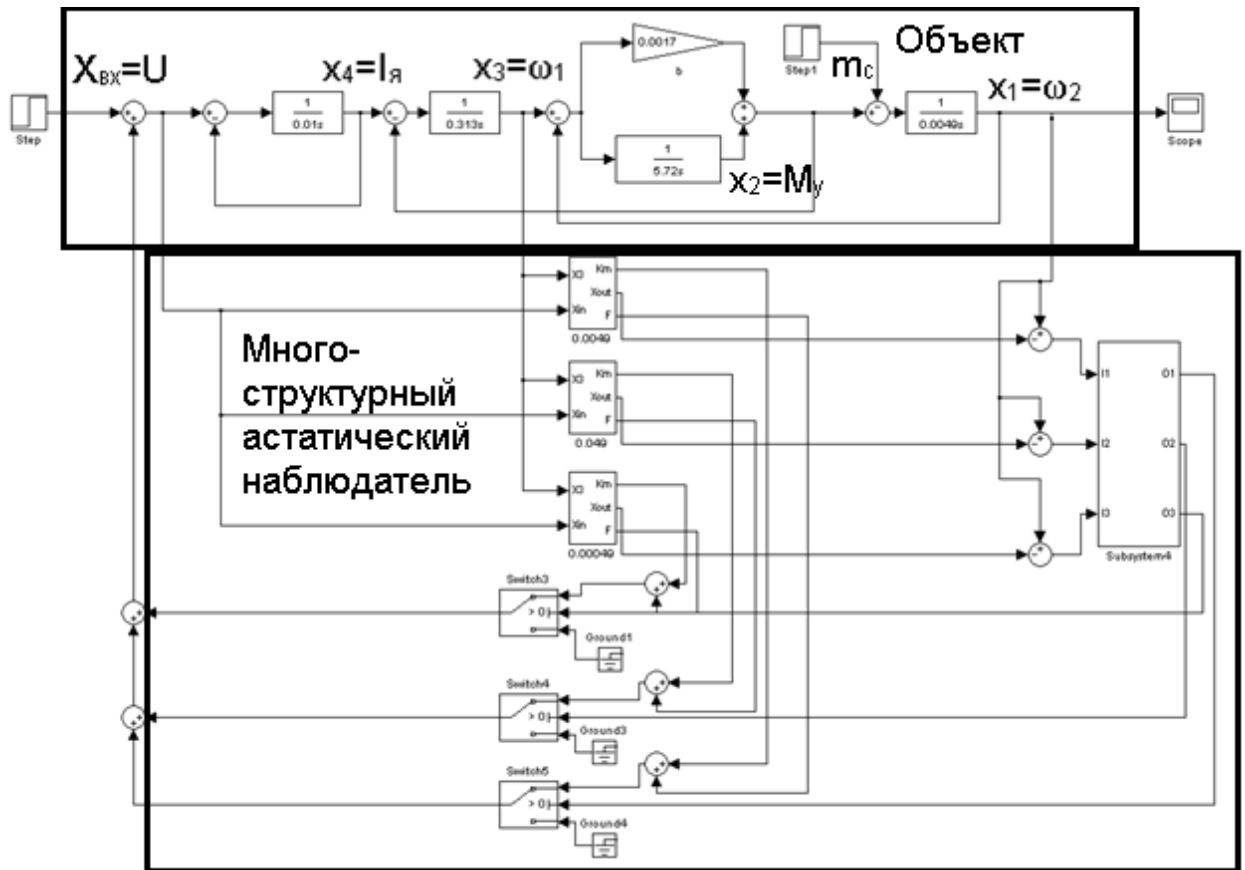
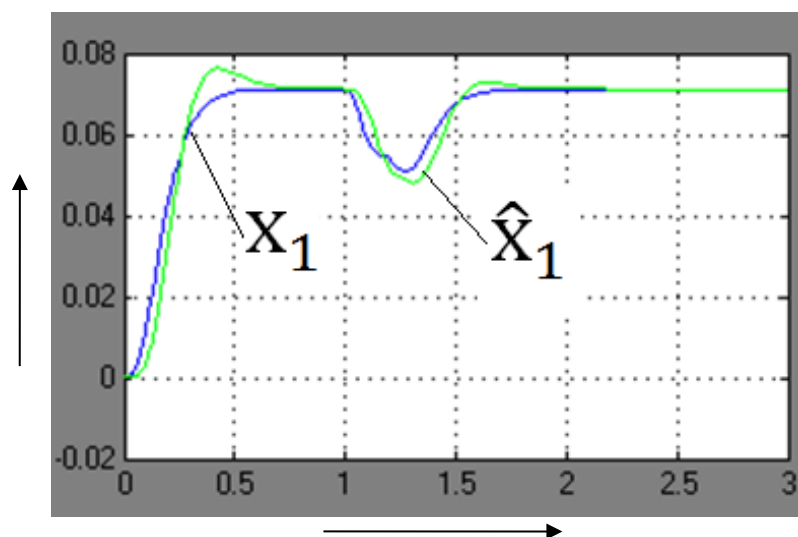
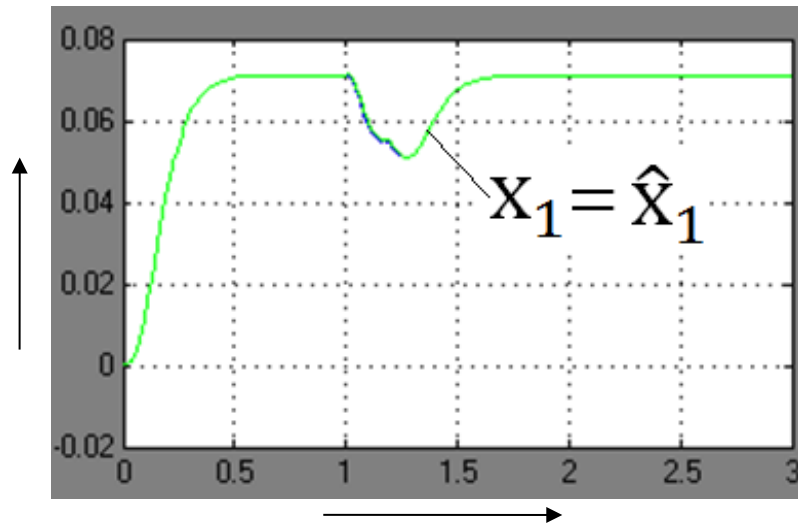


