

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С
ПЕРЕМЕННЫМИ $I_R - \Psi_m$**

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение
(по отраслям)
профиль подготовки «Энергетика»
специализация «Энергохозяйство предприятий, организаций, учреждений и
энергосберегающие технологии»

Идентификационный код ВКР: 537

Екатеринбург 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»
Институт инженерно-педагогического образования
Кафедра энергетики и транспорта

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:
Заведующая кафедрой ЭС
_____ А.О. Прокубовская
«_____» _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С
ПЕРЕМЕННЫМИ $I_R - \Psi_m$

Исполнитель:
студент группы ЗЭС-404С

_____ В.О. Коровин

Руководитель:
доцент кафедры ЭТ

_____ А.А. Емельянов

Нормоконтролер:
старший преподаватель кафедры ЭТ

_____ Т.В. Лискова

Екатеринбург 2018

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 62 страницах, содержит 49 рисунков, 31 источник литературы, а также 4 приложения на 4 страницах.

Ключевые слова: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, АПЕРИОДИЧЕСКОЕ ЗВЕНО, ИНТЕГРИРУЮЩЕЕ ЗВЕНО, SIMULINK.

Коровин В. О. Разработка математической модели асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$: выпускная квалификационная работа / В. О. Коровин; Рос. гос. проф.-пед. ун-т, Ин-т инж. -пед. образования, Каф. Энергетики и транспорта. – Екатеринбург, 2018. – 62 с.

Краткая характеристика содержания ВКР:

1. Тема выпускной квалификационной работы «Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ ». В работе рассмотрен процесс обучения студентов направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям) профиля подготовки «Энергетика»

2. Цель работы: разработать математическую модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ во вращающейся системе координат.

3. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведен анализ учебно-методической и учебной литературы.

4. Данная разработка ориентирована на учебный процесс по определенному разделу данной дисциплины в Российском государственном профессионально-педагогическом университете.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	8
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ $I_R - \Psi_m$ НА ВЫХОДЕ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ В SIMULINK-SCRIPT	14
2.1. Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_r - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink-script.....	27
2.2. Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink.....	35
3. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	59
ПРИЛОЖЕНИЕ А	63
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	64
ПРИЛОЖЕНИЕ В	65
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	66

ВВЕДЕНИЕ

Математическая модель представляет собой приблизительное описание объекта моделирования, выраженного математическими символами. Процесс построения и изучения математических моделей называется математическим моделированием.

Определение не может полностью охватывать фактические действия в области математического моделирования. Тем не менее, определения полезны тем, что они пытаются идентифицировать наиболее важные функции.

Математические модели появились много веков назад вместе с математикой. Огромный импульс для развития математического моделирования привел к появлению компьютера. Использование компьютеров позволило нам анализировать и применять многие математические модели, ранее недоступные для аналитических исследований.

Математическое моделирование - это средство изучения реального объекта, процесса или системы, заменив его математической моделью, более удобной для экспериментального компьютерного исследования.

В математическом моделировании Ляпунова - преподается практическое и теоретическое исследование объекта, в котором мы не изучаем интересующие объекты, а также вспомогательную искусственную или естественную систему (модель), способность их заменять в некоторых отношениях и в конечном итоге дает информацию в ходе расследования о наиболее имитируемом объекте.

В других вариантах осуществления математическая модель определяется как прокси, исходный объект-объект представляет исследование некоторых особенностей оригинала, поскольку «эквивалентный» объект отражает в математической форме его наиболее

важные свойства - законы, которые он подвергается формированию внутренней. Например, система уравнений или отношений, арифметические или геометрические формы или их комбинация, изучение которых с помощью математики должно отвечать на вопросы о свойствах заданного набора свойств объекта в реальном мире, как набор математических отношений, уравнений, неравенств, фундаментальных законов, присущих этому процессу, объекту или системе.

Формальная классификация моделей основана на классификации используемых математических инструментов. Она часто строится в форме дихотомий.

Например, одна из самых популярных дихотомий:

- линейные или нелинейные модели;
- сосредоточенные или распределённые системы;
- детерминированные или стохастические;
- статические или динамические;
- дискретные или непрерывные.

