Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт

«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия
« ____» _____ 20 __ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

«Электропривод постоянного тока системы подчиненного регулирования координат»
тема

Руководитель _____ профессор, д.т.н. В.П.Кочетков
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник _____ С.Г.Пидюров
подпись, дата инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____ И.А.Кычакова
подпись, дата инициалы, фамилия

Абакан 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение5

1 Математическое описание объекта управления постоянного тока**Ошибка! Закладка не определена.**

2 Синтез систем подчинённого регулирования**Ошибка! Закладка не определена.**

2.1 Трёхконтурная система подчинённого регулирования**Ошибка! Закладка не определена.**

2.2 Двухконтурная система подчинённого регулирования**Ошибка! Закладка не определена.**

2.3 Двухмассовые электромеханические системы с последовательной коррекцией координат **Ошибка! Закладка не определена.**

2.3.1 Четырехконтурная система подчиненного регулирования **Ошибка! Закладка не определена.**

2.3.2 Пятиконтурная система подчиненного регулирования **Ошибка! Закладка не определена.**

3 Исследование динамики электропривода с последовательной коррекцией координат**Ошибка! Закладка не определена.**

Заключение58

Список использованных источников**Ошибка! Закладка не определена.**

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Ошибка! Закладка не определена.**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Ошибка! Закладка не определена.**PAGEREF _Toc454344999 \hОшибка: источник перекрёстной ссылки не найден

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Ошибка! Закладка не определена.**

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящий момент в Российской Федерации имеется крупный парк экскаваторов, включающий достаточно большую долю карьерных экскаваторов, которые производят горные работы со скальными породами и мерзлыми грунтами в более экстремальных условиях по сравнению с остальными. Эффективность функционирования карьерных экскаваторов, как наиболее важных элементов горнодобывающей отрасли, непосредственно влияет на себестоимость добычи полезных ископаемых.

Внедрение оптимизированного регулируемого электропривода экскаваторов позволит решить важные задачи, прежде всего, увеличение эксплуатационной надежности и повышение производительности. Оптимизация управления технологией экскавации дает возможность решения проблемы повышения производительности за счет снижения времени переходного процесса, а снижение динамических нагрузок в упругих элементах ведет к увеличению эксплуатационной надежности.

Ряд горных машин для открытых горных работ, шахтных электровозов и прочие электропривода базируются в основе на регулируемых двигателях постоянного тока.

Унифицированная структура экскаваторного электропривода В.И. Ключева, из всего многообразия используемых систем управления главными механизмами экскаваторов с электроприводами, в настоящее время нашла наибольшее применение.

Таким образом, вышесказанное определяет актуальность научно-технических задач, рассматриваемых в работе.

Цель работы: Ограничение динамических нагрузок и снижение времени рабочих процессов автоматизированных электроприводов постоянного тока, для повышения производительности одноковшовых экскаваторов путем разработки и исследования систем подчиненного регулирования координат.

Для достижения поставленной цели в работе решены **следующие задачи:**

1. Анализ основных элементов и способов управления электроприводами постоянного тока.

2. Синтез систем подчиненного регулирования координат и алгоритмов управления электроприводом постоянного тока механизмов экскаватора.

3. Имитационное моделирование синтезированных систем подчиненного регулирования координат электропривода постоянного тока.

Объект исследования – автоматизированный электропривод постоянного тока экскаватора.

Предмет исследования – ограничивающие нагрузку электропривода системы подчиненного регулирования координат.

Методы исследования, используемые при решении задач в работе, основаны на теории электропривода, оптимального управления Летова-Калмана, последовательной коррекции Кесслера, вычисления и компьютерного имитирования с использованием среды *MatLab Simulink*.

Практическая значимость работы:

1. Синтезированы системы подчиненного регулирования координат электроприводов постоянного тока механизмов экскаватора.

2. Разработаны модели для имитационного моделирования синтезированных систем подчинённого регулирования координат электроприводов постоянного тока механизмов экскаватора.

3. Получены и проанализированы результаты моделирования систем подчинённого регулирования координат электроприводов пистонного тока механизмов экскаватора

Достоверность и обоснованность полученных результатов работы определяется обоснованностью принятых допущений, допустимой сходимостью выводов и результатов моделирования.

1 Математическое описание объекта управления электропривода постоянного тока

Экскаватор – это сложный механизм, который содержит многодвигательный привод по системе «генератор – двигатель» (далее Г–Д) с одним гонным двигателем асинхронным или синхронным, на валу с которым находятся генераторы напора, подъема и поворота, иногда на валу еще находится и возбудитель. Генератор напора питает двигатель напорного механизма, генератор подъема питает один или два двигателя подъема, число которых зависит от объема ковша экскаватора, генератор поворота, который питает два, либо три или четыре, причем каждый двигатель имеет соответствующий редуктор. Гонный двигатель, генераторы и возбудитель называют пятимашинным преобразовательным агрегатом. Система Г–Д на некоторых экскаваторах в России и за рубежом заменена на систему «тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП–Д) главных приводов. В России на двадцатикубовых экскаваторах ЭКГ-20 внедрена система ТП–Д.

Привод переменного тока в России был только в опытном производстве разработан В.И. Ключевым с системой НПЧ (непосредственный преобразователь частоты). На Красноярском заводе тяжелых экскаваторов КЗТЭ, был разработан привод ПЧ–АД («преобразователь частоты – асинхронный двигатель») с девятифазными двигателями на экскаваторах ЭКГ-12,5.

В России на предприятиях Минцвета на экскаваторах ЭКГ–4,6 была внедрена система ТП-Д, а затем ее снова заменили на систему Г–Д. За рубежом небольшое число экскаваторов оснащены по системе ТП–Д и есть экскаваторы, оснащенные приводом переменного тока ПЧ–АД [1].

Рассмотрим экскаватор ЭКГ-8. Он имеет электрический привод полноповоротный. Предназначен для разработки и погрузки в транспортные средства или в отвал полезных ископаемых и пород вскрыши на открытых горных работах в черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов, угольной промышленности, а также для выполнения

больших объемов земляных работ в промышленном строительстве. Экскаватор ЭКГ-8И (Рисунок 1) состоит из рабочего оборудования, поворотной платформы с установленными на ней механизмами и ходовой тележки. Рабочее оборудование включает в себя стрелу, рукоять, ковш с подвеской, механизм открывания днища ковша и подвеску стрелы. Шарнирно-сочлененная стрела состоит из нижней и верхней секций сварной конструкции трубчатого сечения. Стрела воспринимает нагрузки от ковша с рукоятью и передает их на поворотную платформу и подвеску стрелы. Рукоять соединена со стрелой подвижно качающимся седловым подшипником. Ковш подвешен на подъемном канате, огибающем головные блоки на стреле. Подвеска стрелы шарнирно соединена с двуногой стойкой, передающей нагрузки от стрелы на поворотную платформу [5].

Поворотная платформа служит основанием для установленных на ней механизмов экскаватора и рабочего оборудования и составляет вместе с ними поворотную часть экскаватора. Рама поворотной платформы является одновременно корпусом противовеса экскаватора. На поворотной платформе установлены подъемная лебедка, механизм поворота, напорная лебедка, компрессор, кузов экскаватора, кабина машиниста с органами управления. Поворотная платформа опирается на роликовый круг, лежащий на кольцевом рельсе ходовой тележки, и соединяется с ходовой тележкой центральной цапфой. Ходовая тележка служит опорой всей вращающейся части экскаватора. Конструктивно ходовая тележка состоит из нижней рамы сварной конструкции, гусеничного хода, ходовых механизмов индивидуального привода гусениц и зубчатого венца с роликовым кругом. Напорный механизм служит для сообщения рукояти возвратно-поступательного движения. Механизм состоит из напорной лебедки и канатов. Лебедка имеет привод от электродвигателя, соединенного с редуктором фрикционной муфтой предельного момента. На выходные валы редуктора насажены барабаны. Торможение напорного механизма при работе осуществляется противотоком. Для затормаживания механизма напора при остановке машины предусмотрен колодочный

пневматический тормоз механизма подъема. Подъемный механизм служит для подъема и опускания ковша. Механизм состоит из подъемной лебедки и канатов. Лебедка приводится в движение двумя электродвигателями, соединенными с редуктором двумя упругими муфтами. На выходные валы редуктора насажены барабаны, на которых крепятся подъемные канаты [1,5].

Торможение подъемного механизма при работе осуществляется противотоком. Для затормаживания механизма подъема при остановке машины и обесточивании экскаватора предусмотрены два колодочных пневматических тормоза, связанных с тормозом механизма напора. Поворотный механизм экскаватора служит для вращения поворотной платформы с механизмами и рабочим оборудованием. Привод поворота осуществляется двумя одинаковыми механизмами, каждый из которых состоит из электродвигателя и редуктора. На верхнем коническом конце вала каждого электродвигателя установлен тормозной шкив для колодочного тормоза, предназначенного для затормаживания механизма поворота при передвижении экскаватора, на стоянке и при аварийном обесточивании, а на нижнем конце закреплена шестерня, являющаяся ведущей шестерней редуктора поворота. Консольный выходной вал редуктора заканчивается бегунковой шестерней, сцепленной с неподвижным зубчатым венцом, расположенным на нижней раме ходовой тележки экскаватора, Пневматическая схема служит для управления тормозами поворота, подъема и напора, обдува сжатым воздухом электрооборудования и механизмов, управления входной лестницей, подачи сигнала и привода различного пневматического инструмента. Воздух нагнетается компрессорной станцией, которая состоит из компрессора ВВ-О7/8 с приводом от электродвигателя и двух последовательно соединенных воздухосборников. Общий объем воздухосборников 47 л. На всасывающем патрубке компрессора установлен воздушный фильтр. На нагнетательной трубе перед воздухосборником установлены маслоотделитель со спускным краном и обратный клапан.

Ходовой механизм служит для перемещения экскаватора ЭКГ-8 и состоит из электродвигателя, тормоза, редуктора и бортовых передач гусеничного хода. Электродвигатель установлен на корпусе редуктора, который прикреплен к гусеничной раме, и соединен с ним эластичной муфтой, служащей одновременно тормозным шкивом электромагнитного тормоза. Новым в практике отечественного и зарубежного экскаваторостроения для машин данного класса является установка раздельного привода на каждую гусеницу механизма хода. Зубчатые передачи всех механизмов заключены в пыленепроницаемые масляные ванны, а их валы смонтированы на подшипниках качения. Механизмы, расположенные на поворотной платформе (кроме напорного), закрыты металлическим кузовом, который снабжен принудительной вентиляцией и внутренним освещением. Поднятая над кузовом кабина машиниста обеспечивает хорошую обзорность, просторна, герметизирована, снабжена системой отопления, вентиляции и обогрева стекол. Экскаватор имеет ряд вспомогательных механизмов, обеспечивающих выполнение ремонтных и монтажных работ.

Функциональные схемы электромеханической системы электропривода постоянного тока будут иметь вид, представленный на рисунках 1.1, 1.2:

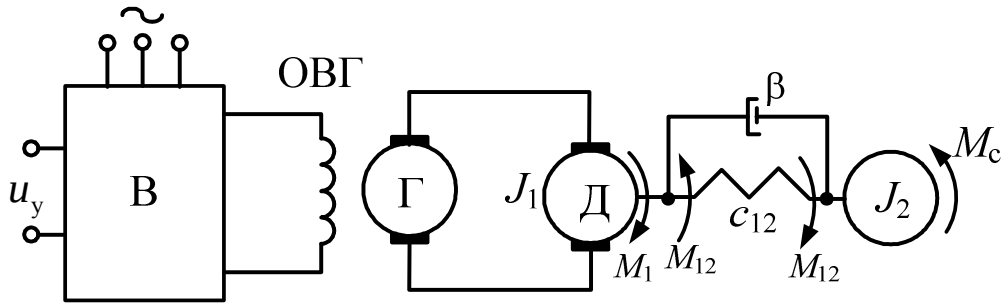


Рис. 1.1 – Функциональная схема двухмассовой ЭМС генератор – двигатель

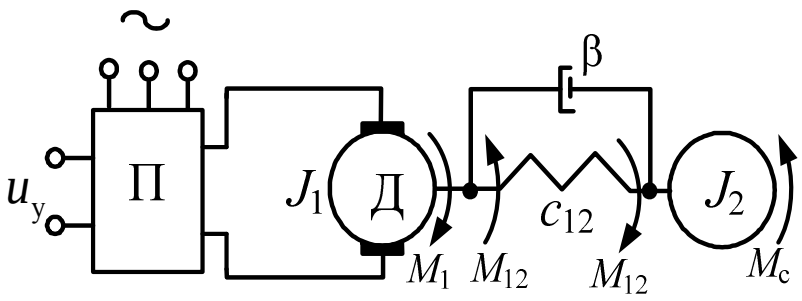


Рис. 1.2 – Функциональная схема двухмассовой ЭМС управляемый преобразователь – двигатель

Электрическая часть может быть описана при помощи баланса напряжений для цепи возбуждения генератора и якорной цепи в системе Г-Д и для якорной цепи в системе УП–Д [1, 5]. При этом сначала возбудитель генератора и управляемый преобразователь принимаются безынерционными с коэффициентами передачи соответственно $K_в$ и $K_п$, пренебрегается гистерезисом, насыщением магнитной цепи, рассеянием потока и влиянием вихревых токов генератора.

С учетом перечисленных допущений математические описания электрической части будут иметь следующий вид:

для системы Г-Д

$$\begin{cases} K_в u_у = i_в R_в + L_в \dfrac{di_в}{dt} \\ K_г i_в = i_a R_a + L_a \dfrac{di_a}{dt} + C_e \omega_1 \end{cases},$$

где $K_в u_у = u_в$, $K_г i_в = u_г$,

для системы УП-Д

$$K_п u_у = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C_e \omega_1$$

где $K_{\text{п}} u_{\text{у}} = u_a$.

В канонической форме:

для системы Г-Д

$$\begin{cases} \dfrac{di_{\text{в}}}{dt} = -\dfrac{R_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} i_{\text{в}} + \dfrac{K_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} u_{\text{у}} \\ \dfrac{di_a}{dt} = -\dfrac{R_a}{L_a} i_a - \dfrac{C_e K_{\text{г}}}{L_a} \omega_{1\text{в}} + \dfrac{K_{\text{г}}}{L_a} i \end{cases},$$

для системы УП-Д

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{C_e K_{\text{п}}}{L_a} \omega_{1\text{у}} + \frac{K_{\text{п}}}{L_a} u,$$

где u_y – напряжение управления; $R_{\text{в}}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения; $i_{\text{в}}$ – ток возбуждения генератора; R_a – активное сопротивление якорной цепи; i_a – ток якорной цепи; C_e – электромагнитная конструктивная постоянная двигателя.

Остальные параметры вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

Коэффициент передачи возбудителя:

$$K_{\text{в}} = U_{\text{в}} / U_{\text{у.н}},$$

где $U_{\text{в}}$ – номинальное напряжение возбуждения генератора; $U_{\text{у.н}}$ – номинальное напряжение управления.

Коэффициент передачи управляемого преобразователя:

$$K_{\text{п}} = U_{\text{д.н.}} / U_{\text{у.н}},$$

3

где $U_{д.н.}$ – номинальное напряжение якорной цепи.

Индуктивность генератора при допущении линейности:

$$L_в = \left(p_г N_г \Phi_{г.н} \right) / I_{в.н} ,$$

где $p_г$ – число полюсов генератора; $N_г$ – число витков на полюсе генератора; $\Phi_{г.н}$ – номинальный поток полюса генератора; $I_{в.н}$ – номинальный ток возбуждения генератора.

Коэффициент передачи генератора:

$$K_г = U_{г.н} / I_{в.н} ,$$

где $U_{г.н}$ – номинальное напряжение генератора.

Активное сопротивление якорной цепи при системе Г-Д:

$$R_a = R_{a.д} + R_{a.г} ,$$

где $R_{a.д} = K_t \left(R_{я.д} + R_{д.п.д} \right) + R_{щ.д}$, $R_{я.д}$ – сопротивление якоря двигателя; $R_{д.п.д}$ – сопротивление дополнительных полюсов двигателя; $R_{щ.д} = 2 / I_{д.н}$ – сопротивление щеток двигателя; $I_{д.н}$ – номинальный ток двигателя, $R_{a.г} = K_t \left(R_{я.г} + R_{д.п.г} + R_{к.о.г} \right) + R_{щ.г}$, $R_{я.г}$ – сопротивление якоря генератора; $R_{д.п.г}$ – сопротивление дополнительных полюсов генератора; $R_{щ.г} = 2 / I_{г.н}$ – сопротивление щеток генератора; $I_{г.н}$ – номинальный ток генератора, $R_{к.о.г}$ – сопротивление компенсационной обмотки генератора.

Активное сопротивление якорной цепи при системе УП-Д:

$$R_a = R_{a.д} + R_п,$$

где $R_п$ – сопротивление управляемого преобразователя и дросселя.

Индуктивность якорной цепи при системе Г-Д:

$$L_{aa} = L_{.да} + L_{.г},$$

где $L_{a.д} = 0,6U_{д.н} / \left(p_д \omega_{д.н} I_{a.д.н} \right)$ – индуктивность двигателя; $\omega_{д.н}$ – номинальная частота вращения двигателя; $p_д$ – число полюсов двигателя; $L_{a.г} = U_{г.н} / \left(p_г \omega_{г.н} I_{г.н} \right)$ – индуктивность генератора; $U_{г.н}$ – номинальное напряжение генератора; $\omega_{г.н}$ – номинальная частота вращения генератора; $p_г$ – число полюсов генератора.

Индуктивность якорной цепи при системе УП-Д:

$$L_{aa} = L_{.д} + L_д,$$

где $L_д$ – индуктивность дросселя $L_{д.max} = 0,296\left(U_{уп.н.} / I_{ур} \right)$, $L_{д.min} = 1,1\left(U_{уп.н.} / I_{д.н.} \right)$; $U_{уп.н.}$ – номинальное напряжение управляемого преобразователя.

Конструктивная постоянная:

$$C = \left(U_{д.н} - I_{д.н} R_{a.д} \right) / \omega_{д.н}.$$

Механическая часть электропривода представляет собой, как правило, сложную систему, состоящую из инерционных тел – роторов (якорей) электродвигателей вращательного движения, соединительных муфт, редукторов, барабанов и т.п., связанных между собой упругими звеньями – канатами, валоприводами и т.п. (рисунок 1.3-1.4).

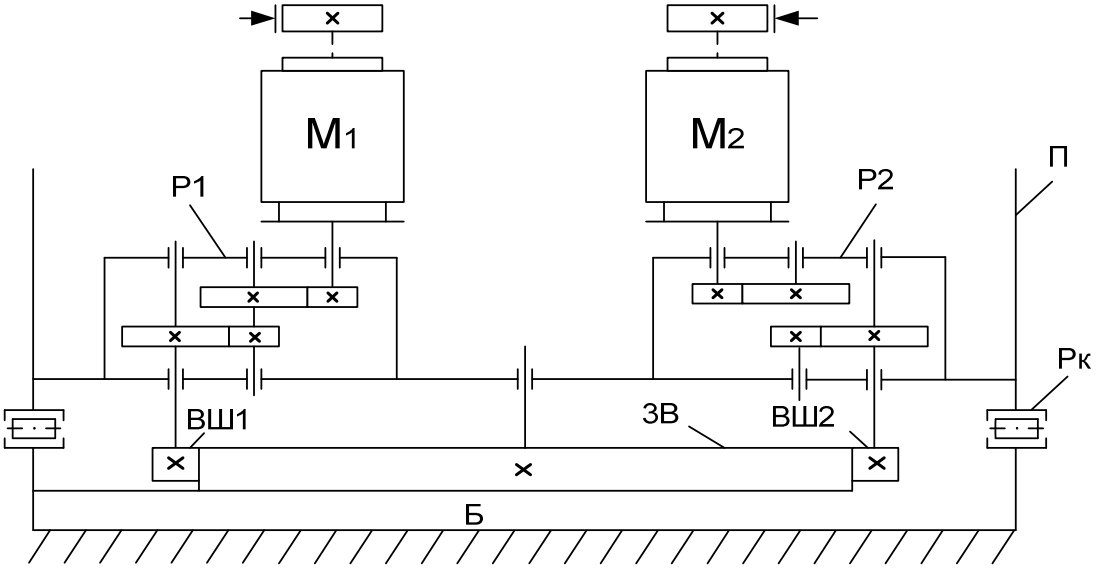
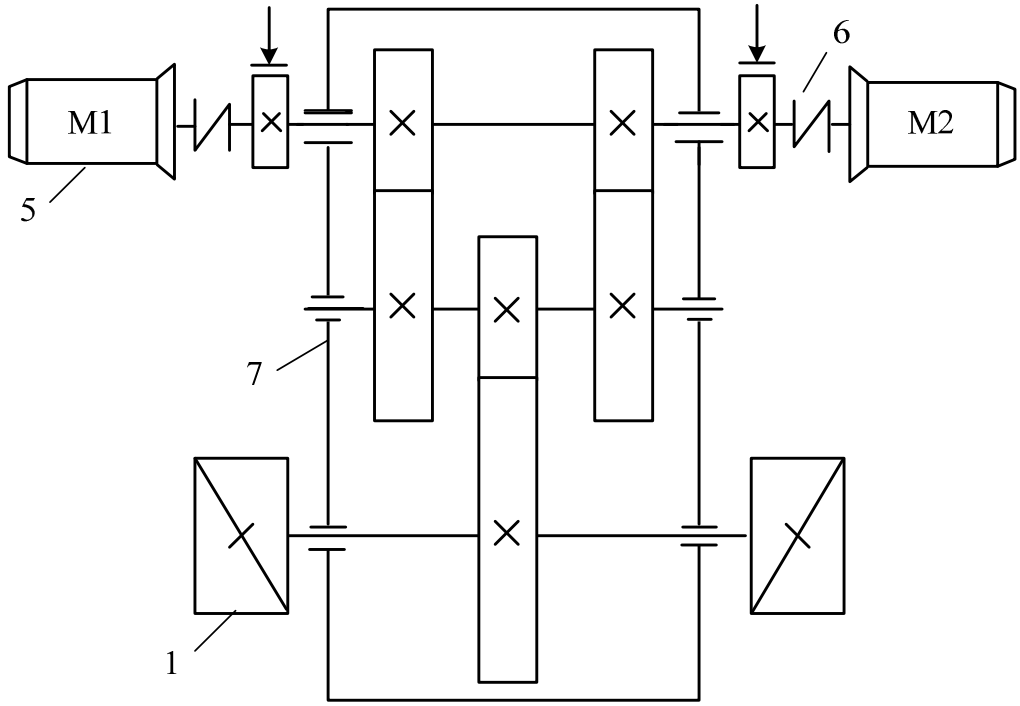


Рисунок 1.3 – Кинематическая схема механизма поворота



1 – барабаны подъемной лебедки, 2 – головные блоки стрелы, 3 – блоки подвески ковша, 4 – уравнительные полублоки стрелы, 5 – электродвигатель, 6 – муфта предельного момента, 7 – корпус редуктора.