Рисунок 91 – Структурная схема системы «объект-многоструктурное астатическое наблюдающее устройство-регулятор»

Оценим работоспособность системы с многоструктурным астатическим наблюдателем при изменении значения

ния системы. Для этого посмотрим переходные процессы по координатам объекта и астатических наблюдателей рассчитанных для разных значений



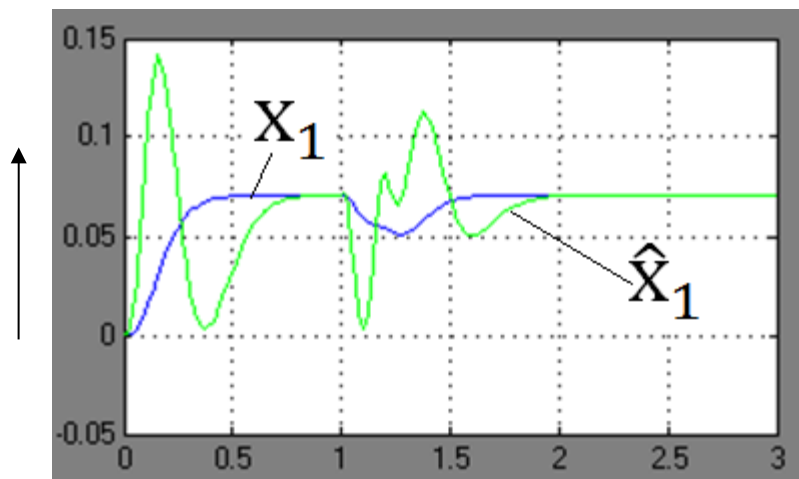
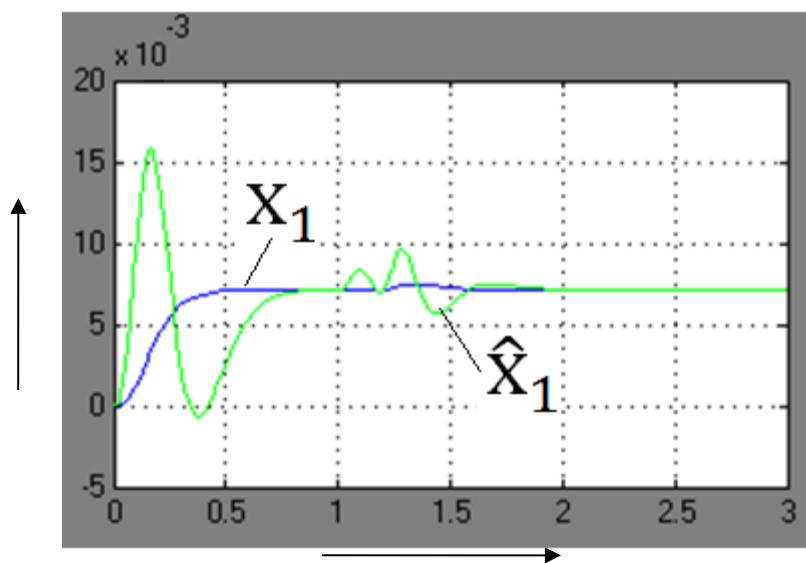


Рисунок 94 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурное астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