Каждая построенная модель является линейной или нелинейной, детерминированной или стохастической. Конечно, возможны и смешанные типы: сосредоточены в одном отношении (по параметрам), в других - распределённые модели и т.д.

Объектом исследования является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Предметом исследования является математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$

Цель работы: разработать математическую модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ во вращающейся системе координат.

Для достижения этой цели в данной работе необходимо решить следующие задачи:

- ознакомиться с пакетом прикладных программ MATLAB;

- выполнить моделирование асинхронного двигателя с апериодическими звеньями;
- выполнить моделирование асинхронного двигателя с интегрирующими звеньями;
- выполнить моделирование асинхронного двигателя с интегрирующими звеньями в Simulink.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Современная методология проектирования электрических машин основана на положении системного подхода, согласно которому электрическая машина представляет собой элемент большой многосвязной системы (система электрической энергии или электропривод). В этом контексте задача строгого математического описания различных электрических машин в статике и особенно в динамике является наиболее важной. Решение этой проблемы связано с проведением большого объема теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов. Метод математического моделирования является основой теоретических исследований переходных процессов электрических машин.

Математическое моделирование - это метод исследования объектов путем построения их математических моделей в виде системы уравнений, неравенств, формул и логических условий.

В настоящее время разработка математических методов исследования электрических машин связана с широким использованием компьютеров, что позволяет реализовать наиболее полные модели переходных процессов с минимальным количеством допущений. Суть методов заключается в разработке системы моделей и их реализации на компьютере в виде программных комплексов для проведения компьютерных экспериментов во всех возможных условиях эксплуатации электрических машин. Математическая модель, которая имеет простоту изменения структуры и параметров расчетной схемы, позволяет получить в ходе компьютерных экспериментов необходимую информацию для проектирования и строительства электрических машин, их систем регулирования и защиты.

Однако, как известно, сложность явлений в электрических машинах переменного тока при переходных процессах происходит так, что они делают

математическое описание исследования и без ряда упрощающих допущений. Желание учитывать наиболее важные факторы, определяющие характеристики машины, и пренебрежение вторичными факторами, которые вносят вклад в идеализированную электрическую машину. У такой машины будет отсутствие насыщения, гистерезиса и вихревых токов в магнитной цепи, отсутствие тока смещения, как правило, характеризуются в проводниках обмоток, полной симметрии обмоток статора, а также ряд других предположений.

Для всестороннего изучения электрических машин, модель системы, которую можно упростить, представляет собой набор из трех уровней: микроуровень, макроуровень и метауровень.

Микроуровневые модели используются для изучения физических процессов в электрических, магнитных и тепловых полях. Это дифференциальные уравнения с частными производными. Такие модели обычно используются для исследований в областях стационарных режимов и для изучения переходных процессов электрических машин, используемых макромоделей.

На макроуровне электрическая машина рассматривается как совокупность дискретных элементов. Концентрированные обмотки расположены на железном сердечнике статора и ротора. На основе теории схем формируются математические модели макроуровня, а система обыкновенных дифференциальных уравнений представляет собой работу электрических машин во времени. Один тип таких моделей - это аналитические модели, которые требуют меньше вычислительных усилий, но они, как правило, менее точны с точки зрения основных допущений и упрощений, сделанных при их изготовлении.

При анализе функционирования электрических машин в больших системах используют модели метауровня. Это модели кибернетического типа, отражающие связь между входными и выходными переменными. Они

обычно являются основой для синтеза регуляторов в системах автоматического управления электрических машин.

Подробнее остановимся на способах математического моделирования линейных двигателей, т.к. именно им в данной работе уделено особое внимание. Многообразие моделей линейного двигателя объясняется особенностями электромагнитных переходных процессов, вызванных разомкнутостью его магнитопровода.

В зависимости от допущений, сделанных в ходе решения, *i*. Степень идеализации, расчетные модели линейных двигателей делятся на одномерные, двумерные и трехмерные с расчетом магнитного поля методами конечных разностей или конечных элементов на каждом временном шаге. Они плохо согласуются с синтезом системы автоматического управления, требуют больших вычислительных ресурсов, не подходят для моделирования процессов в реальном времени, отличаются сложностью рассмотрения индуцированных токов в массивных элементах.