Рисунок 1.4 – Кинематическая схема механизма подъема экскаватора ЭКГ-8И

При анализе динамики механической части электропривода реальный механизм заменяется эквивалентной, приведенной расчетной схемой. Несмотря

на разнообразие схем основных механизмов экскаваторов лопат с индивидуальным приводом, полные расчетные схемы их как упругих динамических систем мало отличаются друг от друга и достаточно точно могут быть представлены двухмассовой системой [13, 16]. Для синтеза регуляторов электропривода и для анализа поведения системы без учета зазоров, а также с одинаковыми зазорами в передачах целесообразно использовать двух- и одномассовые системы [14, 24].

Математическая модель двухмассовой системы (1.1)

$$\begin{cases} \dfrac{d\omega_1}{dt} = \dfrac{1}{J_1}M - \dfrac{1}{J_1}M_{\text{у}} \\ \dfrac{dM_{\text{у}}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_{2}) + \beta_1 \ (\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}) \\ \dfrac{d\omega_2}{dt} = \dfrac{1}{J_2}M_{\text{у}} - \dfrac{1}{J_2}M_{\text{с}} \end{cases}, \qquad (1.1)$$

где $M = i_a C_{\text{м}}$ – момент двигателя; $C_{\text{м}}$ – конструктивная постоянная; ω_1, ω_2 – угловые скорости двигателя и механизма; $M_{\text{у}}$ – упругий момент; J_1, J_2 – приведенные моменты инерции двигателя и механизма; c_{12} – эквивалентная жесткость; $\beta_{\text{в.т}}$ – коэффициент вязкого трения.

Математическое описание двухмассовой электромеханической системы с электроприводом по системе генератор–двигатель (1.2):

$$\begin{cases} \dfrac{di_{\text{в}}}{dt} = -\dfrac{R_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} i_{\text{в}} + \dfrac{K_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} u_{\text{у}} \\ \dfrac{di_a}{dt} = \dfrac{K_{\text{г}}}{L_a} i_{\text{в}} - \dfrac{R_a C_e}{L_a} i_a - \dfrac{e}{L_a} \omega_1 \\ \dfrac{d\omega_{1\text{м}}}{dt} = \dfrac{C}{J_1} i_a - \dfrac{1}{J_1} M_{\text{у}} \\ \dfrac{dM_{\text{у}}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_{2\text{в.т}}) + \beta_1 \left(\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}\right) \\ \dfrac{d\omega_2}{dt} = \dfrac{1}{J_2} M_{\text{у}} - \dfrac{1}{J_2} M_{\text{с}} \end{cases} \tag{1.2}$$

и с электроприводом по системе управляемый преобразователь –двигатель (1.3)

$$\begin{cases} \dfrac{di_a}{dt} = -\dfrac{R_a C_e}{L_a} i_a - \dfrac{e K_{\text{п}}}{L_a} \omega_{1\text{у}} + \dfrac{}{L_a} u \\ \dfrac{d\omega_{1\text{м}}}{dt} = \dfrac{C}{J_1} i_a - \dfrac{1}{J_1} M_{\text{у}} \\ \dfrac{dM_{\text{у}}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_{2\text{в.т}}) + \beta_1 \left(\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}\right) \\ \dfrac{d\omega_2}{dt} = \dfrac{1}{J_2} M_{\text{у}} - \dfrac{1}{J_2} M_{\text{с}} \end{cases} \tag{1.3}$$

Структурные схемы двухмассовой системы объекта управления, описываемым системами уравнений (1.2, 1.3), изображены на рисунках 1.5, 1.6.

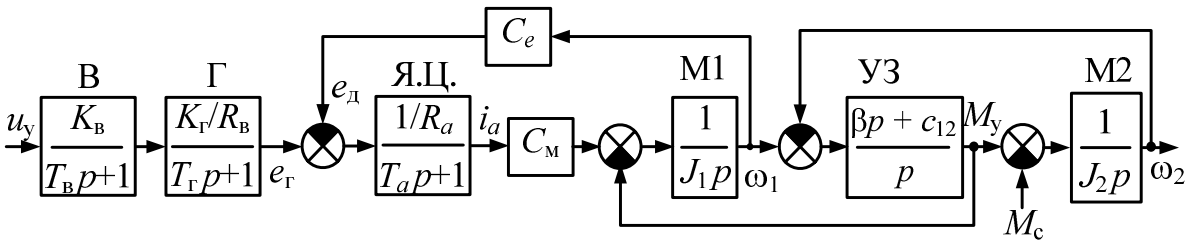


Рис. 1.5 – Структурная схема двухмассовой ЭМС генератор–двигатель.

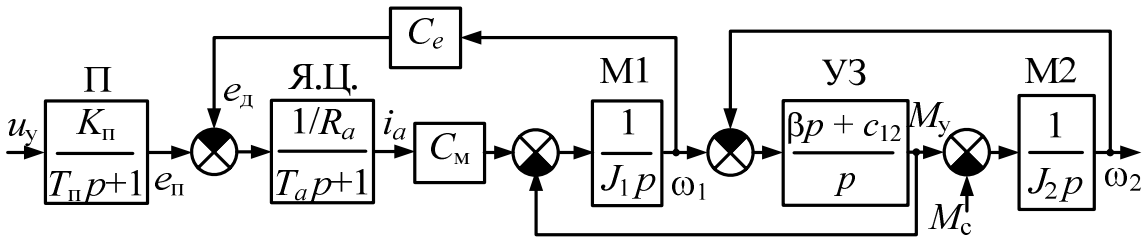


Рис. 1.6 – Структурная схема двухмассовой ЭМС УП-Д.

В схеме $C_м = C_e = C$, в системе СИ, $T_в$ = 0,01 с – постоянная времени возбудителя генератора, $T_п$ = 0,005–0,01 с – постоянная времени преобразователя, $T_г = \frac{L_в}{R_в}$ – постоянная времени возбуждения генератора, $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ – постоянная времени якорной цепи.

Часто при синтезе систем управления пренебрегают упругими связями в передачах и ЭМС рассматривают одномассовой. Математическая модель одномассовой системы типа Г-Д представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_в}{dt} = \frac{K_в}{L_в} u_у - \frac{R_в}{L_в} i_в \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_г}{L_a} i_в - \frac{R_a C}{L_a} i_a - \frac{e}{L_a} \omega_\Sigma \\ \frac{d\omega_\Sigma}{dt} = \frac{C_м}{J_\Sigma} i_a - \frac{1}{J_\Sigma} M_с \end{cases}, \qquad (1.4)$$

где ω_Σ – угловая скорость одномассовой системы, $J_\Sigma = J_1 + J_2$ – суммарный приведенный момент инерции.

Математическая модель одномассовой системы типа УП-Д

$$\begin{cases} \dfrac{di_a}{dt} = -\dfrac{RC}{L_a} i_a - \dfrac{e}{L_a} K \omega_\Sigma + \dfrac{\text{п}}{L_a} u_\text{у} \\ \dfrac{d\omega_\Sigma}{dt} = \dfrac{C_\text{м}}{J_\Sigma} i_a - \dfrac{1}{J_\Sigma} M_\text{с} \end{cases} \qquad (1.5)$$

Структурные схемы одномассовой системы объекта управления, описываемым системами уравнений (1.4, 1.4), изображены на рисунках 1.7, 1.8.

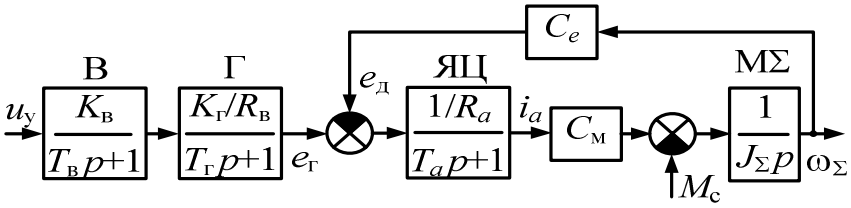


Рис.1.7 – Структурная схема одномассовой ЭМС с электроприводом по системе генератор – двигатель

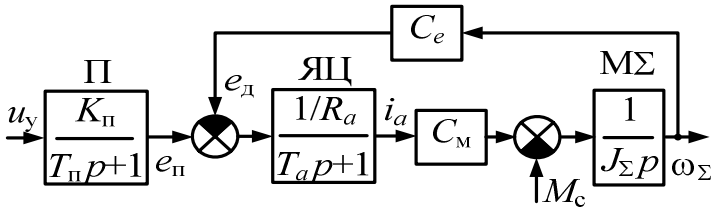


Рис.1.8 – Структурная схема одномассовой ЭМС с электроприводом по системе УП-Д

Для удобства исследования динамики представим математическую модель системы в относительных единицах, тогда координаты электропривода рассматриваются относительно их базовых значений. Для этого каждое звено умножим на входную базовую величину и разделим на выходную базовую величину. В качестве базовых для напряжений управления, возбуждения, якорной цепи, тока возбуждения, и угловых скоростей выбираем соответствующие номинальные значения. Для тока якорной цепи в качестве базового принимаем максимальное (стопорное) значение тока якоря двигателя, для момента – максимальный суммарный момент всех двигателей.

В относительных единицах имеем: $K_{\text{в}}^{*}=\frac{K_{\text{в}}U_{\text{у.б}}}{U_{\text{в.б}}}$, $K_{\text{п}}^{*}=\frac{K_{\text{п}}U_{\text{у.б}}}{U_{a.\text{б}}}$, $K_{\text{г}}^{*}=1$, $R_{\text{в}}^{*}=1$, $C_{e}^{*}=C_{\text{м}}^{*}=1$, $R_{a}^{*}=\frac{R_{a}I_{a.\text{б}}}{U_{a.\text{б}}}$, $J_{1}^{*}=\frac{J_{1\text{б}}\omega}{M_{\text{б}}}$, $c_{12}^{*}=\frac{c_{12\text{б}}\omega}{M_{\text{б}}}$, $J_{2}^{*}=\frac{J_{2\text{б}}\omega}{M_{\text{б}}}$, $J_{\Sigma}^{*}=\frac{J_{\Sigma}\omega_{\text{б}}}{M_{\text{б}}}$.

Все дальнейшие расчеты ведутся в относительных единицах, поэтому знак звездочки опускаем.

Часто при анализе и синтезе управления системы с несколькими выходными координатами и управляющими воздействиями удобно математическое описание представлять в векторно-матричной форме. Для этого в четвертое уравнение системы (1.2) и третье уравнение системы (1.3) подставим значения производных скоростей первой и второй массы:

$$\begin{cases}\frac{di_{\text{в}}}{dt}=-\frac{1}{T_{\text{г}}}i_{\text{в}}+\frac{K_{\text{в}}R_{\text{в}}}{T_{\text{г}}}u_{\text{у}}\\ \frac{di_{a}}{dt}=\frac{K_{\text{г}}R_{a}}{T_{a}}i_{\text{в}}-\frac{1}{T_{a}}i_{a}-\frac{R_{a}C_{e}}{T_{a}}\omega_{1}\\ \frac{d\omega_{1\text{м}}}{dt}=\frac{C}{J_{1}}i_{a}-\frac{1}{J_{1}}M_{\text{у}}\\ \frac{dM_{\text{у}}}{dt}=\frac{\beta_{\text{в.т}}C_{\text{м}}}{J_{1}}i_{a}+c_{12}\omega_{1\text{в.т}}-\beta\quad\frac{J_{1}+J_{2}}{J_{1}J_{2}}M_{\text{у}}-c_{12}\omega\\ \frac{d\omega_{2}}{dt}=\frac{1}{J_{2}}M_{\text{у}}-\frac{1}{J_{2}}M_{\text{с}}\end{cases},$$

$$\begin{cases}\frac{di_{a}}{dt}=-\frac{1}{T_{a}}i_{a}-\frac{R_{a}C_{e}}{T_{a}}\omega_{1\text{у}}+\frac{K_{\text{п}}R_{a}}{T_{a}}u\\ \frac{d\omega_{1\text{м}}}{dt}=\frac{C}{J_{1}}i_{a}-\frac{1}{J_{1}}M_{\text{у}}\\ \frac{dM_{\text{у}}}{dt}=\frac{\beta_{\text{в.т}}C_{\text{м}}}{J_{1}}i_{a}+c_{12}\omega_{1\text{в.т}}-\beta\quad\frac{J_{1}+J_{2}}{J_{1}J_{2}}M_{\text{у}}-c_{12}\omega\\ \frac{d\omega_{2}}{dt}=\frac{1}{J_{2}}M_{\text{у}}-\frac{1}{J_{2}}M_{\text{с}}\end{cases}$$

Таким образом, математическое описание экскаваторного электропривода в векторно-матричной форме будет иметь вид [6]:

$$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{A}x+\boldsymbol{b}u+\boldsymbol{d}f\,,$$

где $\boldsymbol{x} = (x_1, \ldots, x_n)^{\mathrm{T}}$ – n-мерный вектор состояния системы, u – управление, f – возмущение (M_{c}) $\mathbf{A}$ – $n \times n$-мерная матрица коэффициентов ЭМС, $\boldsymbol{b}$ – матрица-вектор коэффициентов при управлении размера $n \times 1$, $\boldsymbol{d}$ – матрица-вектор коэффициентов при возмущении размера $n \times 1$

Для двухмассовой ЭМС с электоприводом Г-Д:

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} i_{\mathrm{в}} \\ i_a \\ \omega_1 \\ M_y \\ \omega_2 \end{bmatrix},\quad \mathbf{A}=\begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{\mathrm{г}}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{\mathrm{г}}RC}{T_a} & R & -\frac{1}{T_a} & -\frac{e\ a}{T_a} & 0 \\ 0 & \frac{C_{\mathrm{м}}}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{\beta_{\mathrm{в.т}}C_{\mathrm{м}}}{J_1} & c_{12\mathrm{в.т}} & \beta & \frac{J_1+J_2}{J_1J_2^{12}} \quad c \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{b}=\begin{bmatrix} \frac{K_{\mathrm{в}}R_{\mathrm{в}}}{T_{\mathrm{г}}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{d}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix}^{\grave{\mathrm{o}}}.$$

для одномассовой ЭМС с электоприводом Г-Д:

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} i_{\text{в}} \\ i_a \\ \omega_1 \end{bmatrix},\quad \mathbf{A}=\begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T_{\text{г}}} & 0 & 0 \\ \dfrac{K_{\text{г}}R_a C}{T_a} & R-\dfrac{1}{T_a} & -\dfrac{e\ a}{T_a} \\ 0 & \dfrac{C_{\text{м}}}{J_\Sigma} & 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{b}=\begin{bmatrix} \dfrac{K_{\text{в}}R_{\text{в}}}{T_{\text{г}}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{d}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dfrac{1}{J_\Sigma} \end{bmatrix}.$$

Для двухмассовой ЭМС с электоприводом УП-Д:

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} i_a \\ \omega_1 \\ M_y \\ \omega_2 \end{bmatrix},\quad \mathbf{A}=\begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T_a} & -\dfrac{C_{ed}R}{T_a} & 0 & 0 \\ \dfrac{C_{\text{м}}}{J_1} & 0 & -\dfrac{1}{J_1} & 0 \\ \dfrac{\beta_{\text{в.т}}C_{\text{м}}}{J_1} & c_{12\text{в.т}} & \beta & \dfrac{J_1+J_2}{J_1J_2^{12}} \quad c \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{b}=\begin{bmatrix} \dfrac{K_{\text{п}}R_a}{T_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{d}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\dfrac{1}{J_\Sigma} \end{bmatrix}$$

для одномассовой ЭМС с электоприводом УП-Д:

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} i_a \\ \omega_1 \end{bmatrix},\quad \mathbf{A}=\begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T_a} & -\dfrac{C_{ed}R}{T_a} \\ \dfrac{C_{\text{м}}}{J_\Sigma} & 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{b}=\begin{bmatrix} \dfrac{K_{\text{п}}R_a}{T_a} \\ 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{d}=\begin{bmatrix} 0 \\ -\dfrac{1}{J_\Sigma} \end{bmatrix}.$$

2 Синтез систем подчиненного регулирования

Главной задачей электропривода является быстродействие при соответствующем характере переходного процесса. Этим требованиям отвечают системы подчиненного регулирования координат электропривода. Координаты корректируются последовательно, начиная с внутренних, при этом внутренний контур подчиняется внешнему. [4]

Рассмотрим классическую трехконтурную систему подчиненного регулирования и нетрадиционные двух-, четырех- и пятиконтурные системы подчиненного регулирования.

2.1 Трехконтурная система подчиненного регулирования

Классической является трехконтурная система подчиненного регулирования (СПР) тока возбуждения, тока якорной цепи и скорости двигателя, применяемая к одномассовой электромеханической системе (ЭМС) , представленная на рисунке 2.1. Она является классической, т.к. каждая постоянная времени компенсируется отдельным регулятором [7,9].

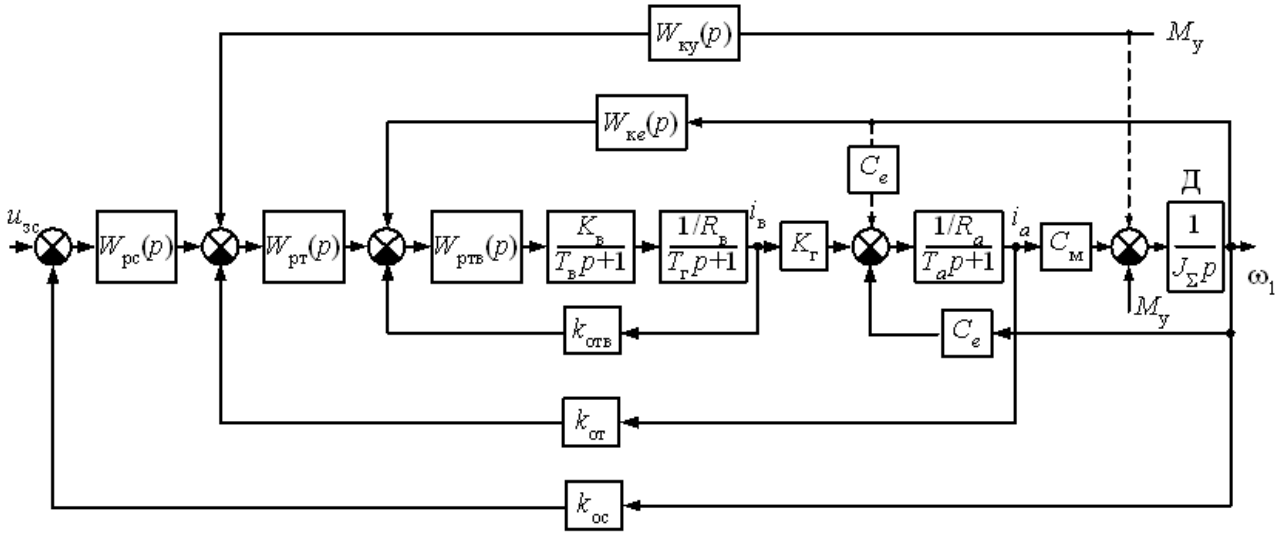


Рисунок 2.1 – Структурная схема одномассовой ЭМС с трехконтурной СПР

а) Контур тока возбуждения

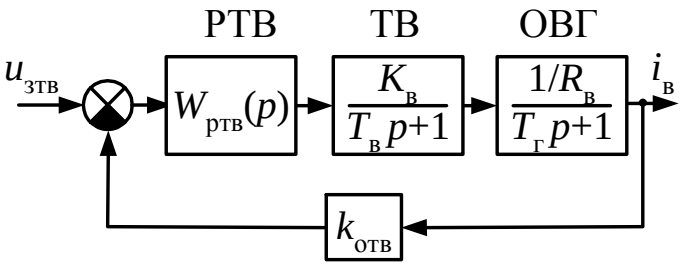


Рисунок 2.2 – Структурная схема контура тока возбуждения

Обозначим передаточную функцию регулятора тока возбуждения $W_{ртв}(p)$ на рисунке 2.2. Некомпенсируемую постоянную времени принимаем равной постоянной времени возбудителя, т.е. $T_μ=T_в$=0,01с, что справедливо при безинерционном датчике и регуляторе.

Передаточная функция разомкнутого контура тока возбуждения

$$W_{раз.тв}(p)=W_{ртв}(p)W_{тв}(p)W_{овг}(p)k_{отв}=W_{ртв}(p)\frac{K_в}{T_μ p+1}\frac{1/R_в}{T_г p+1}k_{отв} \qquad (2.1)$$

где $k_{отв}=\frac{U_{зтв}}{I_{вн}}$ – коэффициент обратной связи по току возбуждения;

$U_{зтв}$ – напряжение задания по току возбуждения, равное номинальному напряжению управления;

$I_{вн}$ – номинальный ток возбуждения генератора.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W^{ж}_{раз.тв}(p)=\frac{1}{2T_μ p\left(T_μ p+1\right)} \qquad (2.2)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu}p\left(T_{\mu}p+1\right)}=W_{\text{ртв}}(p)\frac{K_{\text{в}}}{T_{\mu}p+1}\frac{1/R_{\text{в}}}{T_{\text{г}}p+1}k_{\text{отв}} \qquad (2.3)$$

Сократив обе части на $\left(T_{\mu}p+1\right)$, находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{ртв}}(p)=\frac{R_{\text{в}}\left(T_{\text{г}}p+1\right)}{2T_{\mu}K_{\text{в}}k_{\text{отв}}p}=\frac{R_{\text{в}}T_{\text{г}}}{T2K_{\mu}k_{\text{в}}k_{\text{отв}}}+\frac{R_{\text{в}}}{T2K_{\mu}k_{\text{в}}k_{\text{отв}}p}=\frac{T_{\text{г}}}{\{_{\text{П}}^{T_{\text{и1}}}}+\frac{1}{\{_{\text{И}}^{T_{\text{и1}}}p}, \qquad (2.4)$$

где $T_{\text{и1}}=2T_{\mu}K_{\text{в}}k_{\text{отв}}/R_{\text{в}}.$

Полученный регулятор пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{\text{зктв}}(p)=\frac{W_{\text{ртв}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{овг}}(p)}{1+W_{\text{ртв}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{овг}}(p)k_{\text{отв}}}; \qquad (2.5)$$

$$W_{\text{зктв}}(p)=\frac{1/k_{\text{отв}}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1}\approx\frac{1/k_{\text{отв}}}{2T_{\mu}p+1}, \qquad (2.6)$$

Обозначим $2T_{\mu}=T_{\mu 2}$ – некомпенсируемые постоянные времени второго контура.