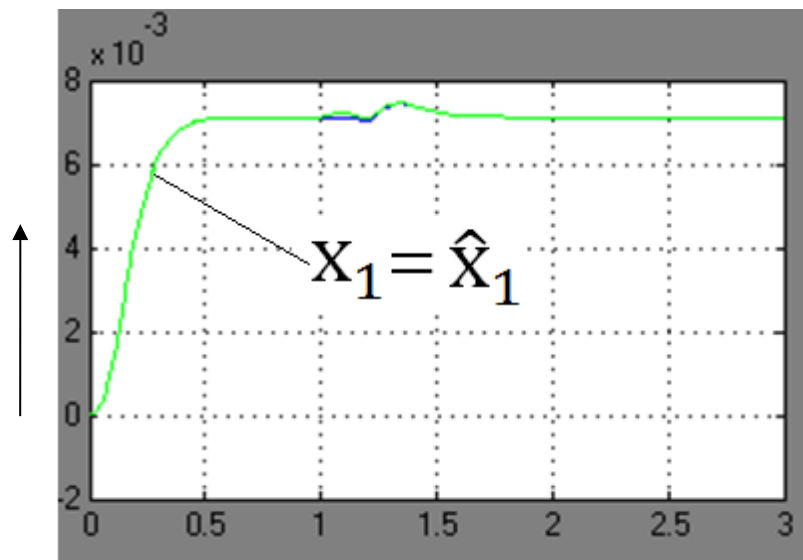
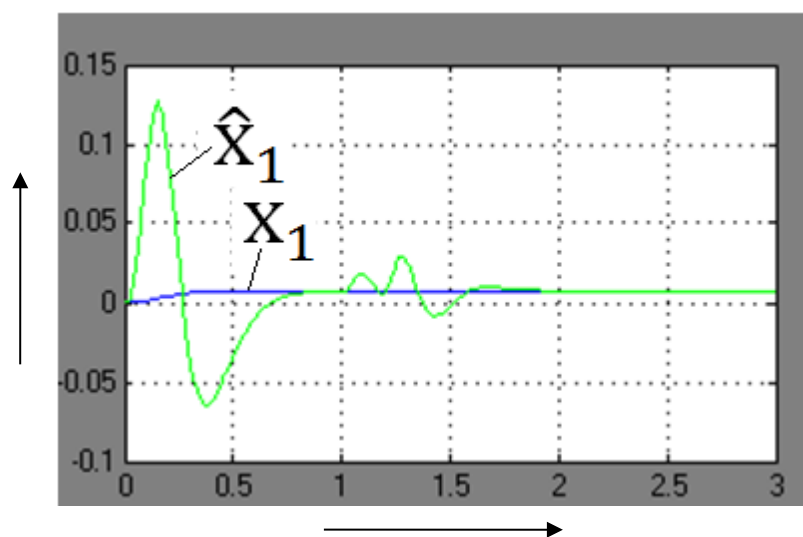
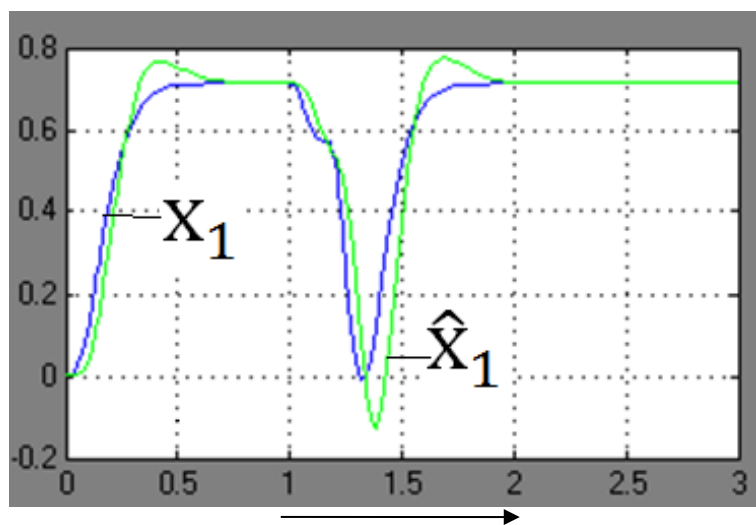
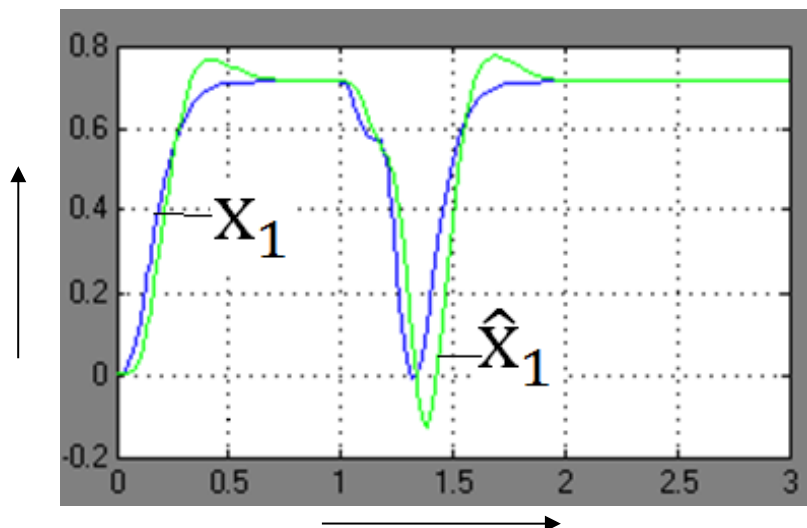


Рисунок 96 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурное астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат



с) При



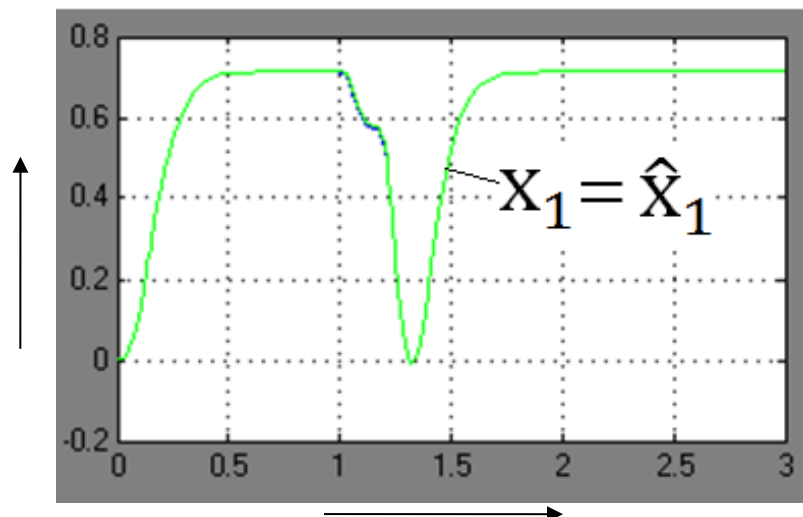


Рисунок 100 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурное астатическое наблюдающее устройство-регулятор» координат

3.3.6 Синтез многоструктурного наблюдателя при изменении двух параметров объекта

Как ранее было рассмотрен система управления двухмассовым упругим объектом с многоструктурным наблюдателем, в котором изменялся один параметр. При изменении нескольких параметров в объекте, многоструктурный наблюдатель оценивает координаты с ошибками, и как следствие переходная характеристика в такой системе не соответствует требованиям (рисунок 101).

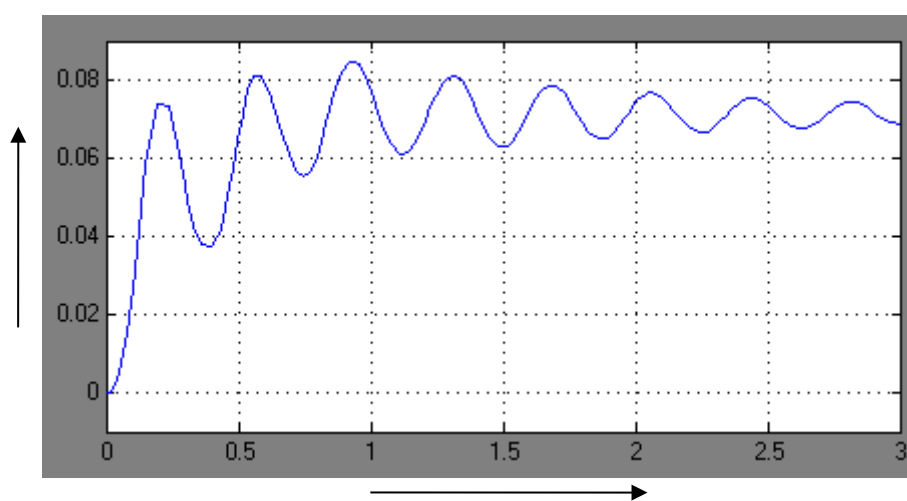


Рисунок 101 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурное наблюдающее устройство-регулятор» координаты