Самые первые - одномерные модели, учитывающие распределение поля только одной, продольной координаты. Наиболее правильным с точки зрения сделанных допущений и самого решения является одномерная вычислительная модель А.И. Вольдека, когда обмотка и вторичная структура равномерно распределены по всему зазору, а сердечники индуктора и вторичного элемента бесконечно длинные. Продольный краевой эффект в такой модели учитывается как следствие ограниченной длины токового настила. Для учета влияния шунтирующих полей вводятся шунтирующие участки магнитопровода.

Одномерная теория раскрылась в работах Е.М. Огаркова, где разность магнитных свойств активной зоны и шунтирующих зон объясняется эквивалентной магнитной проницаемостью ярмо бесконечно длинных шунтирующих областей.

Двухмерные модели (в координатах $x - y$ или $x - z$) были разработаны одномерные и найденные приложения при расчете линейных двигателей с произвольным отношением параметров, но только одна пара координат.

Наиболее точными являются трехмерные модели, учитывающие распределение электромагнитного поля по всем трем координатам. Наиболее достоверные результаты дают метод расчета свойств на основе этих моделей. В Техническом университете Санкт-Петербурга трехмерная модель была представлена в виде компьютерных программ. Используя эту модель, анализируются интегральные силы в тяговом двигателе, а также распределение удельных сил вдоль длины машины.

В дополнение к аналитическим методам решения теории поля были распространены и численные методы - метод конечных разностей и метод конечных элементов, позволяющий учитывать точные характеристики проектирования линейных машин: разница в магнитных свойствах защиты сердечника и обходных зон, неравномерный воздушный зазор, дискретное распределение первичных силовых обмоток намагничивания.

Многомерные модели, основанные на теории поля, обычно описывают только статическую работу линейного двигателя. Общим недостатком этих моделей является их сложность и громоздкое использование компьютера с большей памятью и производительностью.

В этом смысле двумерный метод аналогового моделирования многослойных структур, предложенный О.Н. Веселовский. Линейный двигатель показан здесь в виде ортотропной многослойной структуры с бегущими волнами электромагнитной индукции B , напряженностью электрического поля E и магнитными полями H в каждом слое. В этом случае значения B , E и H на интерфейсах каждого уровня связаны так же, как входные и выходные значения четырех терминалов в электрических цепях. Коэффициенты связи зависят только от электрических и магнитных свойств материала и толщины слоя. Этот метод не имеет ограничений по количеству рассмотренных слоев и позволяет легко и точно учитывать особенности

линейного двигателя, но не учитывает эффект длинного края, а модель ориентирована на статические режимы.

В настоящее время известен широкий арсенал методов математического моделирования электромагнитных процессов в электрических машинах на основе детальных схем магнитной замены. Они сводят проблему к вычислению схемы, параметры которой являются неотъемлемой частью частей конструкции при моделировании устройства. Эти модели могут быть использованы более успешно для синтеза автоматических систем управления и для изучения переходных процессов в электромеханической системе.

Нужно отметить тесно связанный с теорией цепей метод проводимостей зубцовых контуров А.В. Иванова-Смоленского и метод электромеханического преобразования энергии, открытый И.П. Копыловым, который сочетает теорию поля и теорию цепей.

Достоинством цепного подхода остаётся хорошая гибкость в отношении детальности представления элементов конструкции машин. Детализация машины может быть на фазу, на пару полюсов, на полюс или половину полюса, на зубцовое деление. Так же возможно в одной модели включить гибридные схемы замещения, когда одна часть машины представит упрощенно, а другой элемент подробно. Из этого следует, что с использованием этих методов достаточно просто рассмотреть асимметрию магнитной цепи линейного двигателя, насыщение его отдельных участков и конструктивные особенности. Достоинства методов, основанных на теории цепей, связаны с тем, что они обычно относятся к динамическим режимам двигателя.