б) Контур тока якорной цепи

Структурная схема контура тока якорной цепи представлена на рисунке 2.3.

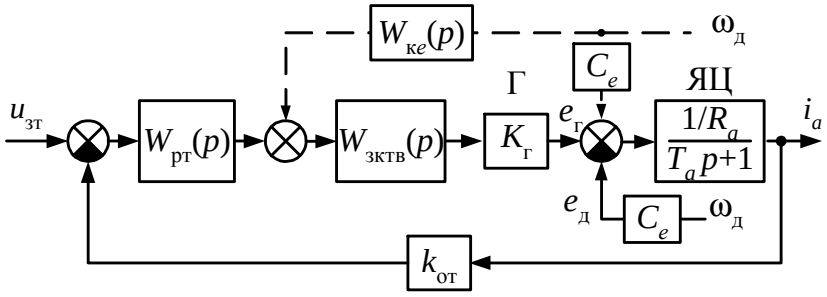


Рисунок 2.3 – Структурная схема контура тока якорной цепи

Для синтеза регулятора тока пренебрегаем обратной связью по ЭДС двигателя (в дальнейшем мы учтем ее действие при помощи коррекции по ЭДС), тогда передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}(p) = W_{\text{рт}}(p)W_{\text{зктв}}(p)W_{\text{яц}}(p)K_{\text{г}}k_{\text{от}}, \tag{2.7}$$

где $k_{\text{от}} = \dfrac{U_{\text{зт}}}{I_{\text{стоп}}}$ – коэффициент обратной связи по току якорной цепи;

$U_{\text{зт}}$ – напряжение задания по току якорной цепи, равное номинальному напряжению управления;

$I_{\text{стоп}}$ – стопорный ток якоря двигателя.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W^{\text{ж}}_{\text{раз.тя}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2}p\left(T_{\mu 2}p+1\right)} \tag{2.8}$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p\left(T_{\mu 2}p+1\right)} = W_{\text{рт}}(p)\frac{1/R_a}{T_a p+1}\frac{1/k_{\text{отв}}}{T_{\mu 2}p+1}K_{\text{г}}k_{\text{от}} \tag{2.9}$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рт}}(p)=\frac{k_{\text{отв}}R_a\left(T_{\text{и2}}p+1\right)}{2T_{\mu 2}K_{\text{г}}k_{\text{от}}p}=\underbrace{\frac{T_a}{T_{\text{и2}}}}_{\text{П}}+\underbrace{\frac{1}{T_{\text{и2}}}\frac{1}{p}}_{\text{И}}, \qquad (2.10)$$

где $T_{\text{и2}}=2T_{\mu 2}K_{\text{г}}k_{\text{от}}\ /\ R_a k_{\text{отв}}$

Полученный регулятор пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура

$$W_{\text{зктя}}(p)=\frac{W_{\text{рт}}(p)W_{\text{яц}}(p)W_{\text{зктв}}(p)K_{\text{г}}}{1+W_{\text{рт}}(p)W_{\text{яц}}(p)W_{\text{зктв}}(p)K_{\text{г}}k_{\text{от}}}=\frac{1/k_{\text{от}}}{p^2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}+1)+1}\approx\frac{1/k_{\text{от}}}{p^2T_{\mu 2}+1}, \qquad (2.11)$$

Обозначим $2T_{\mu 2}=T_{\mu 3}$.

в) Контур скорости

В одномассовой системе нет сумматора 2 на рисуноке 2.4. А т.к. результаты синтеза одномассовой системы мы затем распространяем на двухмассовую электромеханическую систему, то фактически существует внутреннее возмущающее воздействие по упругому моменту. Им при синтезе регулятора скорости мы пренебрегаем и в дальнейшем должны учесть при помощи коррекции по упругому моменту.

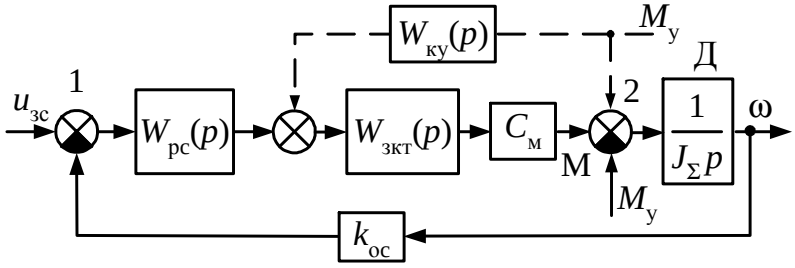


Рисунок 2.4 – Структурная схема контура скорости

$$K_{ОС} = \frac{U_{ЗС}}{\omega_{ДН}}$$

к–коэффициент обратной связи по угловой скорости двигателя,

$U_{зс}$– напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{ДН}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{\text{раз.с}}(p) = W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{ос}} \qquad (2.12)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W^{\text{ж}}_{\text{раз.с}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 3}p\left(T_{\mu 3}p+1\right)} \qquad (2.13)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 3}p\left(T_{\mu 3}p+1\right)} = W_{\text{рс}}(p)\frac{C_{\text{мз}}}{J_{\Sigma}p}\frac{1/k_{\text{от}}}{T_{\mu 3}p+1}k_{\text{ос}} \qquad (2.14)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{k_{\text{от}}J_{\Sigma}}{2T_{\mu 3}C_{\text{мз}}k_{\text{ос}}} = k_{\text{рс}}, \qquad (2.15)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{\text{зкс}}(p)=\frac{W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)}{1+W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{ос}}}=\frac{1/k_{\text{ос}}}{T_{\mu 3}^2 p^2+T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}+1)+1}\approx\frac{1/k_{\text{ос}}}{T_{\mu 3}^2 p^2+T_{\mu 3}+1} \quad (2.16)$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока возбуждения

$$W_{\text{ке}}(p)=\frac{C_e}{K_{\text{г}}W_{\text{зктв}}(p)} \quad (2.17)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{\text{зктв}}(p)=\frac{1/k_{\text{отв}}}{2T_{\mu}^2p^2+2T_{\mu}p+1}$$

$$W_{\text{ке}}(p)=\frac{C_{es}k_{\text{отв}}}{K_{\text{г}}}\frac{1}{2T_{\mu}^2p^2+2T_{\mu}p+1}=\frac{2T_{\mu}^2k_{\text{отв}}C_{es}}{K_{\text{г}}}p^2+\frac{2T_{\mu}k_{\text{отв}}C_{es}}{K_{\text{г}}}p+\frac{k_{\text{отв}}C_{es}}{K_{\text{г}}} \quad (2.18)$$

Таким образом, вводится положительная обратная связь по скорости и ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

Учтем влияние внутренней обратной связи по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи на регулятор тока якорной цепи

$$W_{\text{ку}}(p)=\frac{1}{C_{\text{мз}}W_{\text{зкт}}(p)}=2T_{\mu 2}^2\frac{k_{\text{от}}}{C_{\text{мз}}}p^2+2T_{\mu 2}\frac{k_{\text{от}}}{C_{\text{мз}}}p+\frac{k_{\text{от}}}{C_{\text{мз}}} \quad (2.19)$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной

цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

2.2 Двухконтурная система подчиненного регулирования

На рисунке 2.5 представлена структурная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования.

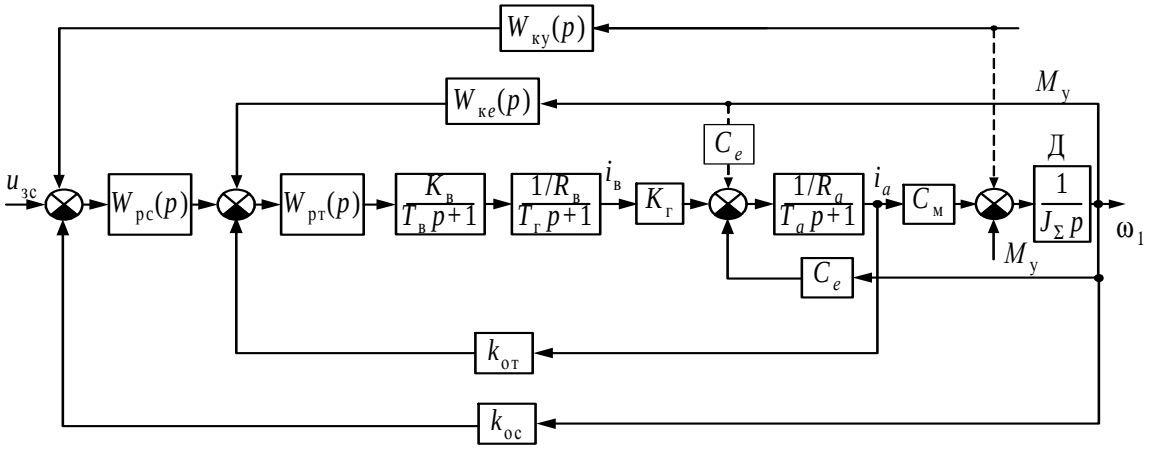


Рисунок 2.5 – Структурная схема ЭМС с двухконтурной СПР

а) Контур тока якорной цепи

Структурная схема контура тока якорной цепи представлена на рисунке 2.6

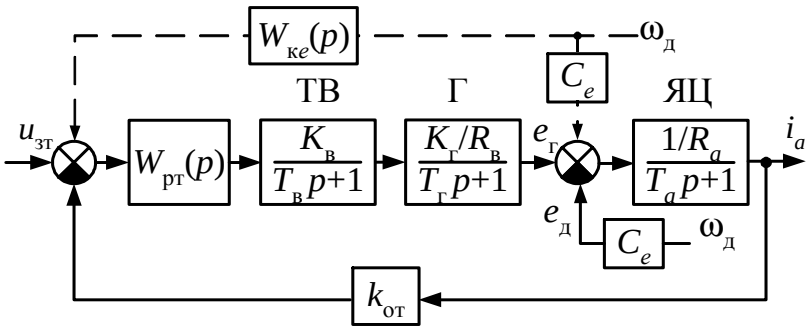


Рисунок 2.6 – Структурная схема контура тока якорной цепи

Некомпенсируемую постоянную времени принимаем равной постоянной времени возбудителя, т.е. $T_{\mu}=T_{в}$=0,01с, что справедливо при безинерционном датчике и регуляторе.

Пренебрегаем обратной связью по ЭДС, тогда передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}(p)=W_{\text{рт}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{овг}}(p)W_{\text{яц}}(p)K_{\text{г}}k_{\text{от}}, \tag{2.20}$$

где $k_{\text{от}}=\dfrac{U_{\text{зт}}}{I_{\text{стоп}}}$ – коэффициент обратной связи по току якорной цепи,

$U_{\text{зт}}$ – напряжение задания по току якорной цепи, равное номинальному напряжению управления;

$I_{\text{стоп}}$ – стопорный ток якоря двигателя.

$$K_{O.T}=\frac{U_{3T}}{\mathrm{I}_{\text{стоп}}}$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W^{\text{ж}}_{\text{раз.тя}}(p)=\frac{1}{2T_{\mu}p\,(T_{\mu}p+1)}. \tag{2.21}$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu}p\,(T_{\mu}p+1)}=W_{\text{рт}}(p)\frac{K_{B}}{T_{в}p+1}\frac{1/R_{\text{В}}}{T_{\text{в}}p+1}\frac{1/R_{a}}{T_{a}p+1}K_{\text{г}}k_{\text{от}} \tag{2.22}$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рт}}(p)=\frac{R_{\text{в}}R_a(T_{\text{г}}p+1)(T_a p+1)}{2T_{\mu}K_{\text{в}}K_{\text{г}}k_{\text{от}}}=\frac{T_{\text{г}}+T_a}{T_{\text{П}}}+\frac{1}{T_{\text{И}}p}+\frac{T_{\text{г}}\cdot T_a}{T_{\text{Д}}}p \quad , \qquad (2.23)$$

где $T_{\text{П}}=2K_{\mu}\cdot K_{\text{в}}\cdot K_{\text{г}}\cdot R_{\text{от}}/(R_{\text{в}}\cdot a)$

Полученный регулятор пропорционально - интегрально - дифференциальный (ПИД-регулятор).

$$W_{\text{РТ}}(p)=\frac{T_{\text{П}}+T_a}{T_{\text{И}}}+\frac{1}{T_{\text{И}}p}+\frac{T_{\text{Г}}\cdot T_a}{T_{\text{И}}}\cdot$$

Передаточная функция замкнутого контура

$$W_{\text{зктя}}(p)=\frac{W_{\text{рт}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{овг}}(p)K_{\text{г}}W_{\text{яц}}(p)}{1+W_{\text{рт}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{овг}}(p)K_{\text{г}}W_{\text{яц}}(p)k_{\text{от}}}=\frac{1/k_{\text{от}}}{p^2T_{\mu}^2+p2T_{\mu}+1} \quad , \qquad (2.24)$$

$$W_{\text{зктя}}(p)\approx\frac{1/k_{\text{от}}}{2T_{\mu}p+1} \quad , \qquad (2.25)$$

Обозначим $2T_{\mu}=T_{\mu 2}$.

б) Контур скорости

В одномассовой системе нет сумматора 2. А т.к. результаты синтеза одномассовой системы мы затем распространяем на двухмассовую электромеханическую систему, то фактически существует внутреннее возмущающее воздействие по упругому моменту. Им при синтезе регулятора скорости мы пренебрегаем и в дальнейшем должны учесть при помощи коррекции по упругому моменту (рисунок 2 .7).

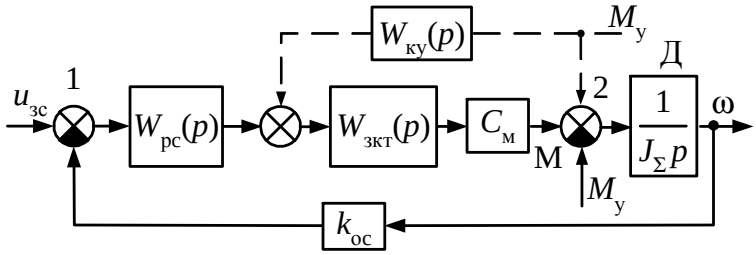


Рисунок 2.7 – Структурная схема контура скорости

где к– коэффициент обратной связи по угловой скорости двигателя;

$$K_{ОС} = \frac{U_{ЗС}}{\omega_{ДН}};$$

$U_{зс}$– напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{ДН}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Пренебрегаем внутренней обратной связью, по упругому моменту, которая физически существует, когда переходим к двухмассовой электромеханической системе. Это влияние мы учтем в дальнейшем.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{раз.с}(p) = W_{рс}(p)\frac{C_м}{J_\Sigma p}\frac{1/k_{от}}{T_{μ2}p + 1}k_{ос}. \quad (2.26)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W^{ж}_{раз.с}(p) = \frac{1}{2T_{μ2}p\left(T_{μ2}p + 1\right)}. \quad (2.27)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p\,T_{\mu 2}(p+1)} = W_{\text{рс}}(p)\frac{C_{\text{м}}}{J_{\Sigma}p\,T_{\mu 2}p+1}\frac{1/k_{\text{от}}}{}k_{\text{ос}} \tag{2.28}$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{k_{\text{от}}J_{\Sigma}}{2T_{\mu 2}C_{\text{мs}}k_{\text{ос}}} = k_{\text{рс}}. \tag{2.29}$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{\text{зкс}}(p) = \frac{W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)}{1+W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{ос}}T} = \frac{1/k_{\text{ос}}}{p2\,T_{\mu 2}p(\ _{\mu 2}+1)+T1} \approx \frac{1/k_{\text{ос}}}{p2\ _{\mu 2}+1} \tag{2.30}$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока якорной цепи

$$W_{\text{ke}}(p) = \frac{C_{es}T(p_{\mu}+1)T(p_{\text{г}}+1)R_{\text{в}}}{K_{\text{в}}K_{\text{г}}W_{\text{рт}}(p)} \tag{2. 31}$$

$$W_{\text{ke}}(p) = C_{es}\frac{(T_{\mu}p+1)(T_{\text{г}}p+1)R_{\text{в}}}{K_{\text{в}}K_{\text{г}}T\ p}\frac{T_{\mu 2}K_{\text{в}}K_{\text{г}}k_{\text{от}}p}{(T\ p+1)(R\ R_{a}+1)\ R_{\text{в}}\ _{a}} = \frac{T_{\mu 2}C_{es}k_{\text{от}}}{T\ p_{aa}}\frac{(T_{\mu}p+1)}{(\ \ +1)}p$$

Учтем внутреннюю обратную связь по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи по упругому моменту, заводимая на регулятор скорости.

$$W_{\text{ку}}(p)=\frac{1}{C_{\text{м}}W_{\text{зкт}}(p)W_{\text{рс}}(p)} \tag{2.33}$$

$$W_{\text{ку}}(p)=\frac{2T_{\mu 2}k_{\text{дс}}}{J_{\Sigma}}(2p_{\mu 2}^{2}+2p_{\mu 2}+1) \tag{2.34}$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производной с соответствующими коэффициентами.

2.3 Двухмассовые электромеханические системы с последовательной коррекцией координат

Одномассовую систему, как правило, рассматривают в предварительных расчетах при синтезе, а дальнейший анализ проводят для двухмассовой электромеханической системы, которая включает структурную схему двухмассовой механической системы и электрической части электропривода по систем

ТВ- Г-Д. Двухмассовая структурная схема объекта управления без учета действия внутреннего демпфирования изображена на рисунке 2.8.

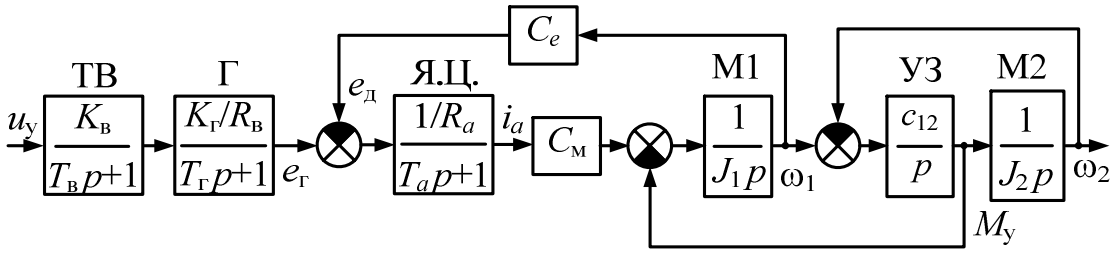


Рисунок 2.8 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Для двухмассового объекта регулирования могут использоваться многоконтурные системы подчиненного регулирования, т. е. от регулирования скорости двигателя переходим к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегаем перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые будут компенсироваться в дальнейшем. Система электропривода в этом случае может быть четырех- либо пятиконтурная с дополнительными регуляторами упругого момента $PM_у$ и скорости второй массы PC_2 (исполнительного механизма), на которые поступают сигналы обратных связей по этим координатам с соответствующими коэффициентами [5].

2.3.1 Четырехконтурная система подчиненного регулирования

Для двухмассового объекта регулирования могут использоваться многоконтурные системы подчиненного регулирования, т.е. от регулирования скорости двигателя переходим к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегаем перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые будут компенсироваться в дальнейшем. Система электропривода в этом случае может быть четырех- либо пятиконтурная с дополнительными регуляторами упругого момента *PMy* и скорости второй массы PC_2 (исполнительного механизма), на которые поступают сигналы обратных связей по этим координатам с соответствующими коэффициентами.

Четырехконтурная система подчиненного регулирования отличается от пятиконтурной отсутствием контура тока возбуждения, что делает систему более быстродействующей. Ее структурная схема показана на рисунке 2.9.

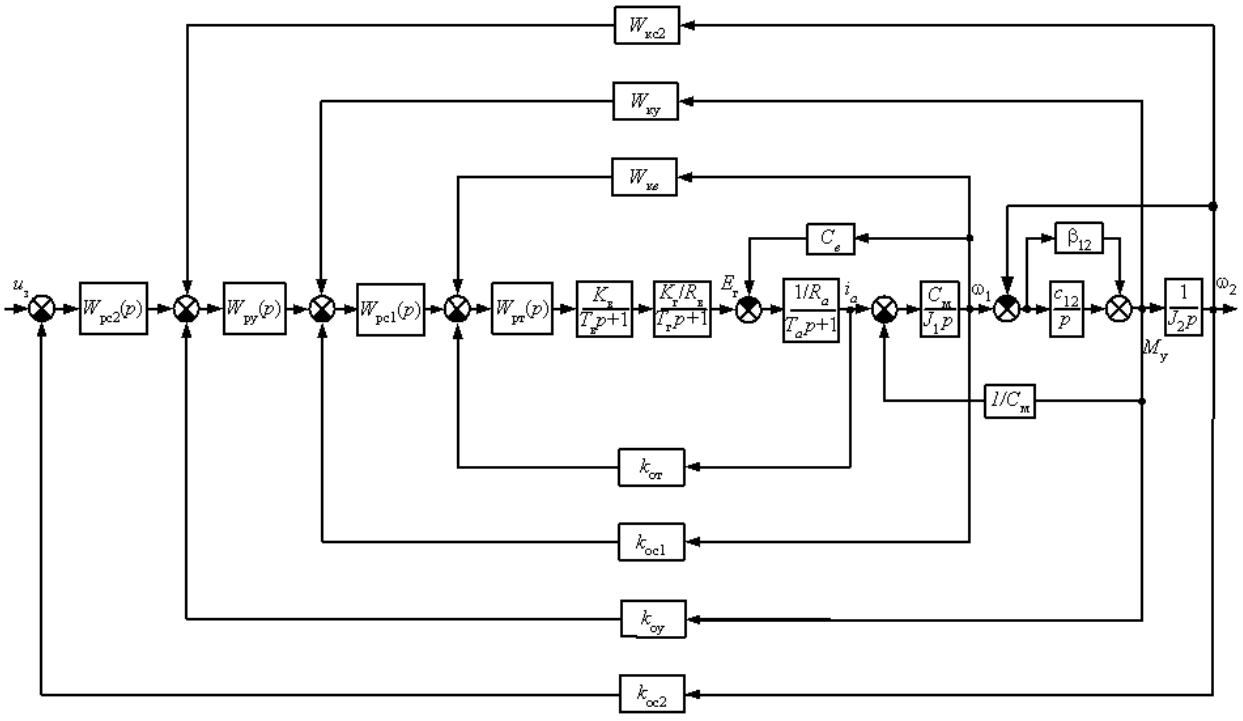


Рисунок 2.9 – Структурная схема четырехконтурной системы подчиненного регулирования

а) Контур тока якоря

Аналогичен рассмотренному при синтезе двухконтурной системы подчиненного регулирования, поэтому:

Передаточная функция регулятора:

$$W_{РТ}(p) = \frac{T_{И1} + T_А}{T_{И1}} + \frac{1}{T_{И1} p} + \frac{T_Г \cdot T_А}{T_{И1}}.$$

Передаточная функция замкнутого контура тока якоря

$$W_{ЗКТЯ}(p) = \frac{1/K_{ОТ}}{2T_\mu p + 1}$$

Обозначим $2T_\mu = T_{\mu 2}$.