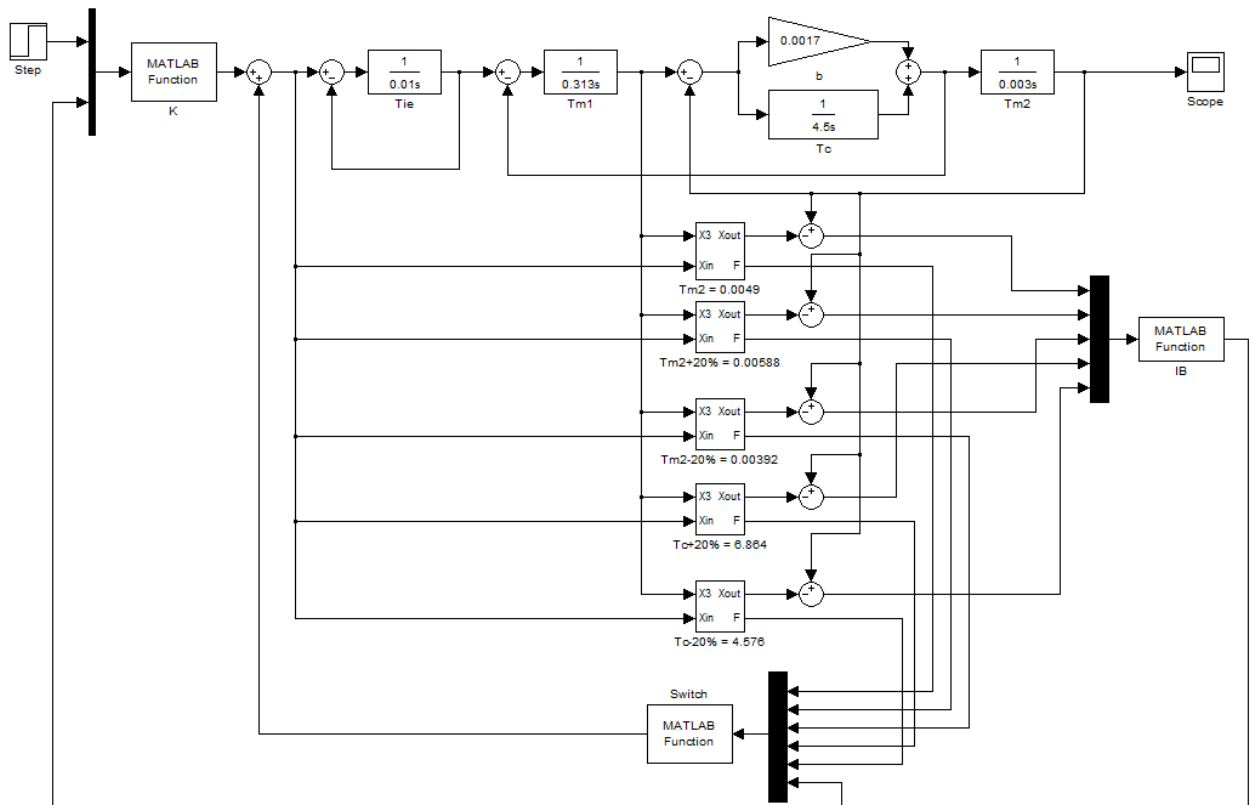


Рисунок 102 – Структурная схема «объект-многоструктурное наблюдающее устройство-регулятор»

При изменении двух параметров многоструктурный наблюдатель с логическим блоком можно проанализировать переходный процесс выходной координаты объекта (рисунок 103).