б) Контур скорости двигателя

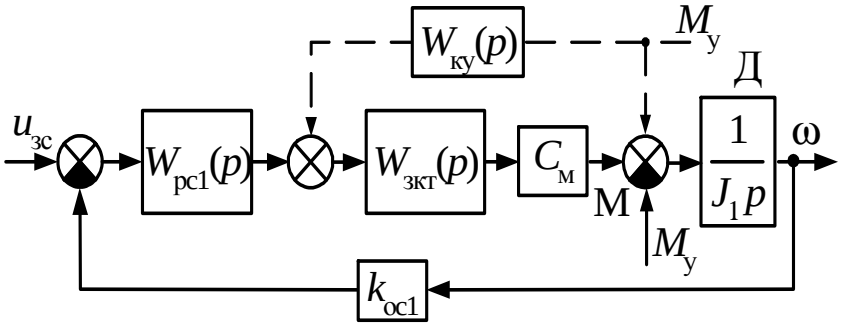


Рисунок 2.10 – Структурная схема контура скорости двигателя

Структурная схема контура скорости двигателя представлена на рисунке 2. 10. Передаточная функция разомкнутого контура скорости двигателя

$$W_{раз.с1}(p) = W_{рс1}(p) W_{зкт}(p) W_д(p) k_{ос1} = W_{рс1}(p) \frac{1/k_{от}}{T_{\mu 2} p + 1} \frac{C_{мs}}{p_1} k_{ос1}. \quad (2.35)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.с}}^{\text{ж}}(p)=\frac{1}{2T_{\mu 2}p\left(T_{\mu 2}p+1\right)}. \qquad (2.36)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура скорости двигателя

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p\left(T_{\mu 2}p+1\right)}=W_{\text{рс1}}(p)\frac{C_{\text{мs}}}{J_1 p}\frac{1/k_{\text{от}}}{T_{\mu 2}p+1}k_{\text{ос1}} \qquad (2.37)$$

Находим передаточную функцию регулятора скорости двигателя

$$W_{\text{рс1}}(p)=\frac{k_{\text{от}}J_1}{2T_{\mu 2}C_{\text{мs}}k_{\text{ос1}}}=k_{\text{рс1}}, \qquad (2.38)$$

где $k_{\text{ос1}}=k_{\text{ос2}}=k_{\text{ос}}=\frac{U_{\text{зс1}}}{\omega_{\text{дн}}}$ – коэффициент обратной связи по скорости двигателя.

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя

$$W_{\text{зкс1}}(p)=\frac{W_{\text{рс1}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)}{1+W_{\text{рс1}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{ос1}}}=\frac{1/k_{\text{ос1}}}{2T_{\mu 2}p\left(T_{\mu 2}p+1\right)+1}\approx\frac{1/k_{\text{ос1}}}{2T_{\mu 2}p+1} \qquad (2.39)$$

Обозначим $2T_{\mu 2}=T_{\mu 3}$.

в) Контур момента упругого

Структурная схема контура момента упругого представлена на рисунке 2.11.

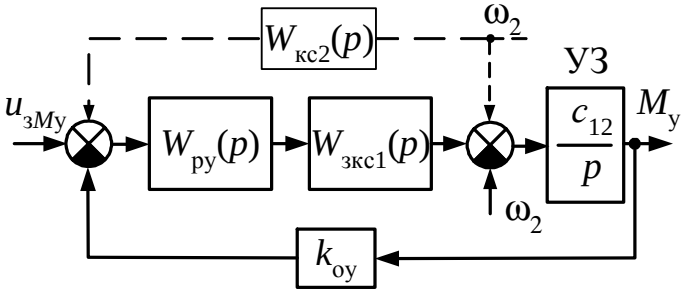


Рисунок 2.11 – Структурная схема контура момента упругого

Передаточная функция разомкнутого контура упругого момента

$$W_{раз.у}(p) = W_{ру}(p)W_{зкс1}(p)W_{уз}(p)k_{оу} = W_{ру}(p)\frac{1/k_{ос1}}{T_{из}p + 1}\frac{c_{12}}{p}k_{оу}. \quad (2.40)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W^{ж}_{раз.у}(p) = \frac{1}{2T_{из}p\left(T_{из}p + 1\right)}. \quad (2.41)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{из}p\left(T_{из}p + 1\right)} = W_{ру}(p)\frac{1/k_{ос1}}{T_{из}p + 1}\frac{c_{12}}{p}k_{оу}. \quad (2.42)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{ру}(p) = \frac{k_{ос1}}{2T_{из}c_{12}k_{оу}} = k_{ру}, \quad (2.43)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура момента упругого

$$W_{\text{зку}}(p)=\frac{W_{\text{ру}}(p)W_{\text{зкс1}}(p)W_{\text{уз}}(p)}{1+W_{\text{ру}}(p)W_{\text{зкс1}}(p)W_{\text{уз}}(p)k_{\text{оу}}}=\frac{1/k_{\text{оу}}}{p^2T_{\mu3}p(T_{\mu3}+1)+1}\approx\frac{1/k_{\text{оу}}}{p^2T_{\mu3}+1} \quad (2.44)$$

где $k_{\text{оу}}=\frac{U_{зу}}{M_{\text{стоп}}}$ – коэффициент обратной связи по моменту упругому;

$U_{\text{зу}}$ – напряжение задания по моменту упругому, равное номинальному напряжению управления;

$M_{\text{стоп}}$ – максимальный момент, соответствующий стопорному значению тока якорной цепи.

Обозначим $2T_{\mu3}=T_{\mu4}$.

г) Контур скорости рабочего механизма

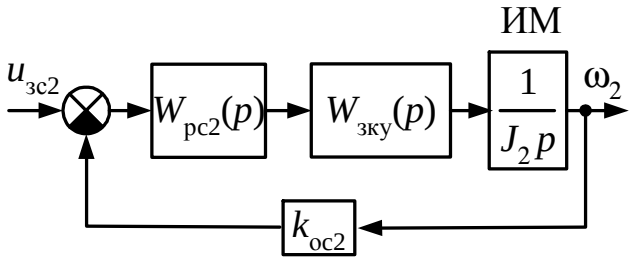


Рисунок 2.12 – Структурная схема контура скорости рабочего механизма

Структурная схема контура скорости рабочего механизма представлена на рисунке 2. 12. Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{\text{раз.с2}}(p)=W_{\text{рс2}}(p)W_{\text{зку}}(p)W_{\text{им}}(p)k_{\text{ос2}}=W_{\text{рс2}}(p)\frac{1/k_{\text{оу}}}{T_{\mu4}p+1}\frac{1}{p_2}k_{\text{ос2}}. \quad (2.45)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W^{ж}_{раз.с2}(p)=\frac{1}{2T_{\mu4}p\,T(p_{\mu4}+1)}. \tag{2.46}$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu4}p\,T(p_{\mu4}+1)}=W_{рс2}(p)\frac{1}{J_2p\,T}\frac{1/k_{оу}}{p_{\mu4}+1}k_{ос2}. \tag{2.47}$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{рс2}(p)=\frac{k_{оу}J_2}{2T_{\mu4}k_{ос2}}=k_{рс2}, \tag{2.48}$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{зкс2}(p)=\frac{W_{рс2}(p)W_{зку}(p)W_{им}(p)}{1+W_{рс2}(p)W_{зку}(p)W_{им}(p)k_{ос2}T}=\frac{1/k_{ос2}}{p2T_{\mu4}p(p_{\mu4}+1)+T1}\approx\frac{1/k_{ос2}}{p2p_{\mu4}+1} \tag{2.49}$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ke}(p)=\frac{C_{es}T(p_{\mu}+1)T(p_{г}+1)R_{в}}{K_{в}K_{г}W_{рт}(p)} \tag{2.50}$$

$$W_{\text{ке}}(p) = C_{es}\frac{(T_{\mu}p+1)(T_{\text{г}}p+1)R_{\text{в}}}{K_{\text{в}}K_{\text{г}}T_{\mu}p}\frac{T_{\mu 2}K_{\text{в}}K_{\text{г}}k_{\text{от}}p}{(T_{\mu}p+1)(R_{a}p+1)R_{\text{в}}R_{a}} = \frac{T_{\mu 2}C_{es}k_{\text{от}}}{T_{\mu}p_{aa}}\frac{(T_{\mu}p+1)p}{(\quad+1)} \tag{2.51}$$

Учтем внутреннюю обратную связь по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи по упругому моменту, заводимая на регулятор скорости

$$W_{\text{ку}}(p) = \frac{1}{C_{\text{м}}W_{\text{зкт}}(p)W_{\text{рс}}(p)} \tag{2.52}$$

$$W_{\text{ку}}(p) = \frac{2T_{\mu 2}k_{\text{ос}}}{J_{\Sigma}}T(2p_{\mu 2}^{2}\quad^{2}+2\quad_{\mu 2}\quad+1) \tag{2.53}$$

Учтем влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы. Компенсирующую связь по скорости второй массы заводим на регулятор упругого момента.

$$W_{\text{кс2}}(p) = \frac{1}{W_{\text{зкс1}}(p)W_{\text{ру}}(p)} \tag{2.54}$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя:

$$W_{\text{зкс}}(p) = \frac{1/k_{\text{ос}}}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p+1)+1} \tag{2.55}$$

$$W_{\text{кс2}}(p) = \frac{k_{\text{ос}}}{k_{\text{ру}}}T^{2}\quad_{\mu 2}\quad^{2}T + \frac{k_{\text{ос}}}{k_{\text{ру}}}p^{2}\quad_{\mu 2}\quad + \frac{k_{\text{ос}}}{k_{\text{ру}}} \tag{2.56}$$

2.3.2 Пятиконтурная система подчиненного регулирования

Структурная схема пятиконтурной системы подчиненного регулирования представлена на рисунке 2.13.

а)Контуры тока возбуждения и тока якорной цепи

Эти контуры аналогичны рассмотренным при синтезе классической трехконтурной системы подчиненного регулирования, поэтому:

– передаточные функции регуляторов имеют вид (2.4) и (2.10):

$$W_{\text{р.т.в}}(p) = \frac{T_{\text{и}1}p + 1}{T_{\text{и}1}p},$$

где $T_{\text{и}1} = 2T_{\mu}K_{\text{в}}k_{\text{отв}} / R_{\text{в}}$;

$$W_{\text{р.т}}(p) = \frac{T_{\text{и}2}p + 1}{T_{\text{и}2}p},$$

где $T_{\text{и}2} = 2T_{\text{ц}2}K_{\text{г}}k_{\text{от}} / R_a k_{\text{отв}}$

– передаточные функции замкнутых контуров тока возбуждения и тока якоря имеют вид (2.6) и (2.11):

$$W_{\text{з.к.т.в}}(p) \approx \frac{1/k_{\text{о.т.в}}}{2T_{\mu}p+1}; \quad W_{\text{з.к.т.я}}(p) \approx \frac{1/k_{\text{о.т}}}{2T_{\mu 2}p+1}.$$

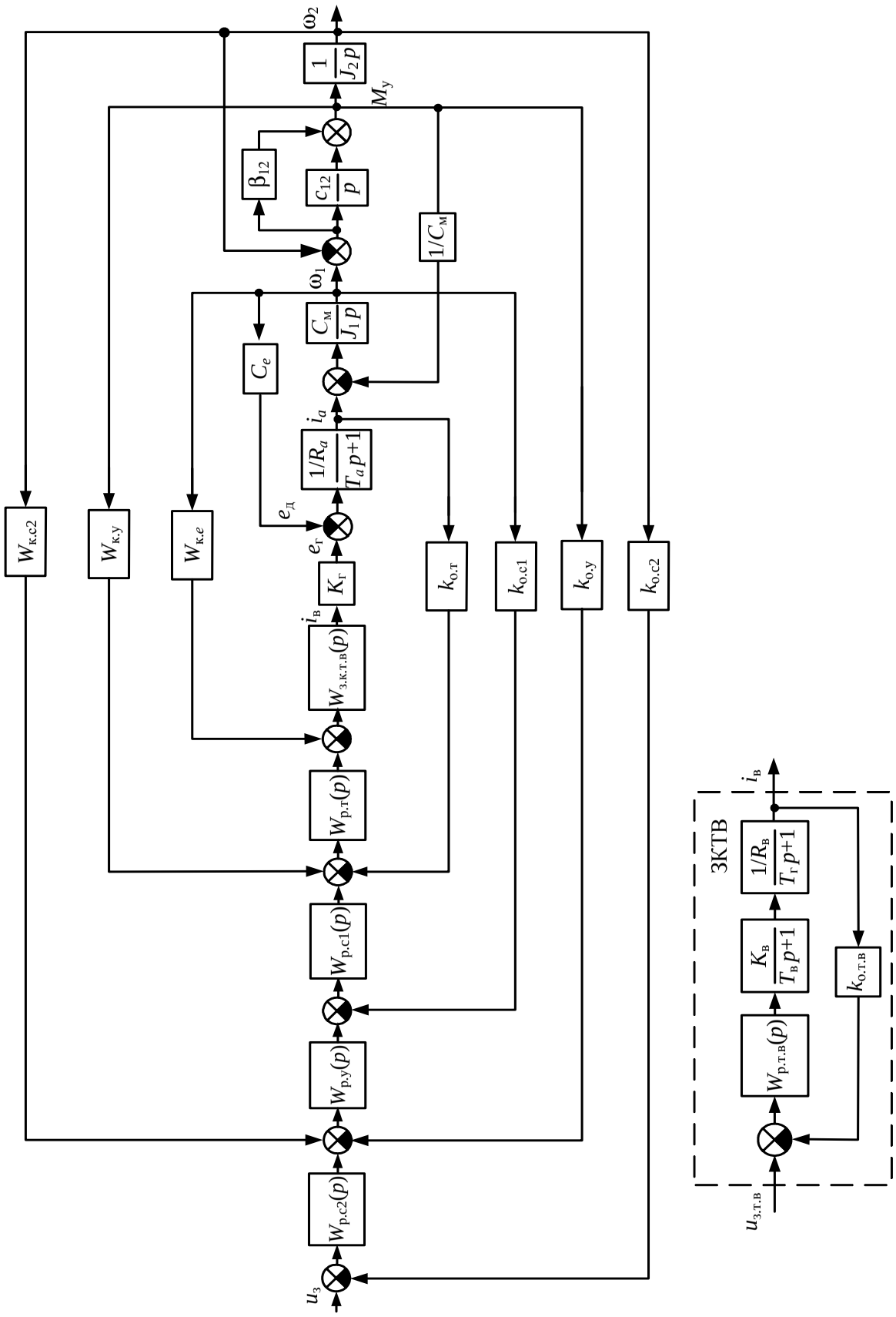


Рисунок 2.13 – Структурная схема пятиконтурной системы подчиненного регулирования

б)Контур скорости двигателя

Обозначим передаточную функцию регулятора скорости двигателя $W_{\text{р.с1}}(p)$ (рисунок 2.14).

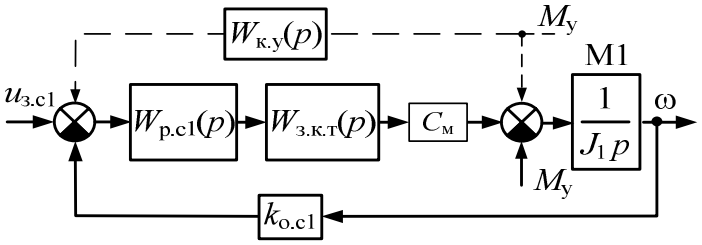


Рисунок 2.14 – Структурная схема контура скорости двигателя

Где $k_{\text{о.с1}}$ – коэффициент обратной связи по скорости двигателя;

$$k_{\text{о.с1}} = \frac{U_{\text{з.с1}}}{\omega_{\text{д.н}}},$$

где $U_{\text{з.с1}}$ – напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{\text{д.н}}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{\text{раз.с1}}(p) = W_{\text{р.с1}}(p) W_{\text{з.к.т}}(p) W_{\text{д}}(p) k_{\text{о.с1}}. \qquad (2.57)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W^{ж}_{раз.с1}(p)=\frac{1}{2T_{μ3}p\left(T_{μ3}p+1\right)}. \quad (2.58)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{μ3}p\left(T_{μ3}p+1\right)}=W_{р.с1}(p)\frac{1/k_{о.т}}{T_{μ3}p+1}\frac{1}{T_{м}p}k_{о.с1}. \quad (2.59)$$

Находим передаточную функцию регулятора:

$$W_{р.с1}(p)=\frac{k_{о.т}J_1}{2T_{μ3}C_{м}k_{о.с1}}=k_{р.с1}. \quad (2.60)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости:

$$W_{з.к.с1}(p)=\frac{W_{р.с1}(p)W_{з.к.т}(p)W_{д}(p)}{1+W_{р.с1}(p)W_{з.к.т}(p)W_{д}(p)k_{о.с1}}; \quad (2.61)$$

$$W_{з.к.с1}(p)=\frac{1/k_{о.с1}}{2T_{μ3}p(T_{μ3}p+1)+1}\approx\frac{1/k_{о.с1}}{2T_{μ3}p+1}, \quad (2.62)$$

Обозначим $2T_{μ3}=T_{μ4}$.

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока возбуждения

$$W_{ке}(p)=\frac{C_{es}}{K_г W_{зктв}(p)} \qquad (2.63)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{зктв}(p)=\frac{1/k_{отв}}{2T_\mu^2 p^2+2T_\mu p+1}$$

$$W_{ке}(p)=\frac{C_{es}k_{отв}}{K_г}(2p_\mu^2{}^2+2\ _\mu+1)=p^2\frac{2T_\mu^2 k_{отв}C_{es}}{K_г}{}^2+p\frac{2T_\mu k_{отв}C_{es}}{K_г}+\frac{k_{отв}C_{es}}{K_г} \qquad (2.64)$$

Таким образом, вводится положительная обратная связь по скорости и ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

Учтем влияние внутренней обратной связи по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ку}(p)=\frac{1}{C_{мS}W_{зкт}(p)}=2\ ^2_{\mu 2}\frac{k_{от}}{C_{мS}}{}^2+2\ _{\mu 2}\frac{k_{от}}{C_{мS}}+\frac{k_{от}}{C_{мS}} \qquad (2.65)$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

в) Контур упругого момента

Обозначим передаточную функцию регулятора момента упругого $W_{\text{р.у}}(p)$ (рисунок 2. 15).

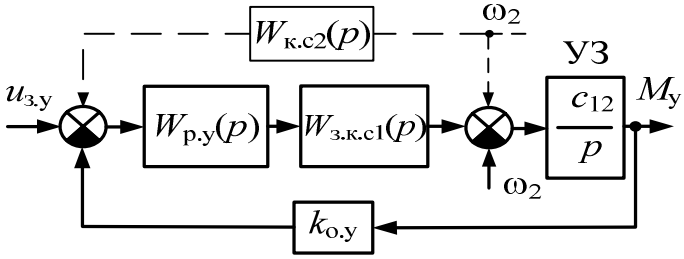


Рисунок 2.15 – Структурная схема контура момента упругого

где $k_{\text{о.у}}$ – коэффициент обратной связи по моменту упругому,

$$k_{\text{о.у}} = \frac{U_{\text{з.у}}}{M_{\text{стоп}}},$$

где $U_{\text{з.у}}$ – напряжение задания по моменту упругому, равное номинальному напряжению управления;

$M_{\text{стоп}}$ – максимальный момент, соответствующий стопорному значению тока якорной цепи.

Пренебрегаем внутренней обратной связью по скорости второй массы, которую учтем в дальнейшем.

Передаточная функция разомкнутого контура упругого момента:

$$W_{\text{раз.у}}(p) = W_{\text{р.у}}(p) W_{\text{з.к.с1}}(p) W_{\text{у.з}}(p) k_{\text{о.у}}. \qquad (2.66)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W^{\text{ж}}_{\text{раз.у}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 4} p \left(T_{\mu 4} p + 1\right)}. \qquad (2.67)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu 4}p\left(T_{\mu 4}p+1\right)} = W_{\text{р.у}}(p)\frac{1/k_{\text{о.с1}}}{T_{\mu 4}p+1}\frac{12}{p}k_{\text{о.у}} \quad . \tag{2.68}$$

Находим передаточную функцию регулятора:

$$W_{\text{р.у}}(p) = \frac{k_{\text{о.с1}}}{2T_{\mu 4}k_{12\text{о.у}}} = k_{\text{р.у}} \quad , \tag{2.69}$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура момента упругого:

$$W_{\text{з.к.у}}(p) = \frac{W_{\text{р.у}}(p)W_{\text{з.к.с1}}(p)W_{\text{у.з}}(p)}{1+W_{\text{р.у}}(p)W_{\text{з.к.с1}}(p)W_{\text{у.з}}(p)k_{\text{о.у}}} \quad ; \tag{2.70}$$

$$W_{\text{з.к.у}}(p) = \frac{1/k_{\text{о.у}}}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{\text{о.у}}}{2T_{\mu 4}p+1} \quad , \tag{2.71}$$

Обозначим $2T_{\mu 4} = T_{\mu 5}$.

г) Контур скорости рабочего механизма

Обозначим передаточную функцию регулятора скорости рабочего механизма $W_{\text{р.с2}}(p)$ (рисунок 2. 16).

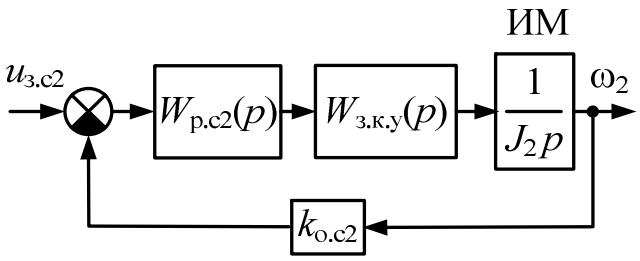


Рисунок 2.16 – Структурная схема контура скорости рабочего механизма

Где $k_{о.с2}$ – коэффициент обратной связи по скорости рабочего механизма,

$$k_{о.с2} = \frac{U_{з.с2}}{\omega_{д.н}},$$

где $U_{з.с2}$ – напряжение задания по скорости рабочего механизма, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{д.н}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рабочего механизма:

$$W_{раз.с2}(p) = W_{р.с2}(p)\frac{1/k_{о.у}}{T_{\mu}p + 1}\frac{1}{J_2 p}k_{о.с2}. \quad (2.72)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W^{ж}_{раз.с2}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}. \quad (2.73)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = W_{р.с2}(p)\frac{1/k_{о.у}}{T_{\mu}p + 1}\frac{1}{J_2 p}k_{о.с2}. \quad (2.74)$$

Находим передаточную функцию регулятора скорости рабочего механизма:

$$W_{\text{р.с2}}(p)=\frac{k_{\text{о.у}}J_2}{2T_{\mu 5}k_{\text{о.с2}}}=k_{\text{р.с2}}, \qquad (2.75)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости рабочего механизма:

$$W_{\text{з.к.с2}}(p)=\frac{W_{\text{р.с2}}(p)W_{\text{з.к.у}}(p)W_{\text{и.м}}(p)}{1+W_{\text{р.с2}}(p)W_{\text{з.к.у}}(p)W_{\text{и.м}}(p)k_{\text{о.с2}}}; \qquad (2.76)$$

$$W_{\text{з.к.с2}}(p)=\frac{1/k_{\text{о.с2}}}{2T_{\mu 5}p(T_{\mu 5}p+1)+1}\approx\frac{1/k_{\text{о.с2}}}{2T_{\mu 5}p+1}, \qquad (2.77)$$

Учтем влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы. Компенсирующую связь скорости второй массы заводим на регулятор упругого момента.

$$W_{\text{к.с2}}(p)=\frac{1}{W_{\text{з.к.с1}}(p)'W_{\text{р.у}}(p)}. \qquad (2.78)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя:

$$W_{\text{з.к.с1}}(p)'=\frac{1/k_{\text{о.с1}}}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p+1)+1}. \qquad (2.79)$$

$$W_{к.с2}(p) = \frac{k_{о.с}}{k_{р.у}} p^2 2\mu_3^2 T^2 + \frac{k_{о.с}}{k_{р.у}} p^2 2\mu_3 + \frac{k_{о.с}}{k_{р.у}}. \quad (2.80)$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы, необходимо ввести на регулятор момента упругого сигналы положительных обратных связей по скорости второй массы, ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

3 Исследование динамики электропривода с последовательной коррекцией координат

Для большинства электроприводов достаточно, чтобы привод был быстродействующим, но при этом перерегулирование выходной величины было небольшим. В системах подчиненного регулирования координаты корректируются последовательной, начиная с внутренних, при этом внутренний контур подчиняется внешнему. Контура рассчитываются по методике «технического оптимума», т.е. задаваясь желаемой передаточной функцией контура, определяют передаточную функцию регулятора [7].

В данной работе для механизма подъема экскаватора ЭКГ-8И рассмотрены переходные процессы двух- и трехконтурной системы подчиненного регулирования (СПР) внутренних координат объекта управления, полученные с помощью пакета MATLAB Simulink, результаты представлены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Двухконтурная СПР

$T_{стоп}$,	$M_{y\Sigma max}$,	$t_{пп}$,
0,1	3,7289	6,5
0,2	3,7274	6,5
0,3	3,6419	6,5
0,4	3,4762	6,3
0,5	3,2330	6,3

0,6	2,8949	6,3
0,7	2,6390	6,0
0,8	2,4455	6,0
0,9	2,2934	5,7
1,0	2,1699	5,2

Таблица 3.2 – Трехконтурная СПР

$T_{стоп}$,	$M_{y\Sigma max}$, . .	$t_{пп}$,
0,1	3,6492	6,2
0,2	3,6527	6,2
0,3	3,5757	6,2
0,4	3,4632	6,2
0,5	3,2747	6,2
0,6	2,9748	6,2
0,7	2,7204	6,2
0,8	2,5246	5,9
0,9	2,3862	5,9
1,0	2,2698	5,5

Для того что бы бросок тока якорной цепи не превышал стопорное значение использована отсечка по току якорной цепи. Рассмотрены переходные процессы электропривода с системой подчиненного регулирования (рисунки 3.1 – 3.4) при темпе стопорения $T_{стоп}$ от 0,1 до 1 с шагом 0,1. Осциллограммы переходных процессов двух- и трехконтурной систем подчиненного регулирования представлены в приложениях Г и Д.

Оценка осциллограмм и значений переходных процессов показала, что при увеличении $T_{стоп}$ увеличивается быстродействие системы и уменьшаются броски упругого момента. Наилучший результат в плане быстродействия и ограничения упругого момента у двухконтурной системы подчиненного

регулирования показала осциллограмма переходных процессов при T_{cmon} = 1 с, $t_{пп}$ = 5,2 с.

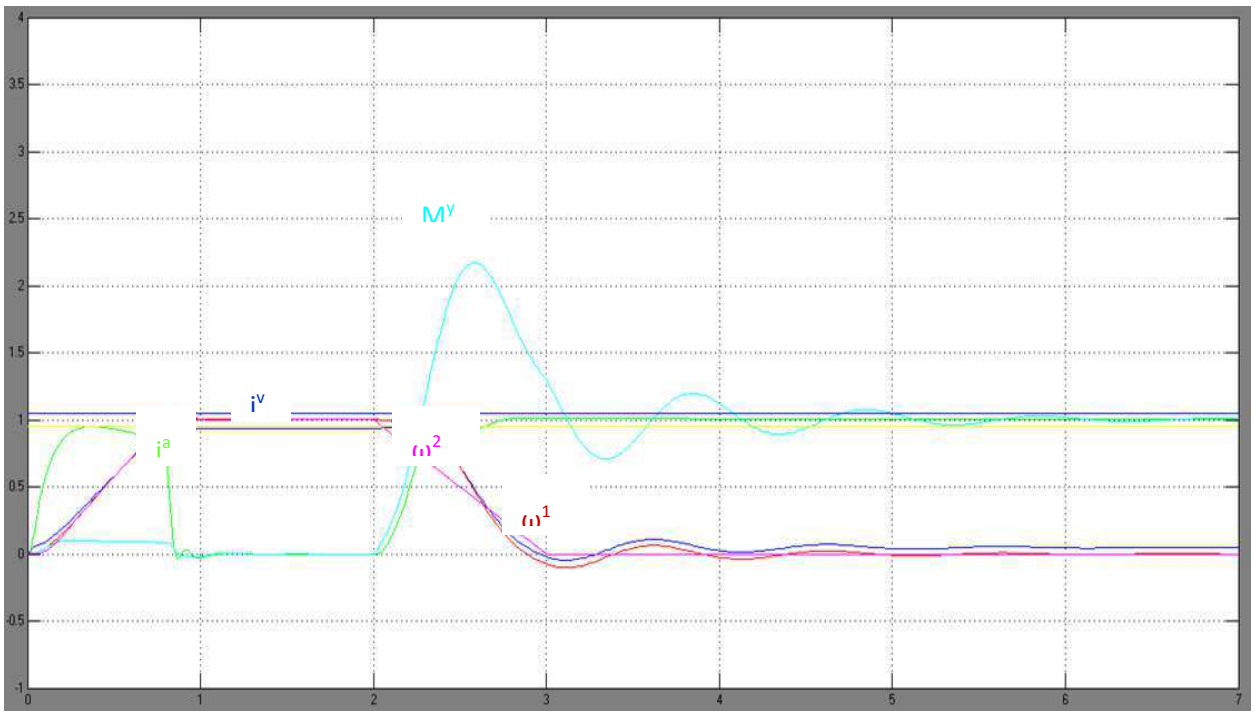


Рисунок 3.1 – Осциллограммы переходных процессов при T_{cmon} = 1

Наихудший результат у двухконтурной системы подчиненного регулирования при T_{cmon} = 0,1 с, $t_{пп}$ = 6,5 с.

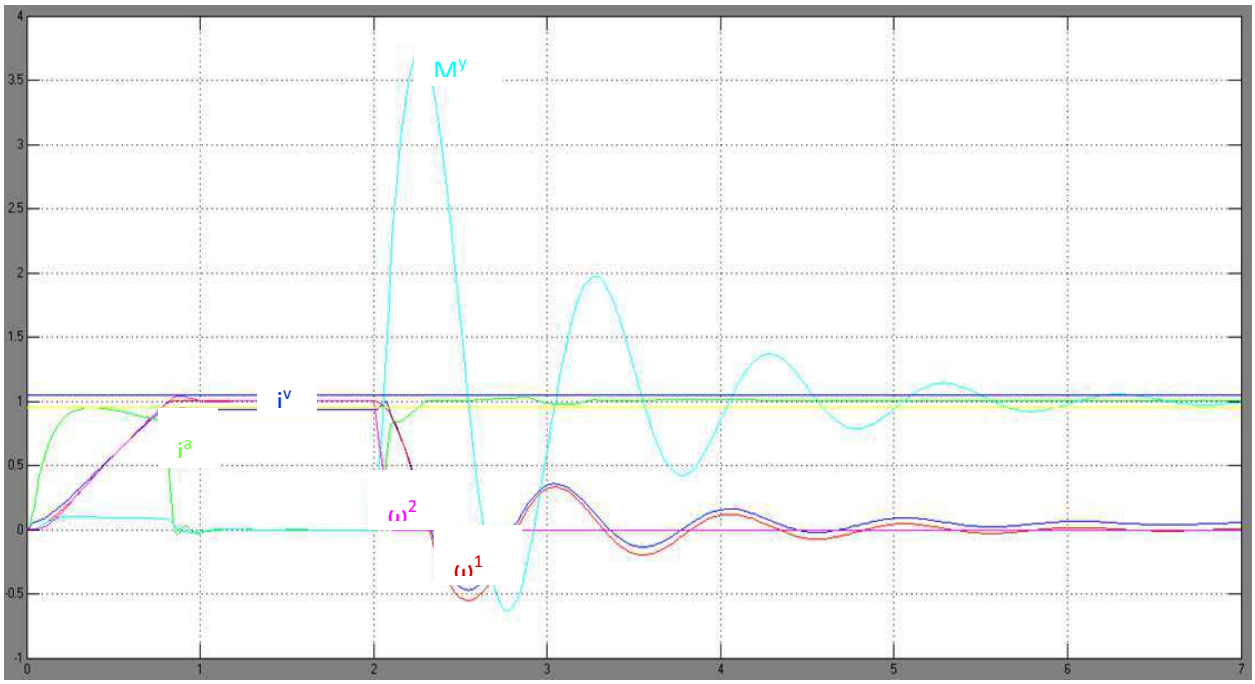


Рисунок 3.2 – Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с двухконтурной системой подчиненного регулирования при T_{cmon} = 0,1

Аналогично для трехконтурной системы подчиненного регулирования:

Наилучший результат при T_{cmon} = 1 с, $t_{пп}$ = 5,5 с.

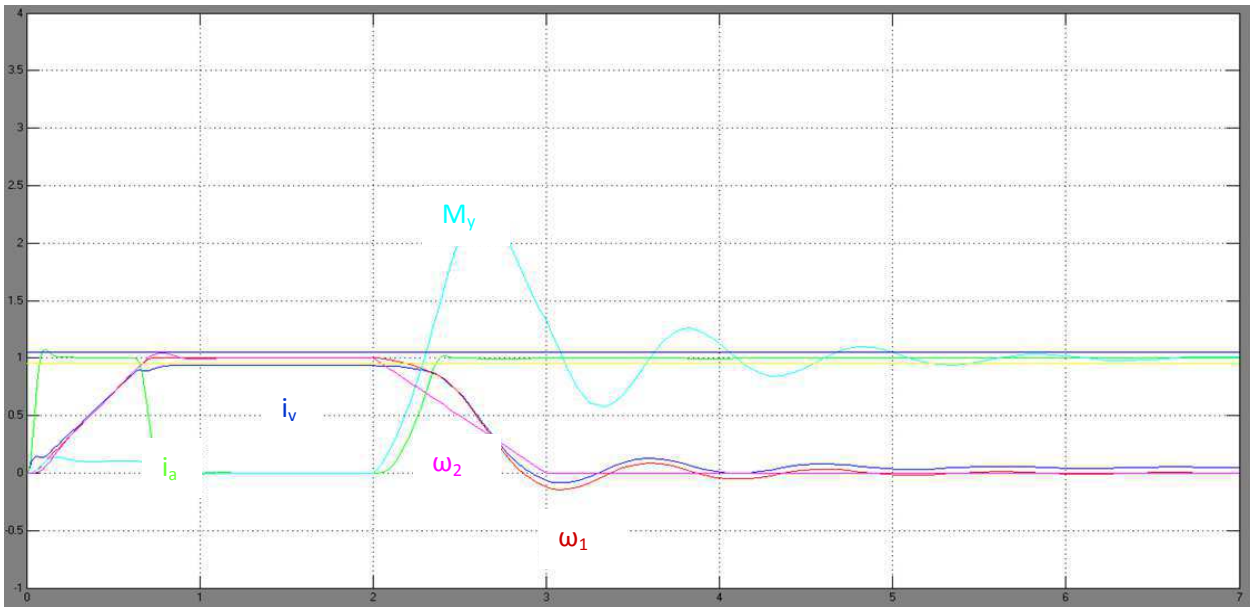


Рисунок 3.3 – Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с трехконтурной системой подчиненного регулирования при T_{cmon} = 1

Наихудший результат при T_{cmon} = 0,1 с, $t_{пп}$ = 6,2 с.

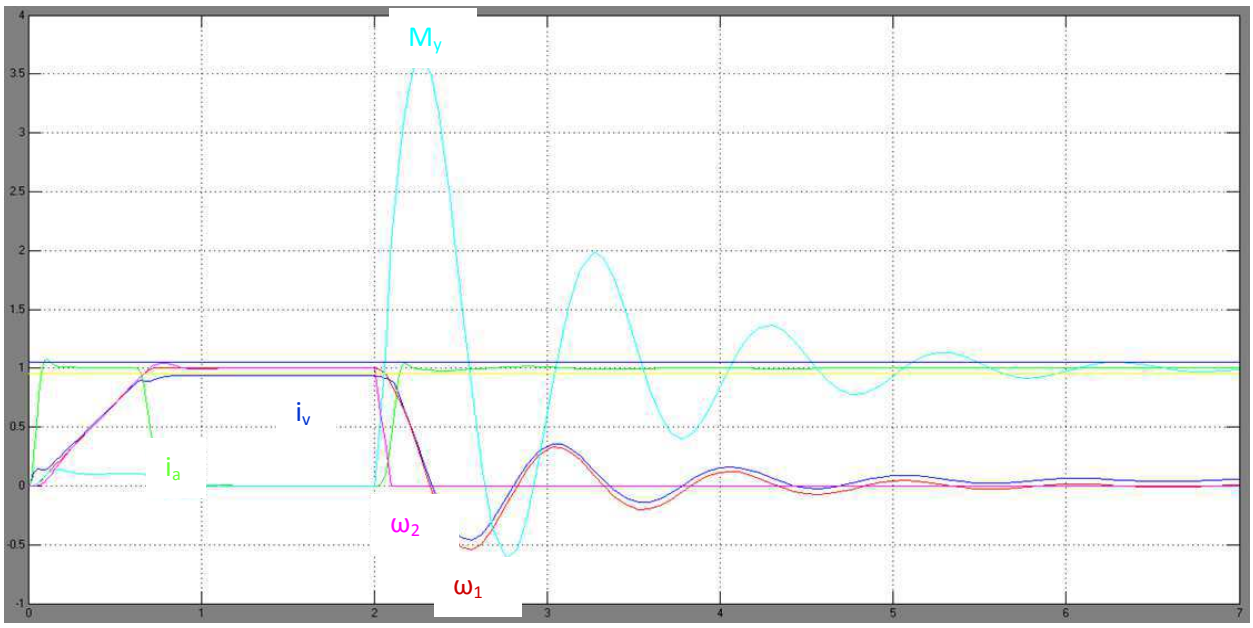


Рисунок 3.4 – Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с трехконтурной системой подчиненного регулирования при T_{cmon} = 0,1 с

Сравнивая двух- и трехконтурные системы подчиненного регулирования, можно сделать вывод, что более быстродействующей являются двухконтурная система подчиненного регулирования при наибольшем T_{cmon}, менее быстродействующей – двухконтурная при наименьшем T_{cmon}. Также двухконтурная система подчиненного регулирования лучше всего ограничивает броски упругого момента при наибольших значениях T_{cmon}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе представлены результаты исследования динамики электропривода постоянного тока с системой подчиненного регулирования координат экскаватора с различными системами управления электроприводом - системами подчиненного регулирования, собраны необходимые модели и проведено имитирование тем самым поставленная в работе цель достигнута, а задачи решены в полном объёме.

В работе использованы методы математического и графического моделирования.

В настоящее время Парк экскаваторов в России примерно на 80% изношен, только в Хакасии имеется несколько разрезов: Изыхский разрез, Черногорский угольный комбинат, «Разрез Степной», Сорский молибденовый комбинат и др. Ограничение динамических нагрузок в экскаваторах позволит повысить надежность работы и увеличить производительность. На экскаваторах серийно применяют только модернизированные системы подчиненного регулирования профессора В.И. Ключева – специфические системы, в которых внутренним контуром является контур тока якоря, а внешним – контур питающего напряжения. Их можно отнести к системам последовательной коррекции.

Недостатком систем подчиненного регулирования является сложность синтеза в результате появившейся необходимости компенсации внутренних обратных связей. Реализовывать данные компенсации на практике также сложно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, В.В. Электрические машины. Моделирование электрических машин электроприводов горного оборудования [текст]: учеб. пособие / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, Э.А. Загривный. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2006. – 58 с.

2. Валиев, Р.М. Разработка структур систем управления электроприводами главных механизмов одноковшовых экскаваторов-мехлопат [текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.09.03 / Валиев Рустам Мансурович. – М., 2007. – 150 с. – Библиогр.: 131–140 с.

3. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [текст]. - СПб. КОРОНА - Век, 2008. - 368 с.

4. Исследование прогнозирующего управления электротехническими системами ветровых электростанций [текст] / А.А. Колесников, Е.Я. Глушкин, А.В. Букатов, А.В. Коловский // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2008. – №3(13), – С. 24–26.

5. Ключев, В.И. Учебное пособие по курсу «Теория электропривода» 2-е издание перераб. и доп. / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

6. Коловский, А.В. Синтез системы управления с переменной структурой электроприводом с использованием эталонной модели [текст] / А.В. Коловский, Е.В. Аболтынь, С.В. Дьяченко // Современные техника и технологи: сб. трудов XV Междунар. научн.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3-х т. Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009 – С. 230–231.

7. Коловский, А.В. Синтез систем управления автоматизированным экскаваторным электроприводом с использованием скользящих режимов [текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.09.03 /

Коловский Алексей Владимирович. – Абакан 2012. – 173 с. – Библиогр.: 150–165 с.

8. Кочетков, В.П. Совершенствование экскаваторного электропривода [Текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011): доклады 17-й Междунар. научн.-практ. конф. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2011. – С. 84–88.

9. Кочетков, В.П. Применение системы с переменной структурой и явной эталонной модели для управления экскаваторным электроприводом [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2, С. 250 – 253.

10. Кочетков, В.П. Основы электромеханики: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В.П. Кочетков [и др.]; под ред. В.П. Кочеткова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. – 624 с.

11. Кочетков, В.П. Исследование динамики электропривода поворота экскаватора с комбинированной оптимальной системой управления [текст] / В.П. Кочетков, Н.С. Курочкин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет" г. Уфа. – 2016. –Т.20 №3 (37). – С. 101–106.

12. Кочетков, В.П. К вопросу о математической модели электромеханической системы [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов XVII Межд. науч. конф. – Кострома: Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2004. – С. 173–175.

13. Кочетков, В.П. К вопросу о физико-математическом моделировании динамики экскаваторного электропривода [текст] / В.П Кочетков, А.А Колесников, А.В Коловский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях:

тр. 3-ей всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 76–81.

14. Кочетков, В.П. Компьютерное моделирование электропривода с учетом жесткости и зазора в механической части [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов 5-й Межд. науч.-тех. конф. Ч. 1. – СПб: «Нестор», 2004. – С. 230–234.

15. Кочетков, В.П. Оптимизация систем автоматического управления экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.В Коловский, Н.С. Дьяченко, И.С. Рублевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. VI всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 223–227.

16. Кочетков, В.П. Основы электропривода [текст]: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. –2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.

17. Кочетков, В.П. Совершенствование экскаваторного электропривода [Текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011): доклады 17-й Междунар. научн.-практ. конф. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2011.–С.84–88.

18. Курочкин, Н.С. Переходные процессы электрического привода с квазиоптимальной системой управления [текст] / Н.С. Курочкин // Результаты фундаментальных и прикладных исследований в России и за рубежом. Материалы международной научно-практической конференции – Новокузнецк: НИЦ «Поволжская научная корпорация», 2016. – С. 151–153.

19. Курочкин, Н.С. Синтез комбинированной оптимальной системы управления для асинхронных электроприводов экскаваторов [текст] / Н.С. Курочкин // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Седьмой Всерос. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: СибГИУ, 2016. – С. 162–169.