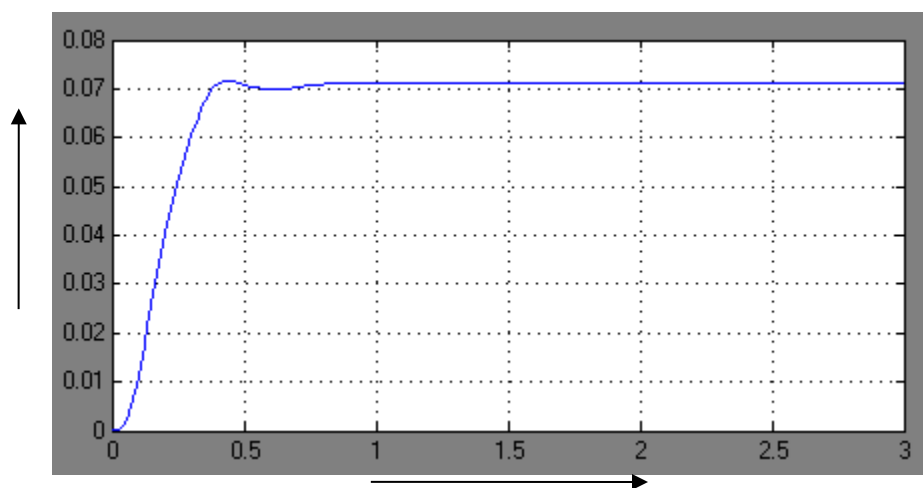
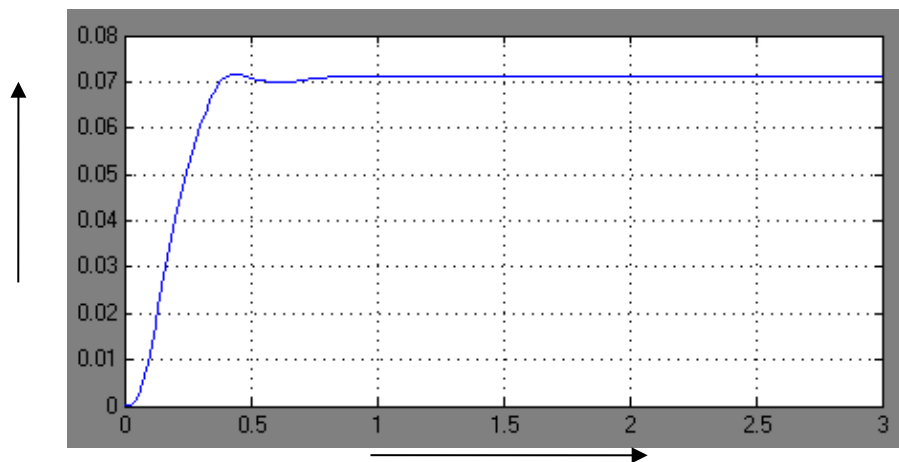
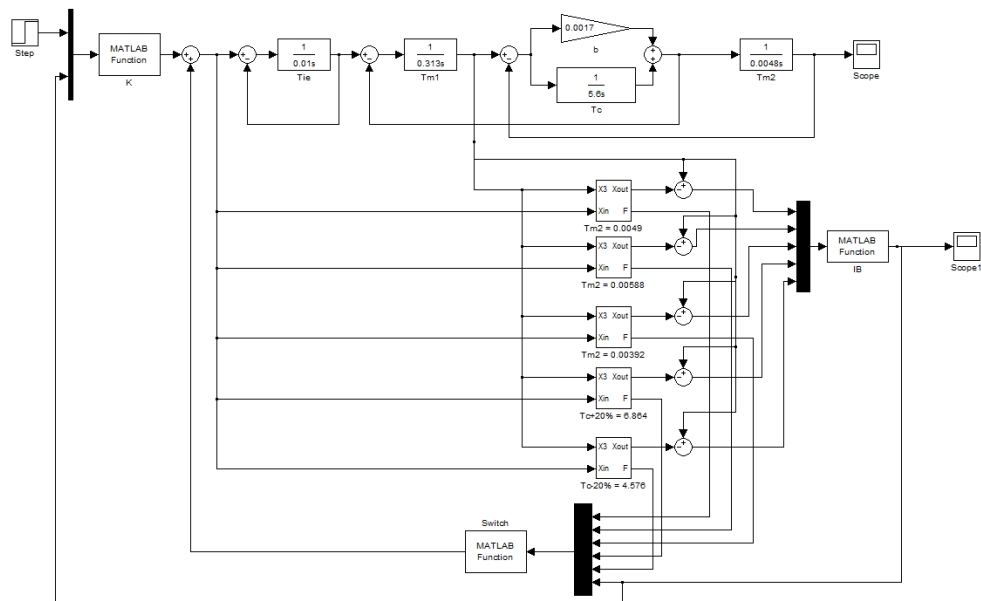


Рисунок 103 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурное наблюдающее устройство-регулятор» координаты

Произведем построение наблюдателя при условии, что измеряемая координата $x_3(t)$ и исследуем переходный процесс системы «объект-многоструктурное наблюдающее устройство-регулятор» координаты



Изменение параметра объекта в динамическом режиме для исследования многоструктурного наблюдателя (рисунке 106). Для данной структуры были рассчитаны логический блок, регуляторы и наблюдающие устройства, которые входят в многоструктурный наблюдатель.

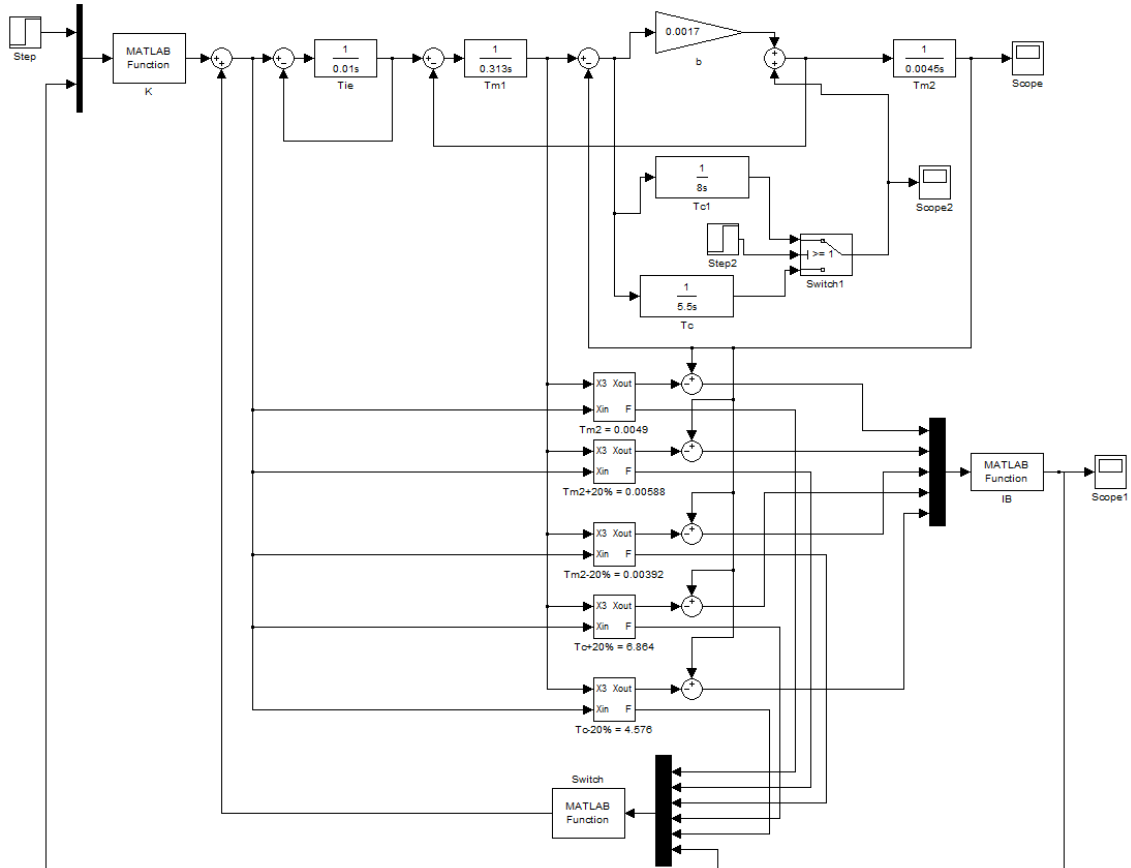


Рисунок 106 – Структурная схема «объект-многоструктурное наблюдающее устройство-регулятор»

В реальном времени изменение коэффициента жесткости упругой передачи показано на рисунке 107.