20. Курочкин, Н.С. Динамика автоматизированного электропривода с комбинированной оптимальной системой управления [текст] / Кочетков В. П., Курочкин Н. С // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17. № 2. С. 393–402.

21. Курочкин, Н.С. Динамика экскаваторного электропривода переменного тока с комбинированной оптимальной системой управления [текст] / Кочетков В. П., Курочкин Н. С // Известия вузов. Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 109-116.

22. Курочкин, Н.С. Моделирование и исследование динамики электропривода поворота экскаватора с комбинированной оптимальной системой управления [текст] / В.П. Кочетков, Н.С. Курочкин, А.В. Коловский, Е.Я. Глушкин // Автоматизация процессов управления – Научно-производственное объединение "Марс". – 2016. – №3 (45). – С. 30–37.

23. Подборский, П.Э. Совершенствование методов синтеза систем управления электроприводами поворотных механизмов карьерных экскаваторов [текст] : дис. … канд. техн. наук : 05.09.03 / Подборский Павел Эдуардович. – Абакан, 2006. – 205 с.

24. Черных, И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложении [текст] / Под общ. ред. к. т. н. В. Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 496 с.

25. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [текст] / Р.Т. Шрейнер, - Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Каталожные данные экскаватора приведены в табл. А. 1

Таблица А.1 – Технические характеристики экскаватора ЭКГ-8И

Элемент характеристики	Параметры экскаватора ЭКГ-8И
Емкость ковша, $м^3$	8
Масса ковша, т	15.6
Длина стрелы, м	13.4
Длина рукояти, м	11.5
Масса рукояти, т	10.4
Максимальная высота черпанья, м	13.3
Максимальный радиус черпанья, м	17.5
Максимальный вылет рукояти, м	11.1
Высота оси пяты стрелы, м	5.01
Высота напорного вала, м	8.31
Угол наклона стрелы, град.	47
Диаметр головного блока стрелы, м	1.6
Диаметр барабана подъемной лебедки, м	1.4
Диаметр напорного барабана, м	1.2
Максимальная скорость подъема ковша, м/с	0.94
Максимальная скорость напора, м/с	0.45
Максимальное усилие в канате (копающий механизм), кН	784
Максимальное усилие в канате (напорный механизм), кН	350
Расчетная продолжительность цикла при повороте на 90º, с.	23
Передаточные числа механизмов	
напора	41
подъема	25.41
поворота	268.7

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Каталожные данные двигателя и генератора приведены в табл. Б.1.

Таблица Б.1 – Сведения о параметрах электропривода подъема экскаватора ЭКГ-8И

Наименование	Обозначение	Генератор	Двигатель
Тип	-	ГПЭ 450-1000	ДПЭ-82А
Количество, шт.	-	1	2
Мощность, кВт	-	450	190
Напряжение, В	$U_{а.г.н}$, $U_{а.д.н}$	560	270
Ток номинальный, А	$I_{а.г.н}$, $I_{а.д.н}$	895	760
Ток стопорный, А	–, $I_{а.д.н}$	–	1520
Угловая скорость, рад/с	$\omega_{г.н}$, $\omega_{д.н}$	104,72	77.4926
Сопротивление якоря, Ом	$R_{я.г}$, $R_{я.д}$	7.5×10^{-3}	3.9×10^{-3}
Сопротивление дополнительных полюсов, Ом	$R_{д.п.г}$, $R_{д.п.д}$	1.63×10^{-3}	3.25×10^{-3}
Сопротивление компенсационной обмотки, Ом	$R_{к.о.г}$, $R_{к.о.д}$	5.16×10^{-3}	–
Напряжение возбуждения, В	$U_{в.н}$, –	38.5	85
Ток возбуждения, А	$I_{в.н}$, –	29	19.5
Сопротивление обмотки возбуждения, Ом	$R_{в}$, –	1.3276	4.359
Число полюсов, шт.	$p_г$, $p_д$	4	4
Число витков на полюсе, шт.	$N_г$, –	300	450
Номинальный поток полюса, Вб	$Q_{г.н}$, –	5.78×10^{-2}	–
Момент инерции, кг·м^2	–, $J_д$	–	17

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с двухконтурной системой подчиненного регулирования

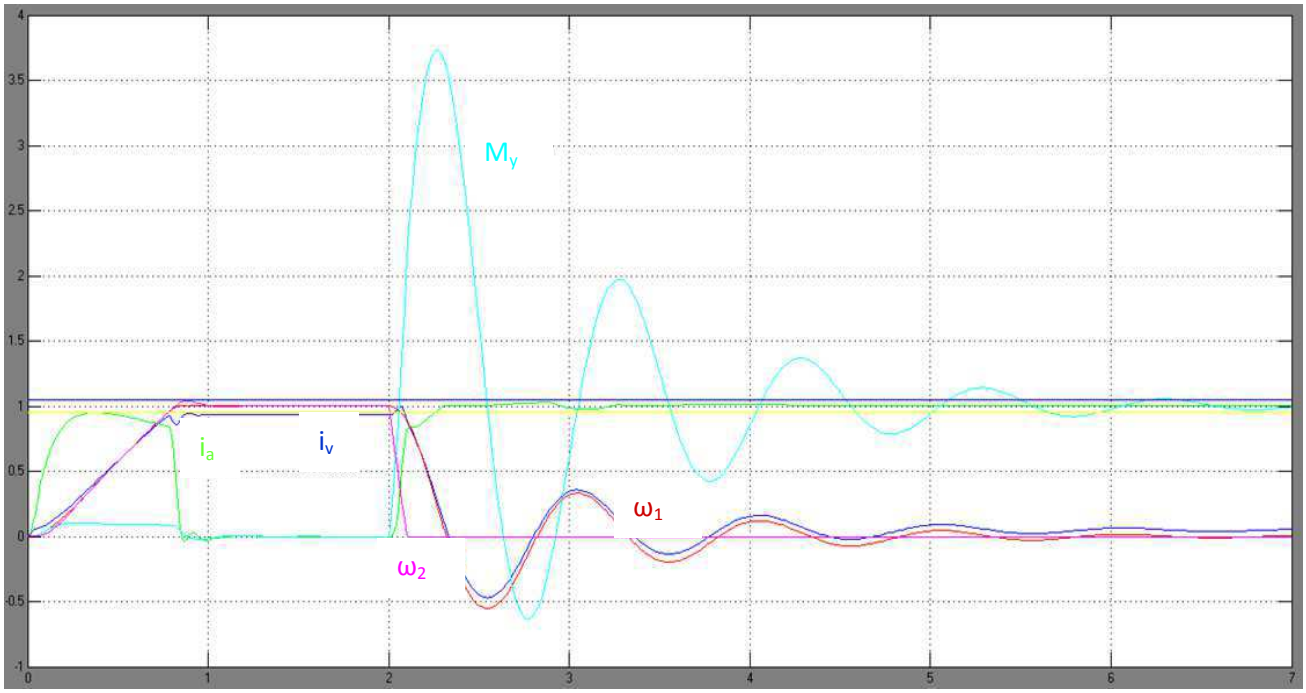


Рисунок В.1 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,1 с

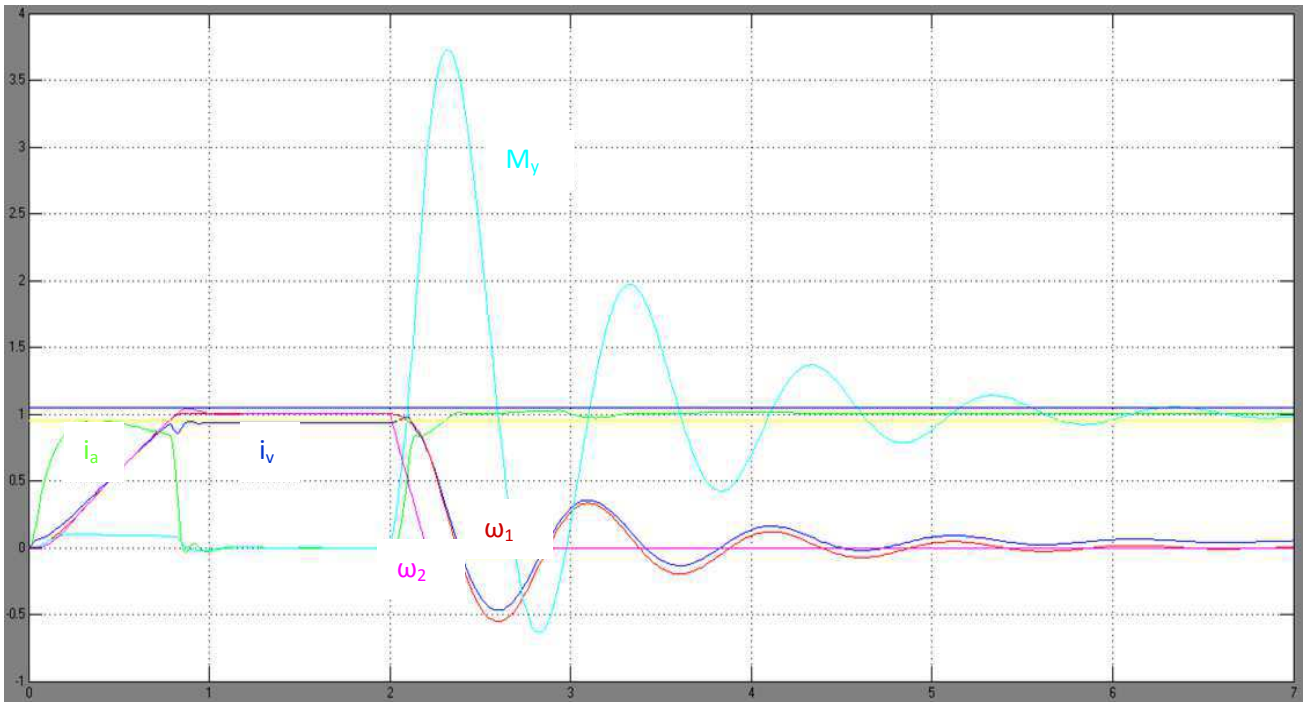


Рисунок В.2 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,2 с

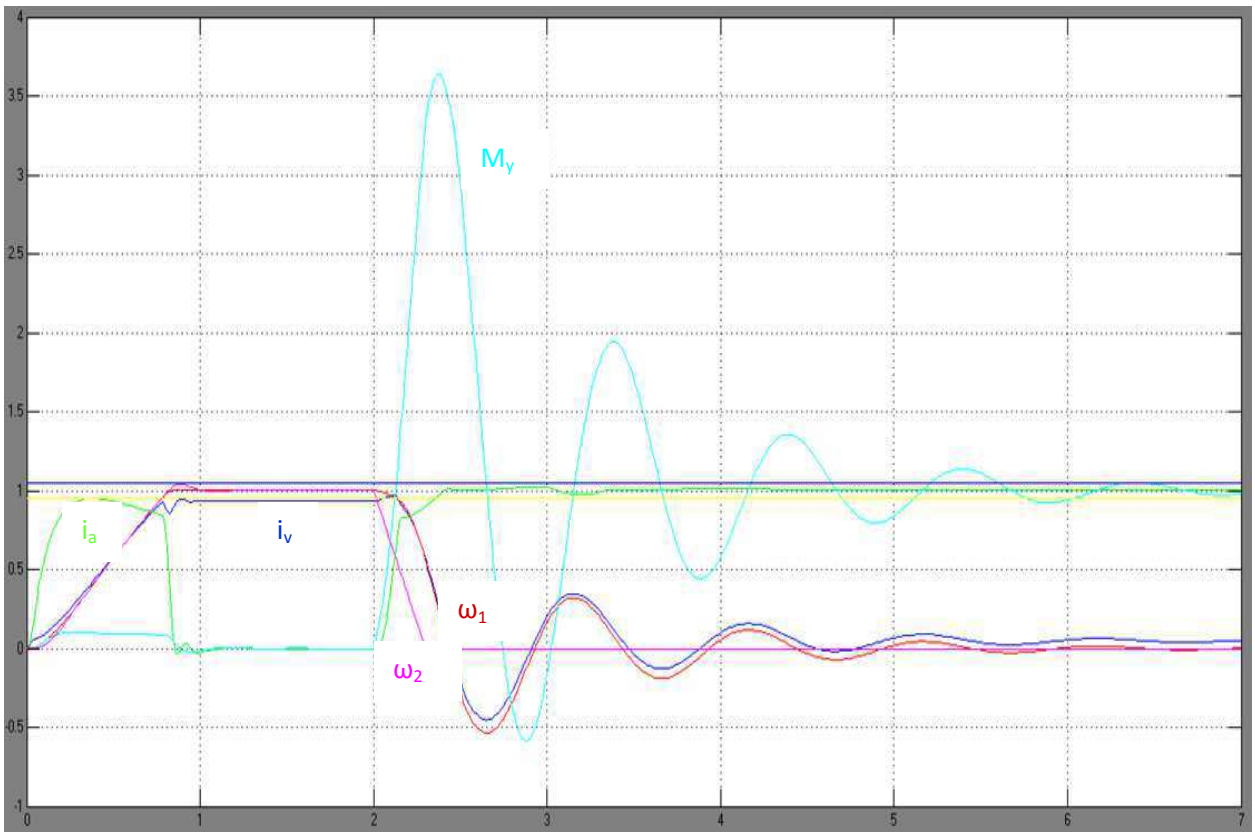


Рисунок В.3 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,3 с

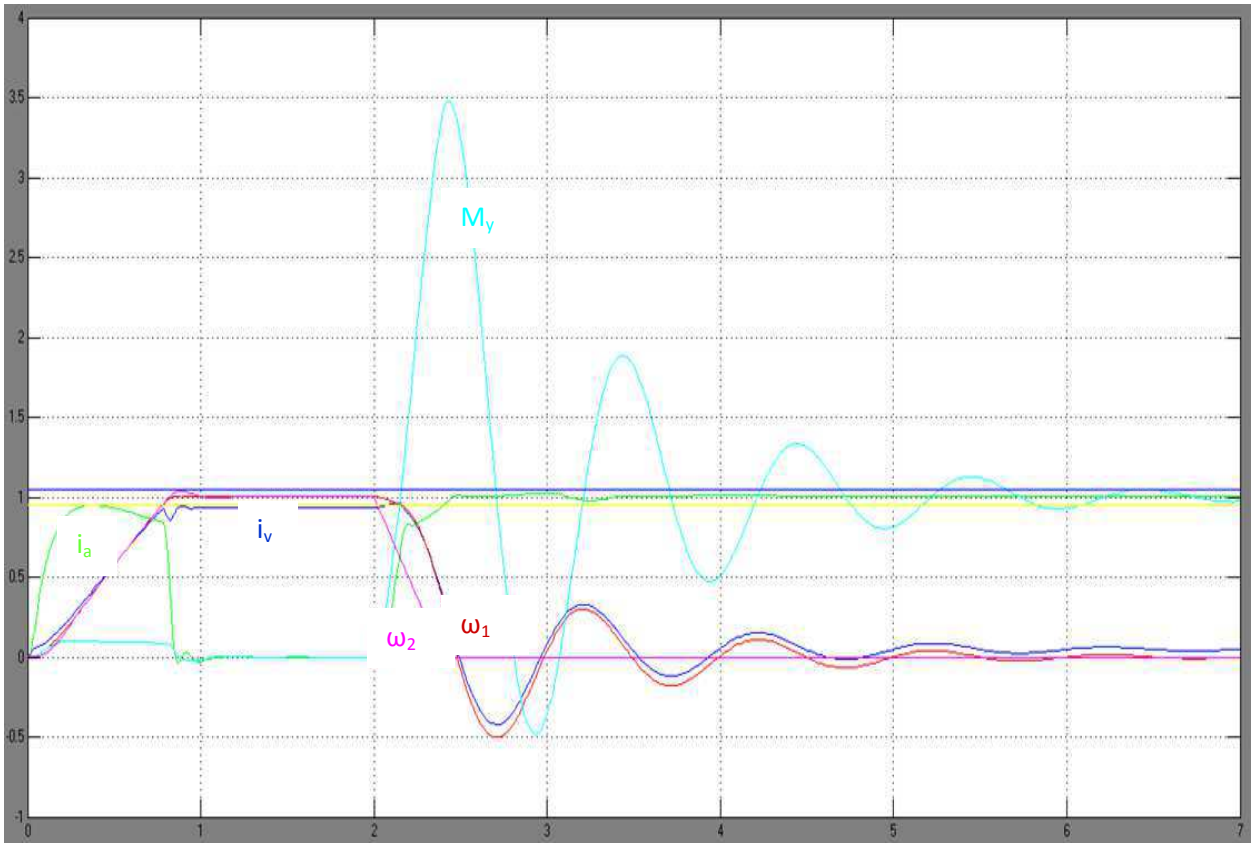


Рисунок В.4 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,4 с

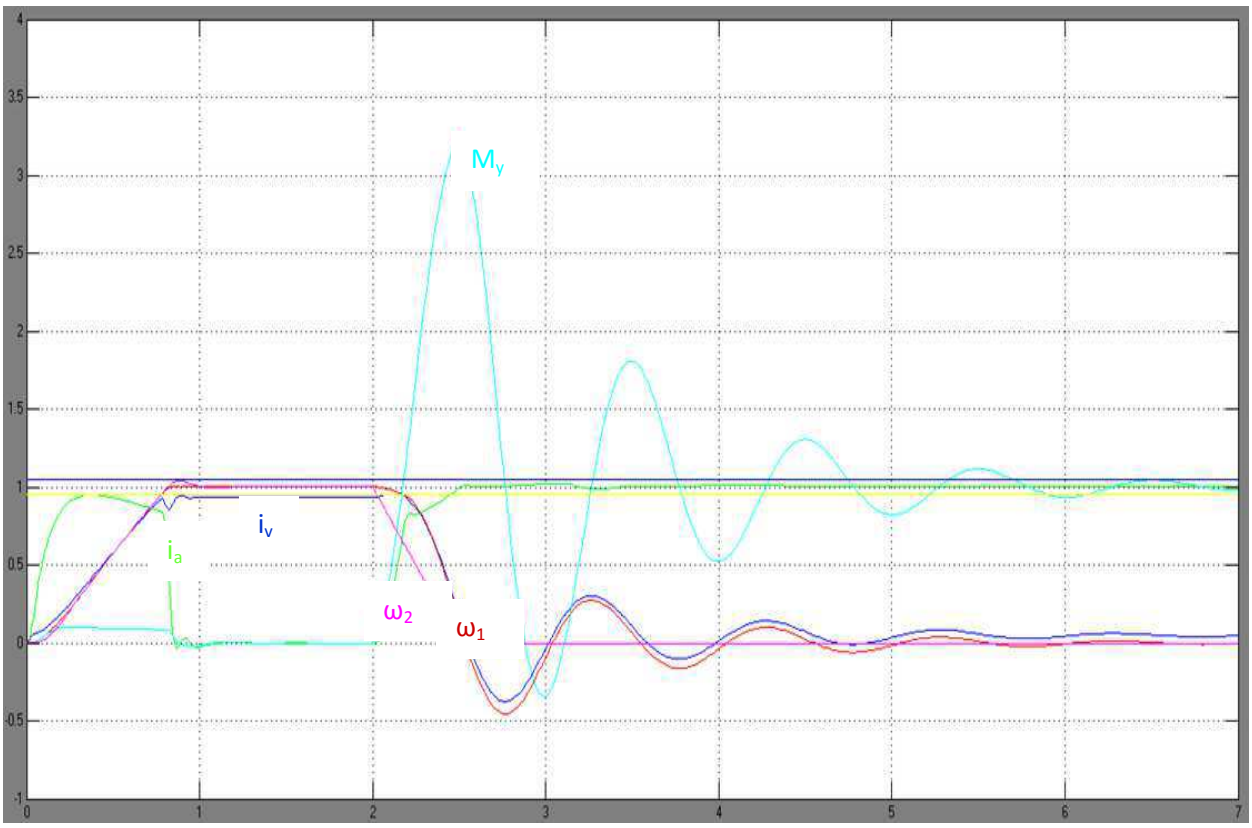


Рисунок В.5 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,5 с

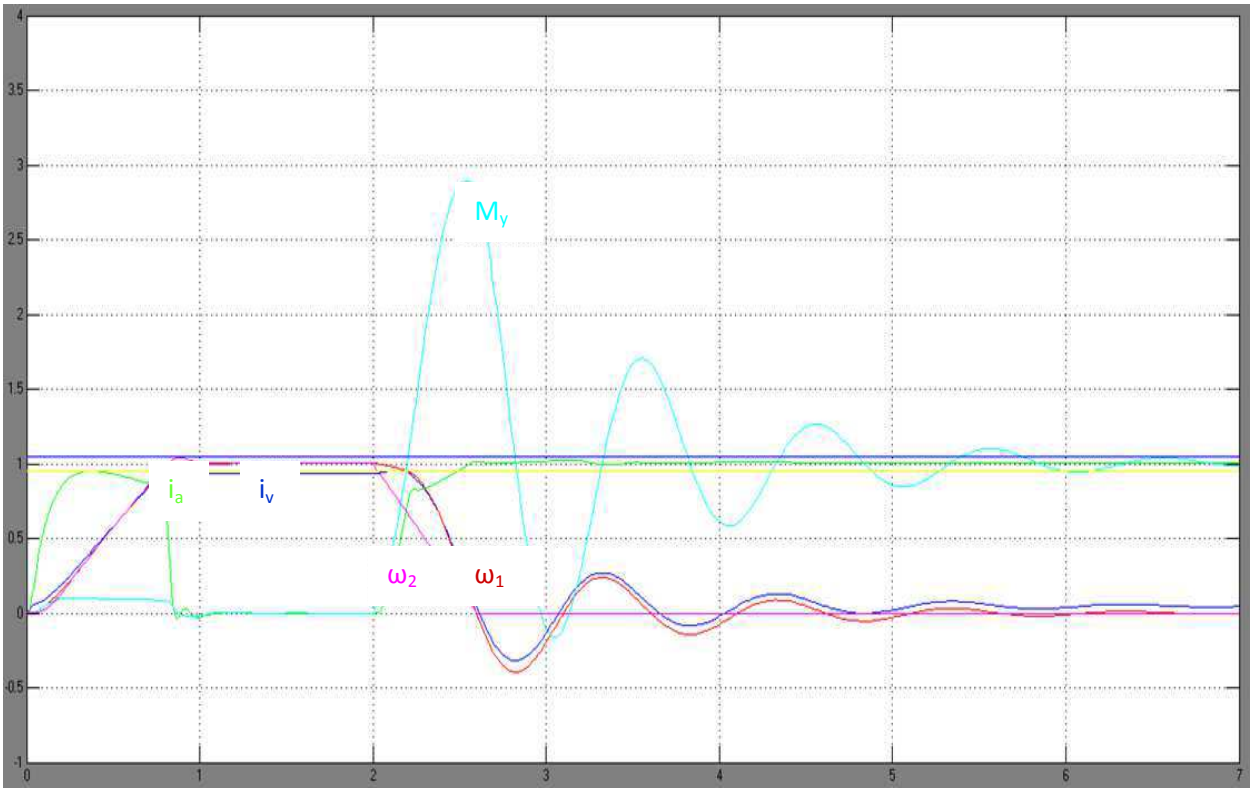


Рисунок В.6 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,6 с

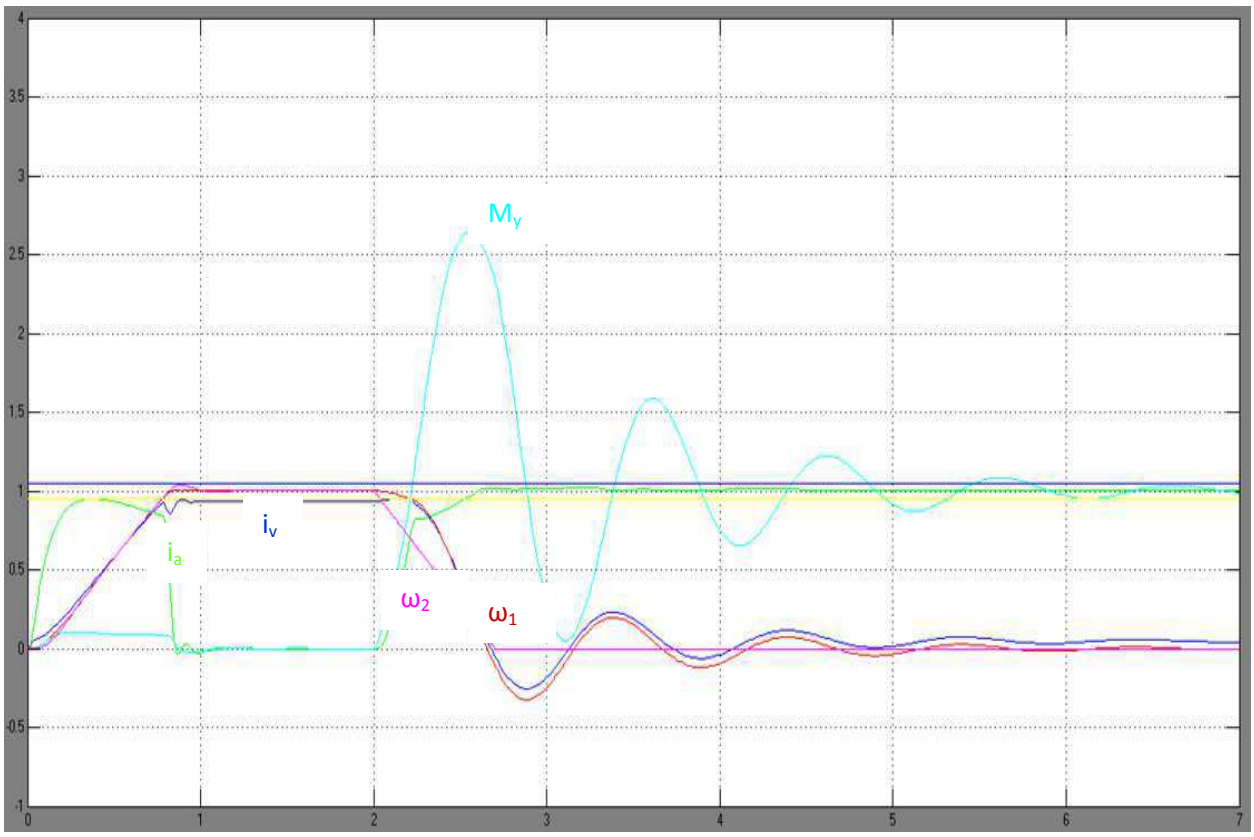


Рисунок В.7 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,7 с

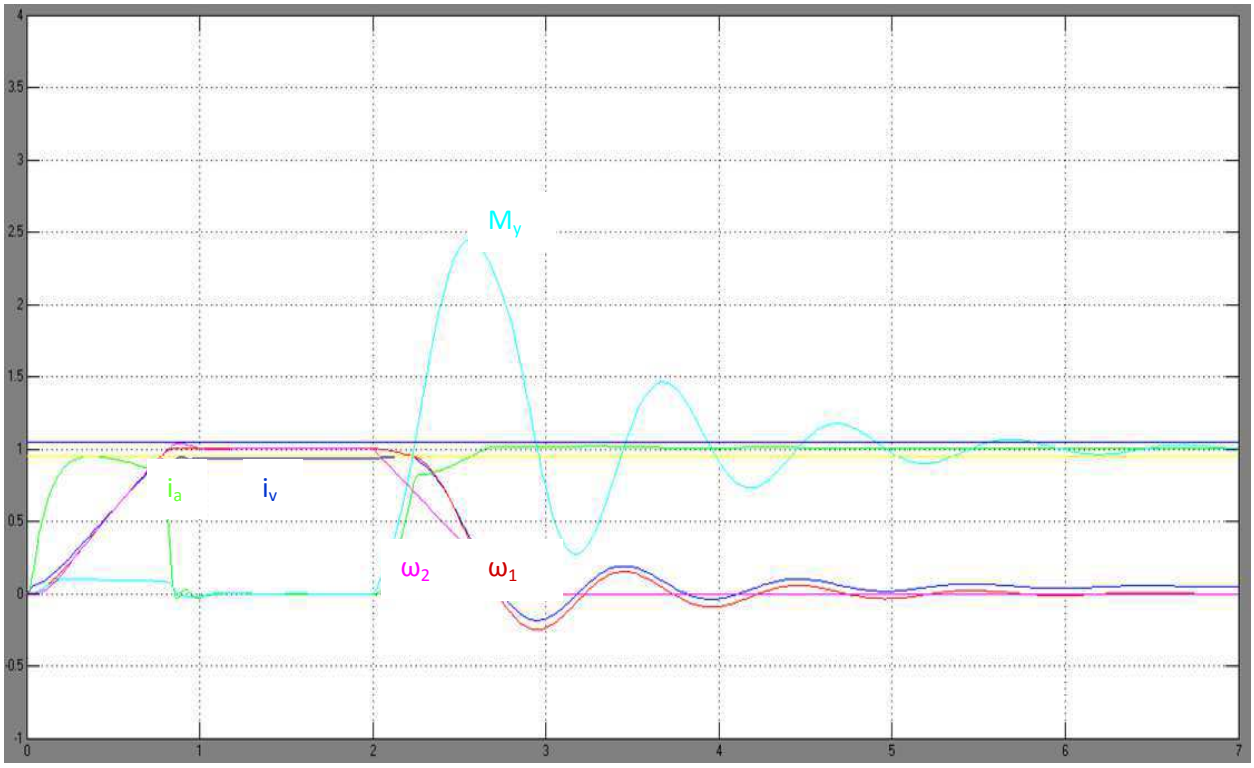


Рисунок В.8 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,8 с

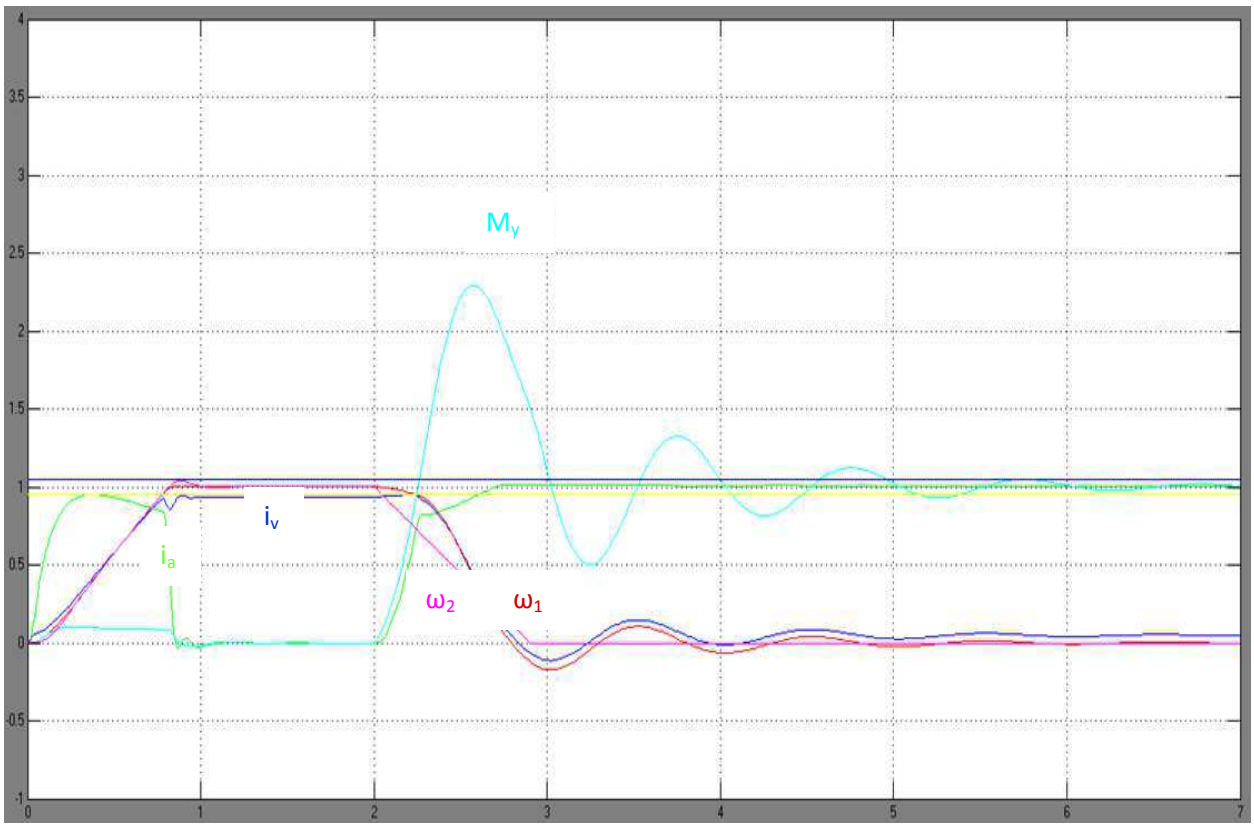


Рисунок В.9 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,9 с

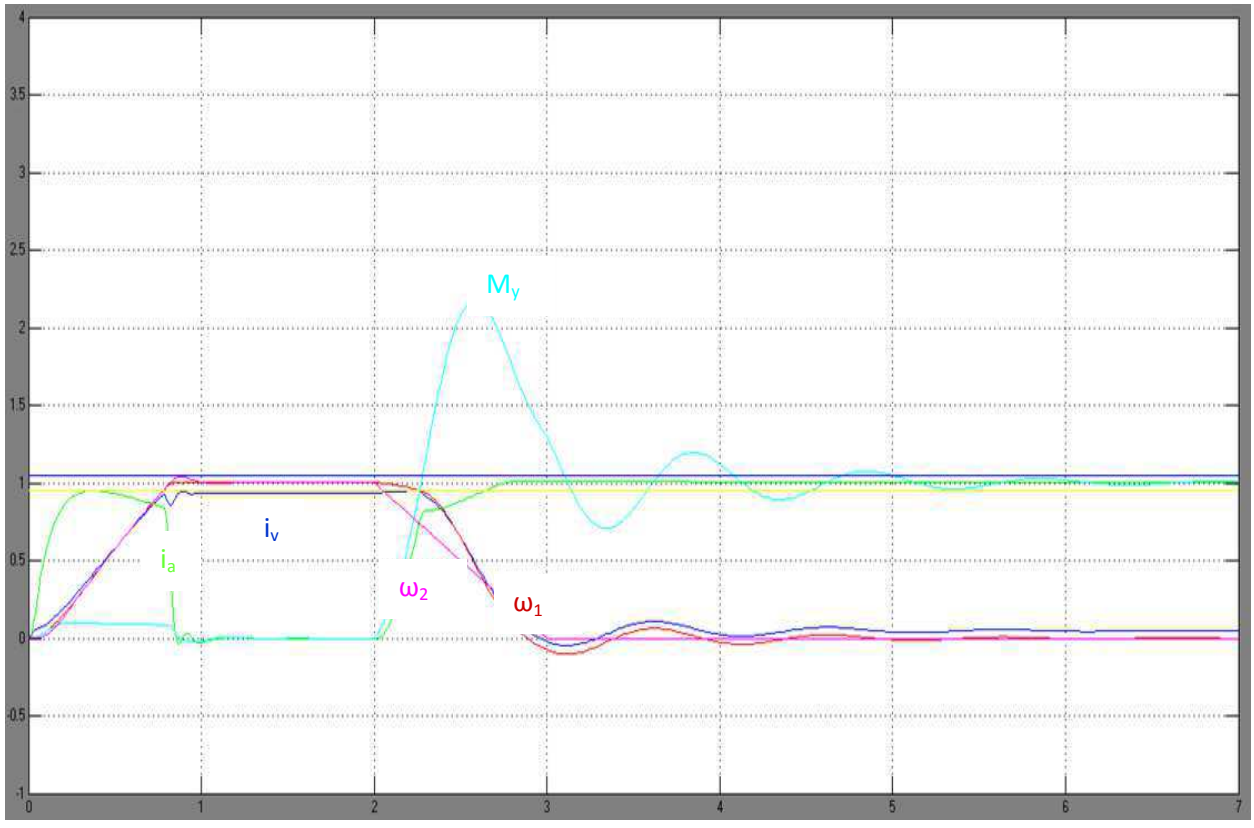


Рисунок В.10 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 1 с

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с трехконтурной системой подчиненного регулирования