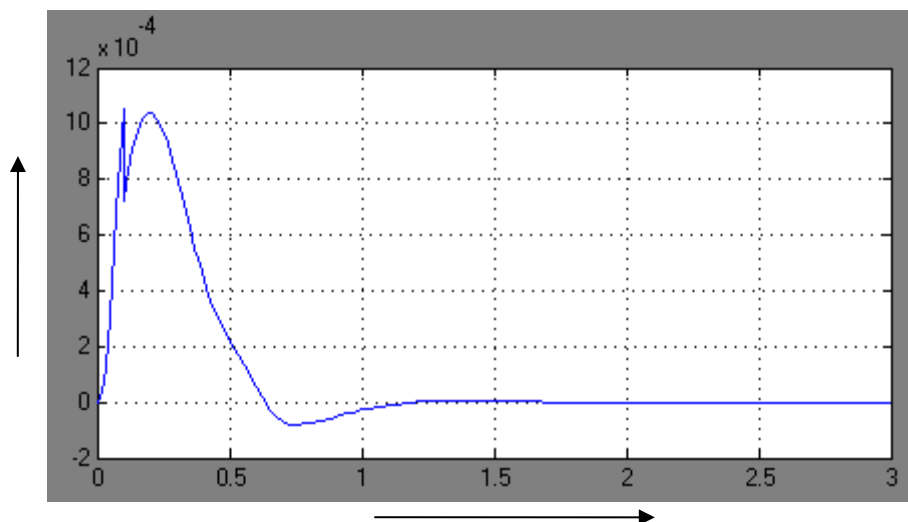
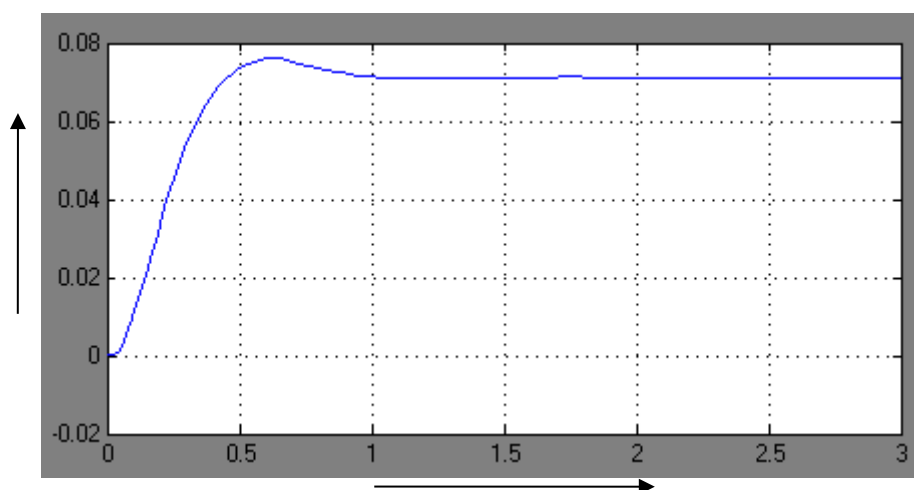


Рисунок 107 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурное наблюдающее устройство-регулятор» координаты



При подачи возмущающего воздействия на объект можем увидеть переходный процесс данной системы (рисунок 109).

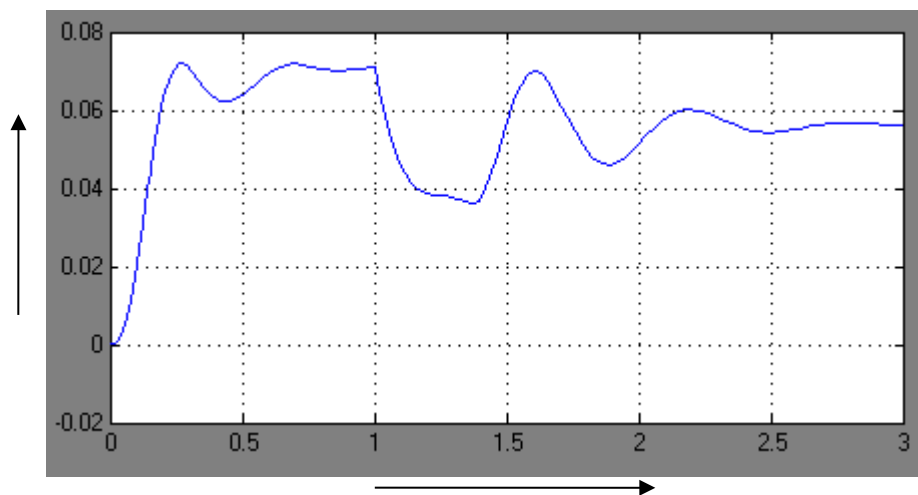


Рисунок 109 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурное наблюдающее устройство-регулятор» координаты

3.3.7 Синтез многоструктурного астатического наблюдателя при изменении двух переменных объекта

Для решения проблемы в многоструктурном наблюдателе с интеллектуальным блоком при подаче возмущающего воздействия необходимо разработать многоструктурный астатический наблюдатель с логическим блоком (рисунок 110). Для данной структуры были рассчитаны логический блок, регуляторы и наблюдающие устройства, которые входят в многоструктурный наблюдатель.

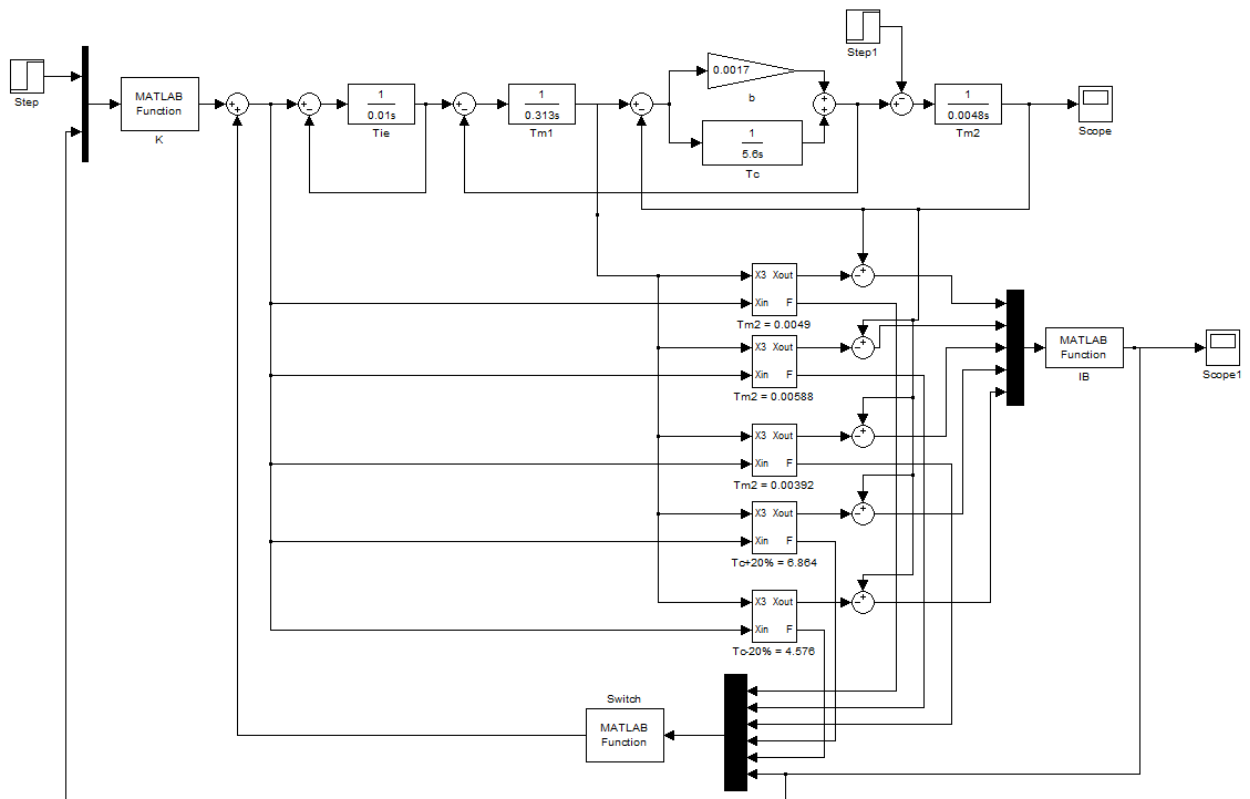


Рисунок 110 – Структурная схема «объект-многоструктурный астатический наблюдатель-регулятор»

По выходной координате объекта с многоструктурным астатическим наблюдателем с интеллектуальным блоком видно, что данный переходный процесс удовлетворяет нашим ожидания (рисунок 111). При изменении двух координат объекта и подаче возмущающего воздействия.

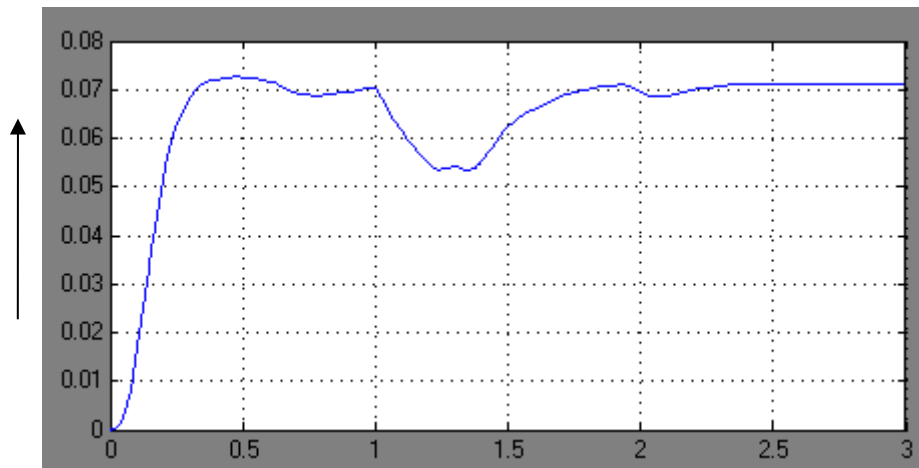


Рисунок 111 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурный астатический наблюдатель с логическим блоком» координат

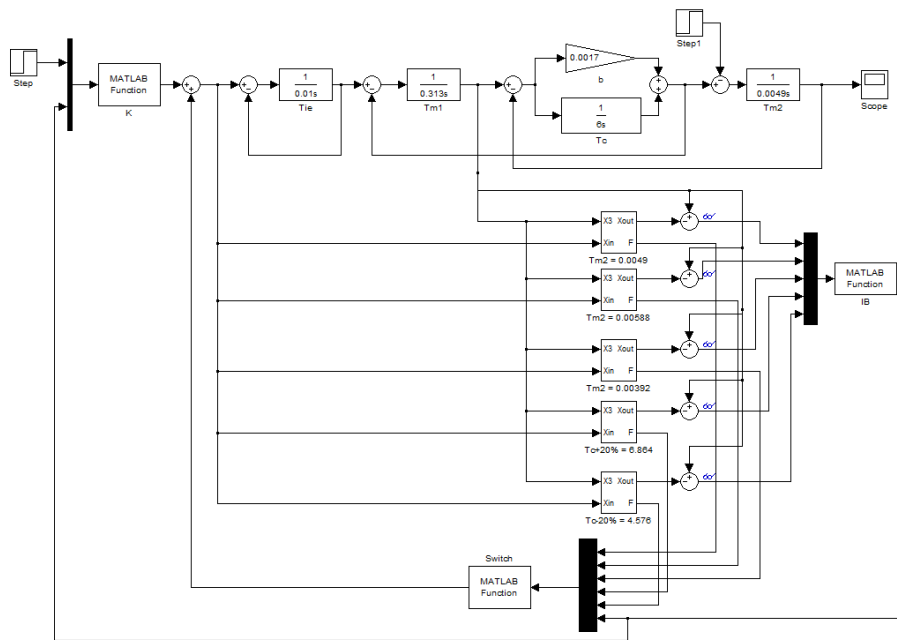


Рисунок 112 – Структурная схема «объект-многоструктурный астатический наблюдатель-регулятор»

По выходной координате объекта с многоструктурным астатическим наблюдателем с интеллектуальным блоком видно, что данный переходный процесс удовлетворяет нашим ожидания (рисунок 113). При изменении двух координат объекта и подаче возмущающего воздействия.