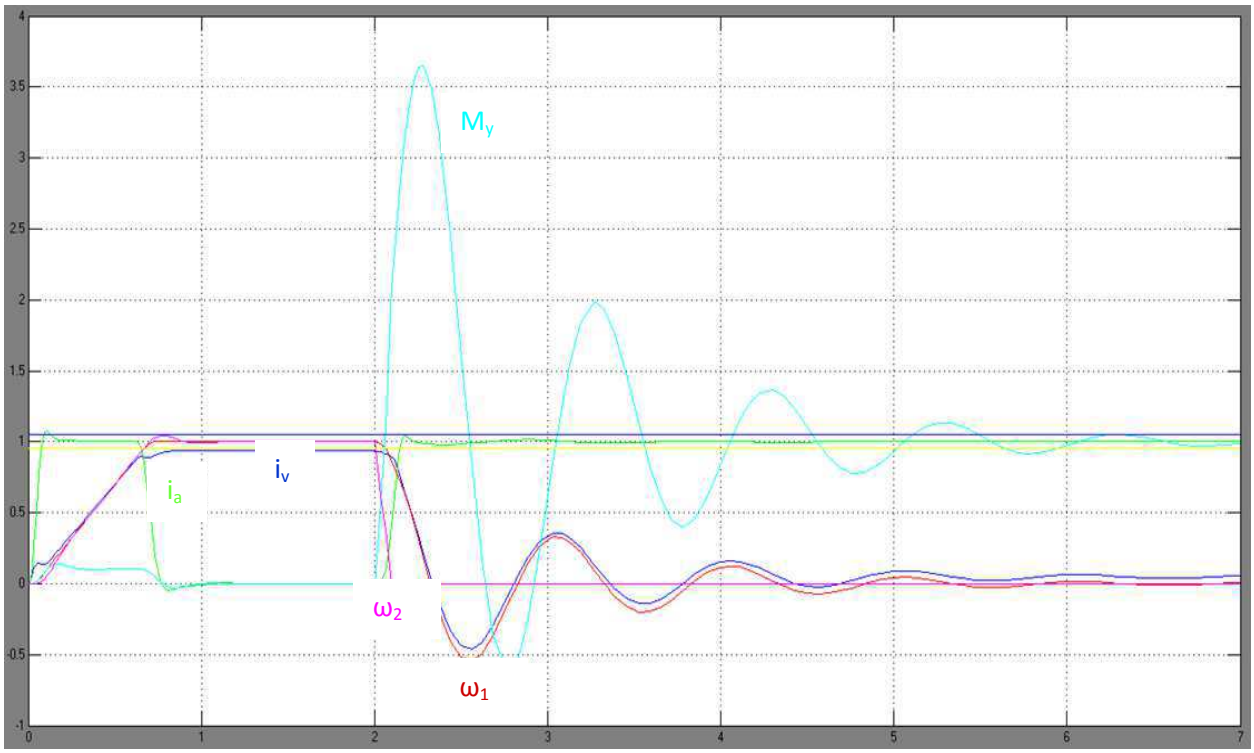


Рисунок Г.1 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,1 с

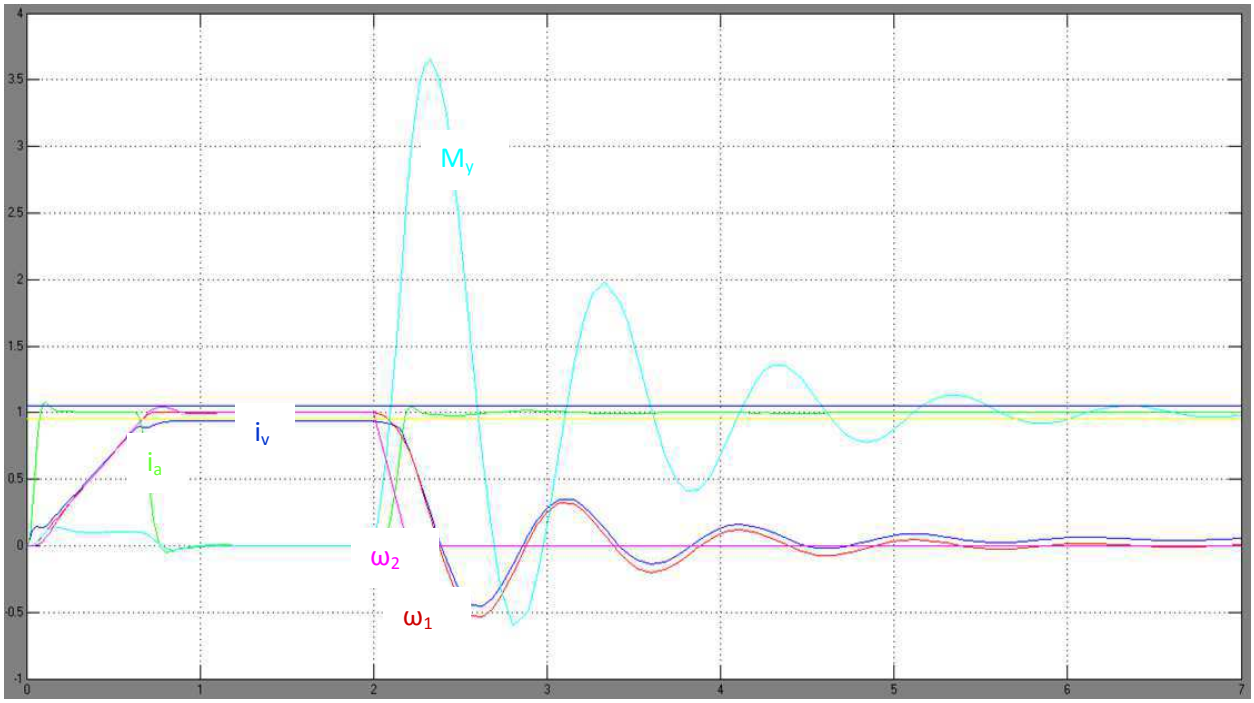


Рисунок Г.2 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,2 с

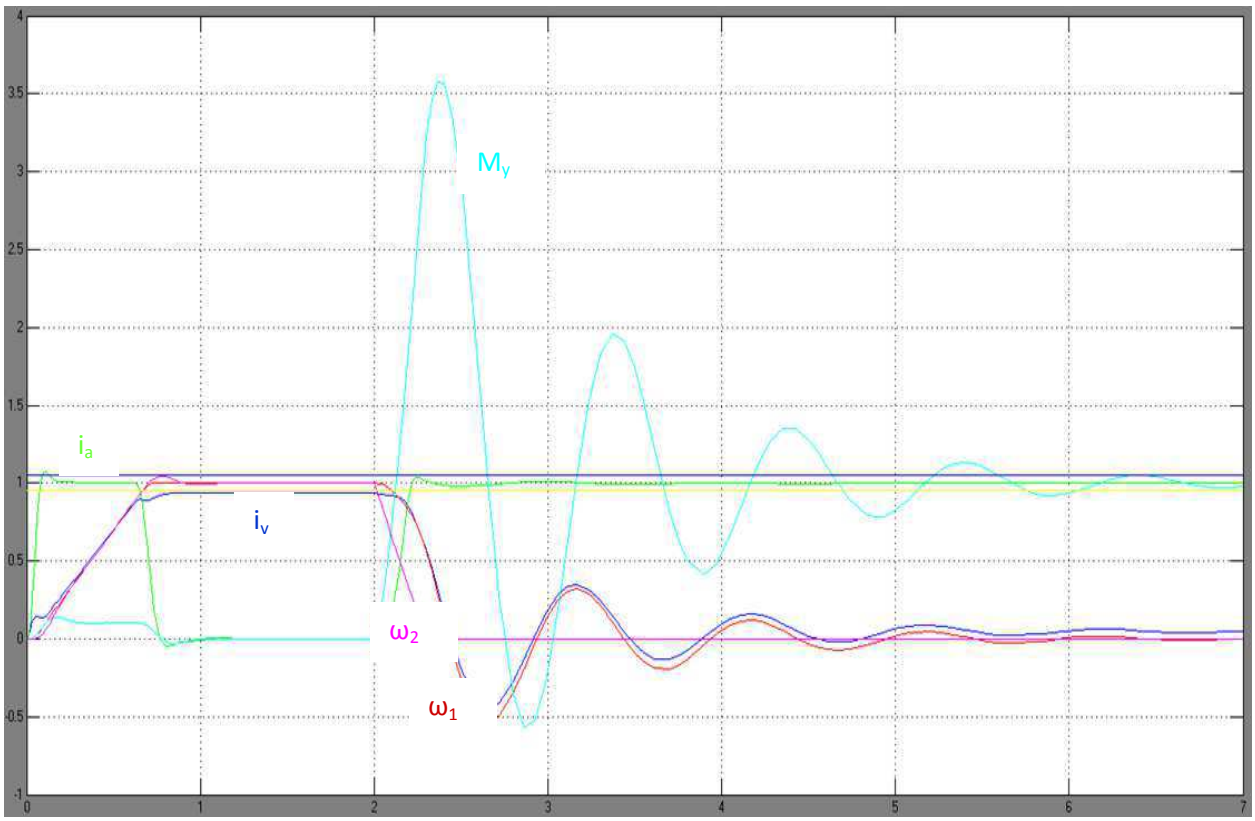


Рисунок Г.3 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,3 с

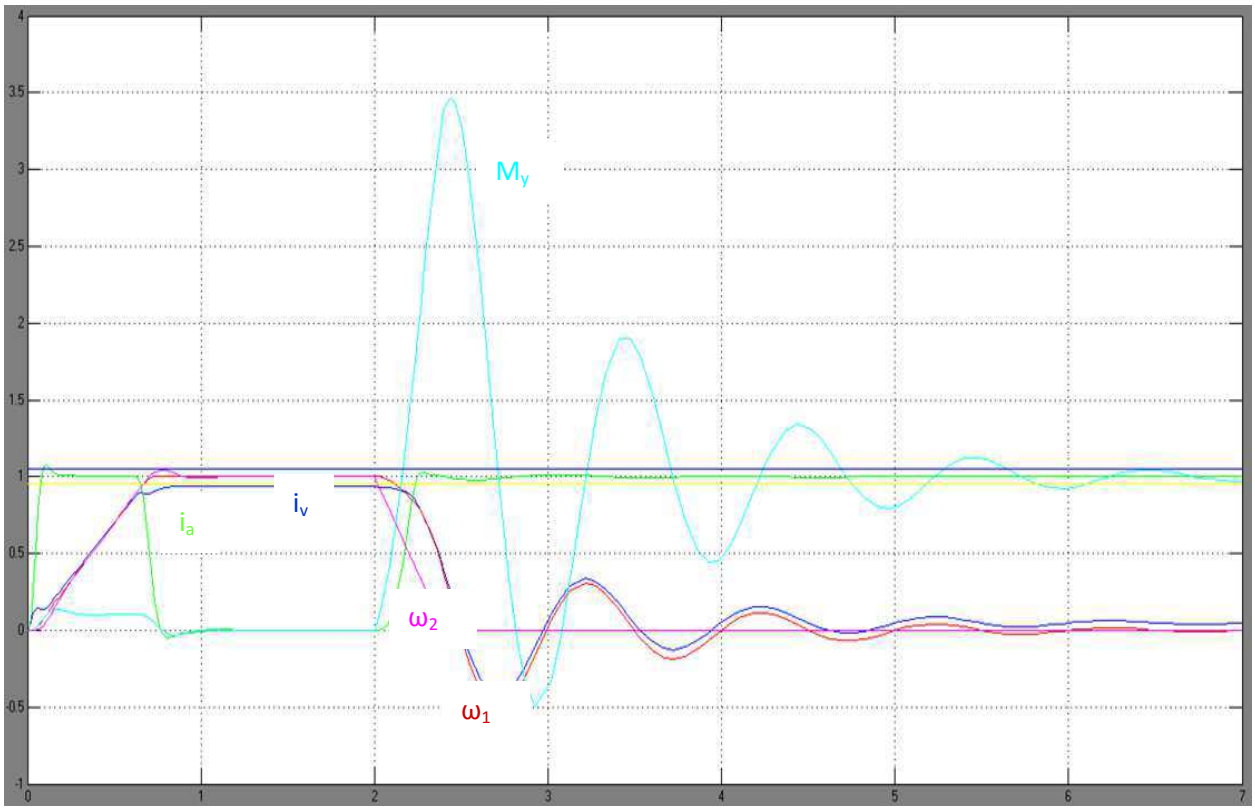


Рисунок Г.4 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,4 с

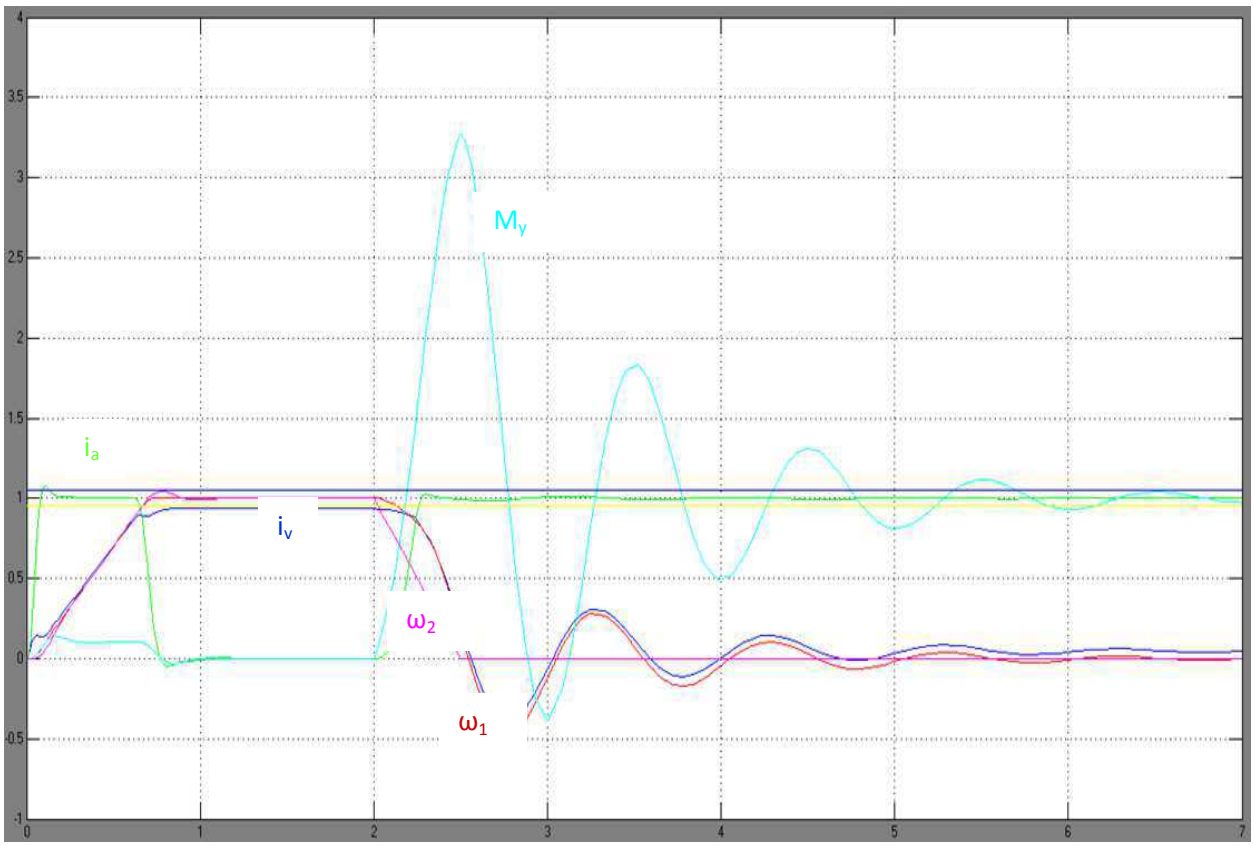


Рисунок Г.5 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,5 с

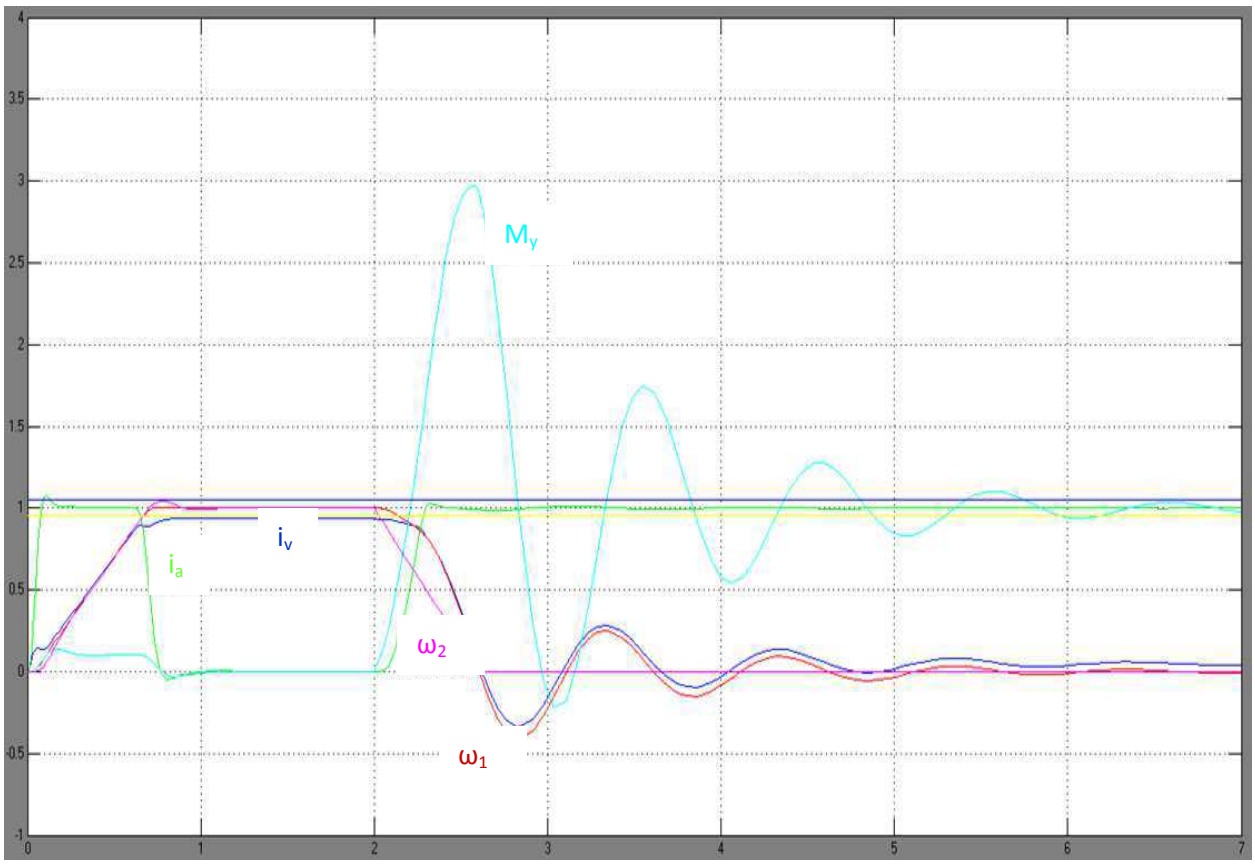


Рисунок Г.6 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,6 с

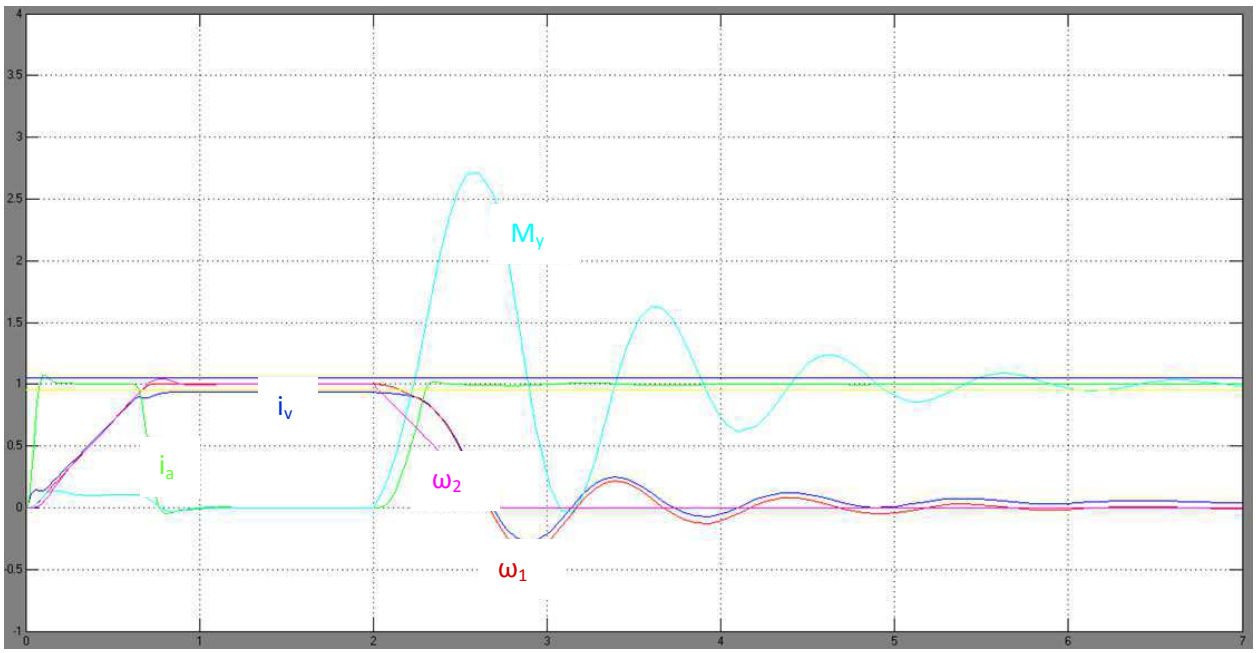


Рисунок Г.7 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,7 с

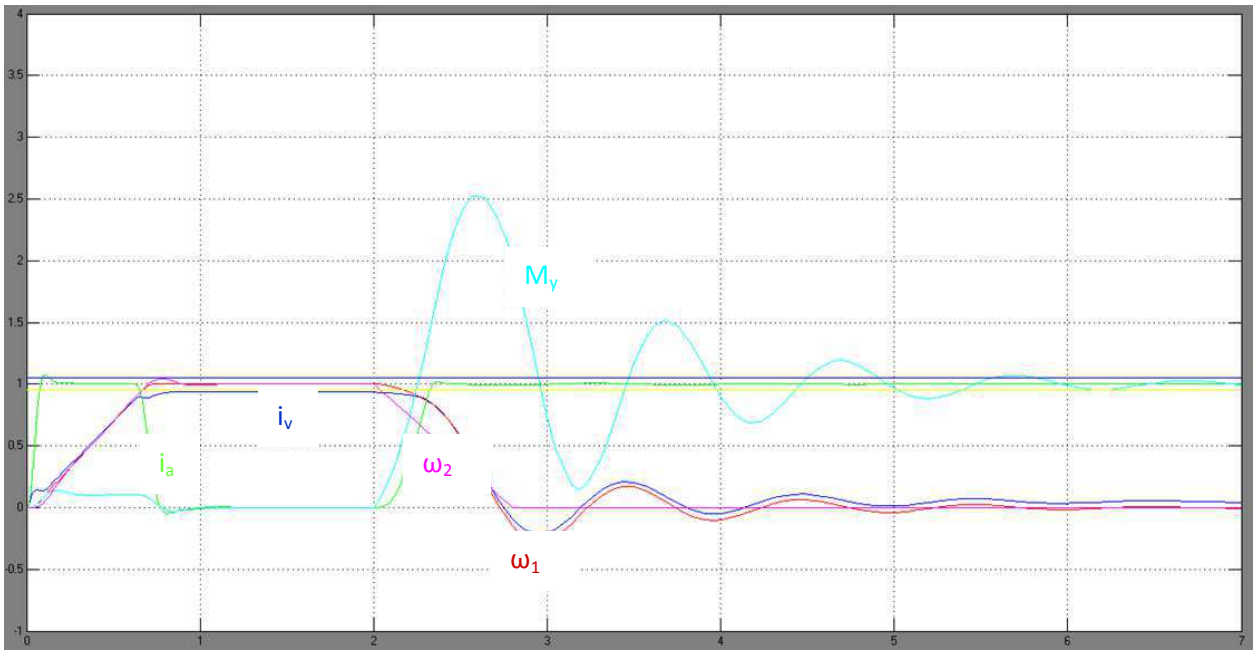


Рисунок Г.8 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,8 с

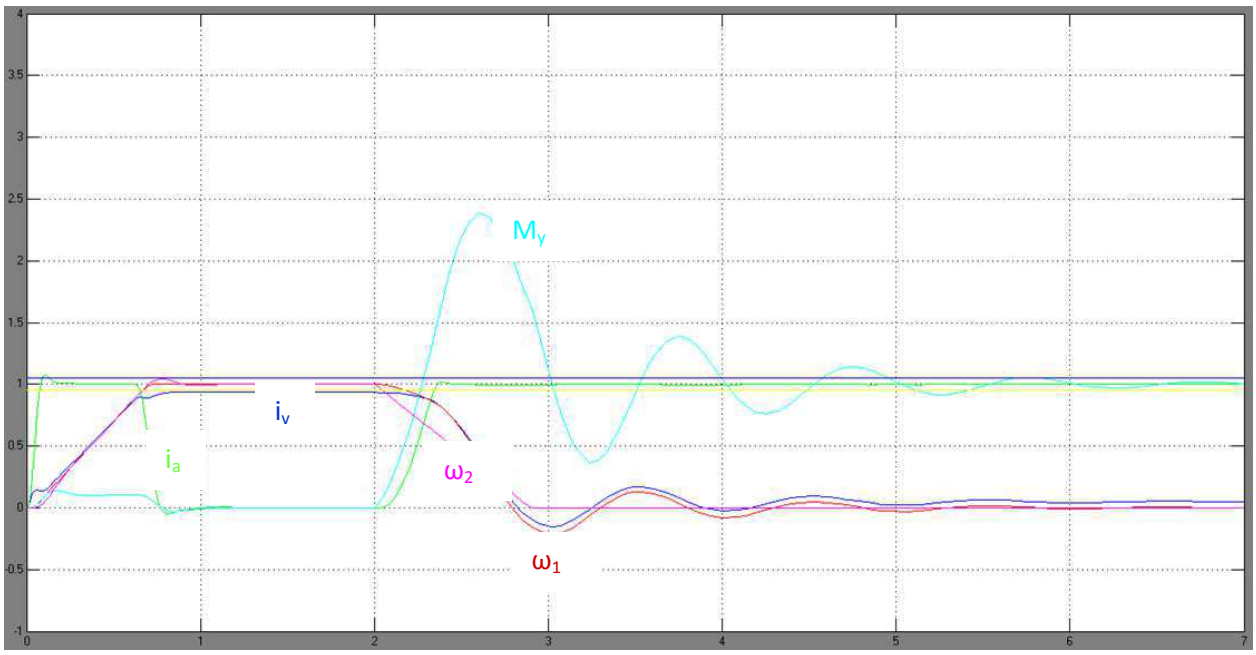


Рисунок Г.9 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 0,9 с

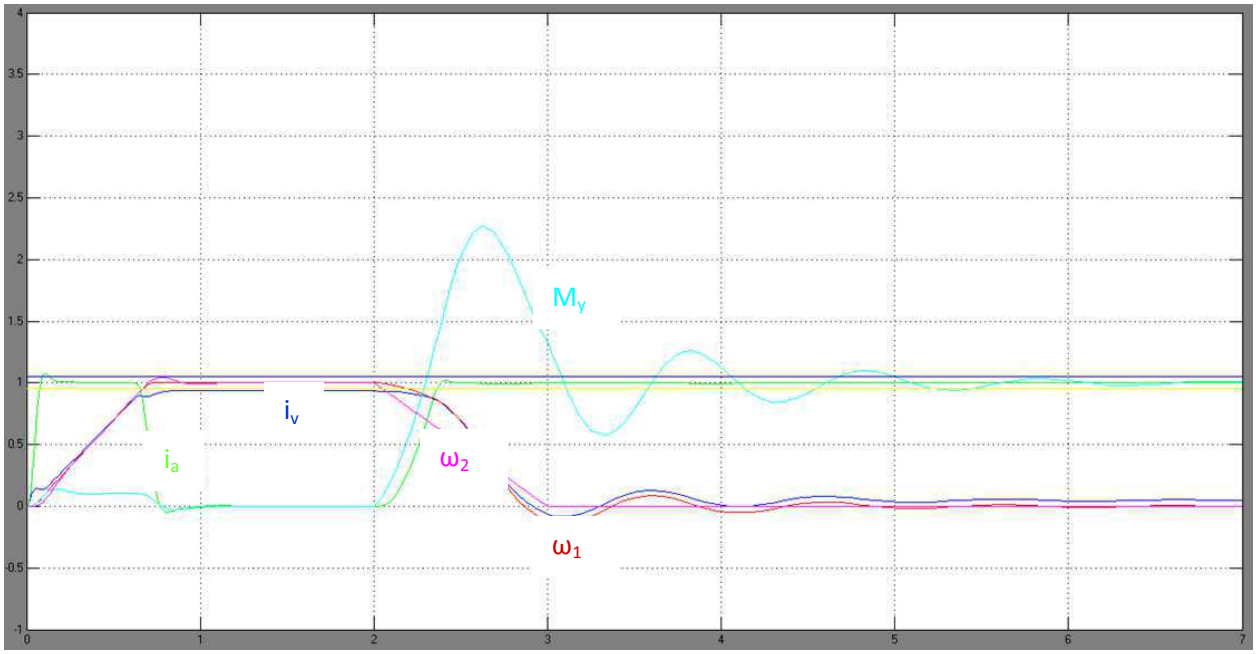


Рисунок Г.10 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{стоп}$ = 1 с

Бакалаврская работа выполнена мной самостоятельно. Использованные в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

Отпечатано в _1__ экземпляре.

Библиография _25_ наименование.

«_____» _____ _____
(дата)

_____ __Пидюров С.Г.
(подпись) (ФИО)

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт

«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
Г. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия
«25» 06 2018 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

«Электропривод постоянного тока системы подчиненного регулирования координат»
тема

Руководитель 16.06.18. профессор, д.т.н. В.П.Кочетков
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник 14.06.18г. С.Г.Пидюров
подпись, дата инициалы, фамилия

Нормоконтролер 18.06.18г. И.А.Кычакова
подпись, дата инициалы, фамилия

Абакан 2018