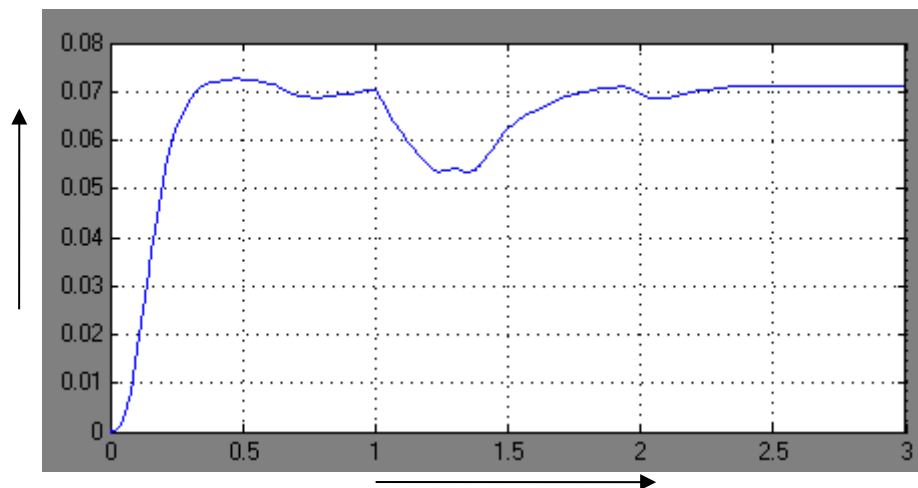


Рисунок 113 – Переходный процесс системы «объект-многоструктурный астатический наблюдатель с интеллектуальным блоком» координат

Заключение

В данной работе было проанализированы требования предъявляемые к оборудованию технологических процессов, в частности к электромеханической части. По научно-техническим источникам сформировалось математическое описание электромеханической системы с упругими связями.

Реализация модального, оптимального и адаптивного управления невозможны без наблюдающего устройства полного или пониженного порядка. Так как объект имеют неизмеряемые координаты.

Наблюдатель оценивает не поддающиеся измерению состояния объекта управления. В процессе работы возможны изменения параметров объекта, например, изменение механической постоянной времени в электромеханическом объекте. Тогда наблюдающее устройство оценивает координаты с ошибками и качество функционирования всей системы «объект-наблюдатель-регулятор» ухудшается и может привести к её не работоспособности. В этом случае используются адаптивные подходы.

Решения проблемы изменения параметров объекта в процессе функционирования системы достигалось применением многоструктурного наблюдателя. Многоструктурный подход обеспечил подключение различных структур наблюдателя в процессе функционирования системы. Переключение структур обеспечивает логический блок в зависимости от величины ошибки оценивания.

Результаты моделирования системы управления с многоструктурным наблюдателем показали эффективность, как в условиях дискретного изменения параметров, так и непрерывного. Количество структур определяется диапазоном изменения параметров.

Список использованных источников

- 1 Подураев, Ю. В. Основы мехатроники / Ю. В. Подураев. - М.:МГТУ «СТАНКИН», 2000. – 80 с.
- 2 Грабченко, А. И. Введение в мехатронику / А. И. Грабченко, В. Б. Клепиков. – Х.:НТУ «ХПИ», 2014.–264 с.
- 3 Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем / С. А. Воротников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 384 с.
- 4 Ямпольский Л. С. Промышленная робототехника / Л. С. Ямпольский, Е. Г. Вайсман. – К.: Техника, 1984. – 264 с.
- 5 Шурков В. Н. Основы автоматизации производства и промышленные роботы / В. Н. Шурков. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
- 6 Башарин А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
- 7 Горбачев Г. Н. Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
- 8 Иванов А. А. Роботизированные сборочные комплексы / А. А. Иванов, В. В. Сафронов. – М.: Машиностроение, 1995. – 370 с.
- 9 Евстегнеева М. Ю. Роботы и автоматизация производства / М. Ю. Евстегнеева. – М.: Машиностроение, 1989. – 448 с.
- 10 Попов Е. П. Робототехника и гибкие производственные системы / Е. П. Попов. – М.: Наука, 1987. – 192 с.
- 11 Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – СПб.: Питер, 1992. – 288 с.
- 12 Башарин А. В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ / А. В. Башарин, Ю. В. Постников. – Л.: Энергоатом издат, 1990. – 512 с.

- 13 Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И. В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2013. – 336 с.
- 14 Куропаткин, П. В. Теория автоматического управления / П. В. Куропаткин. – М. : Высшая школа, 1972. – 520 с.
- 15 Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.
- 16 Андриевский, Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке Matlab / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 2000. – 475 с.
- 17 Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование / Н.Н. Иващенко - 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1978. – 352с.
- 18 Бесекерский, В.А. Теория автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб. : Профессия, 2004. – 749с.
- 19 Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления / А.А. Первозванский. – М. : Наука, 1986. – 540с.
- 20 Квашнин, И.М. Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация / И.М.Квашнин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. – 392с.
- 21 Рагулин, П.Г. Информационные технологии. / П.Г. Рагулин — Владивосток: ТИДОТ Дальневост. ун-та, 2014. - 208 с.
- 22 Карнаухов, Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы. / Н.Ф. Карнаухов -Ростов н/Д: Феникс, 2015. 320 с.
- 22 Компэл. Электронные компоненты. Дистрибьюция и сервисы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.compel.ru>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 10.04.2017).
- 23 inSAT. Интеллектуальные системы автоматизации технологии [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.insat.ru>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 21.04.2017).