Существуют модели, в которых исходная машина делится на несколько отдельных, но магнитно-связанных однополюсных машин, действующих на общий вторичный элемент. Для учета краевых эффектов вводятся фиктивные шунтирующие секции сердечника статора. Возможно использование более крупного разбиения – на пару полюсов с применением теории обобщенного

электромеханического преобразователя. Однако при таких этапах деления коренится учет продольного краевого эффекта и следовательно падает точность расчета.

Эталонной остаётся модель линейного двигателя, базирующаяся на использовании преобразования Лапласа. Модель сможет правильно учесть появление краевых эффектов. Вышеназванные модели, основанные на теории цепей, являются одномерными и не смогут учитывать влияние нормальных сил на характеристики линейного двигателя.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ $i_r - \psi_m$ НА ВЫХОДЕ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ В SIMULINK-SCRIPT

В работе дано математическое моделирование асинхронного двигателя с переменными $i_r - \psi_m$ в системе относительных единиц. В данной работе приведена модель асинхронного двигателя с этими же переменными в системе абсолютных единиц.

Векторные уравнения асинхронного двигателя имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{dt} + j\Omega_K \cdot \underline{\Psi}_S; \\ 0 = R_{Rk} \cdot \underline{I}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{dt} + j(\Omega_K - \Omega \cdot z_p) \cdot \underline{\Psi}_R; \\ \underline{\Psi}_S = (L_m + L_{S\sigma}) \cdot \underline{I}_S + L_m \cdot \underline{I}_R; \\ \underline{\Psi}_R = (L_m + L_{R\sigma}) \cdot \underline{I}_R + L_m \cdot \underline{I}_S; \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} \cdot I_{Rx} - \Psi_{mx} \cdot I_{Ry}); \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}. \end{cases}$$

Переводим систему уравнений к изображениям $\left(\frac{d}{dt} = s\right)$:

$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + \underline{\Psi}_S \cdot s + j\Omega_K \cdot \underline{\Psi}_S; \quad (1)$$

$$0 = R_{Rk} \cdot \underline{I}_R + \underline{\Psi}_R \cdot s + j(\Omega_K - \Omega \cdot z_p) \cdot \underline{\Psi}_R; \quad (2)$$

$$\underline{\Psi}_S = (L_m + L_{S\sigma}) \cdot \underline{I}_S + L_m \cdot \underline{I}_R; \quad (3)$$

$$\underline{\Psi}_R = (L_m + L_{R\sigma}) \cdot \underline{I}_R + L_m \cdot \underline{I}_S; \quad (4)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} \cdot I_{Rx} - \Psi_{mx} \cdot I_{Ry}); \quad (5)$$

$$M - M_c = J \cdot \Omega \cdot s. \quad (6)$$

Схема замещения и векторная диаграмма в системе абсолютных единиц [3] приведены на рисунках 1 и 2.

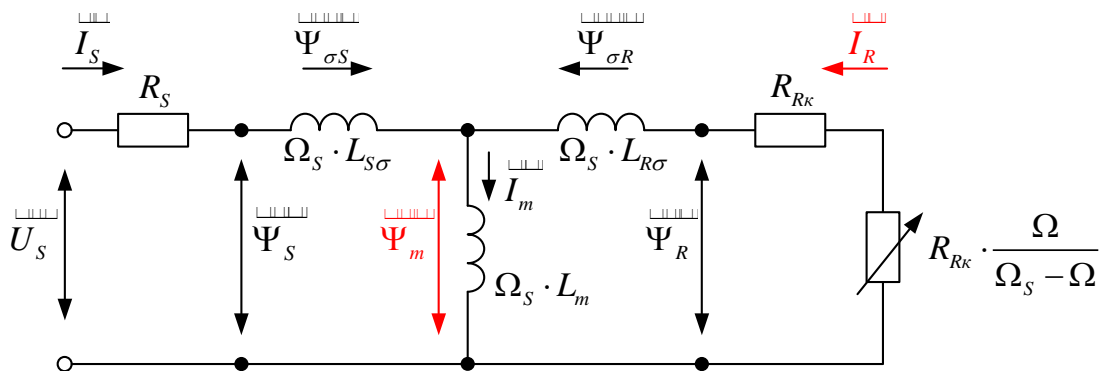


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронного двигателя в системе абсолютных единиц

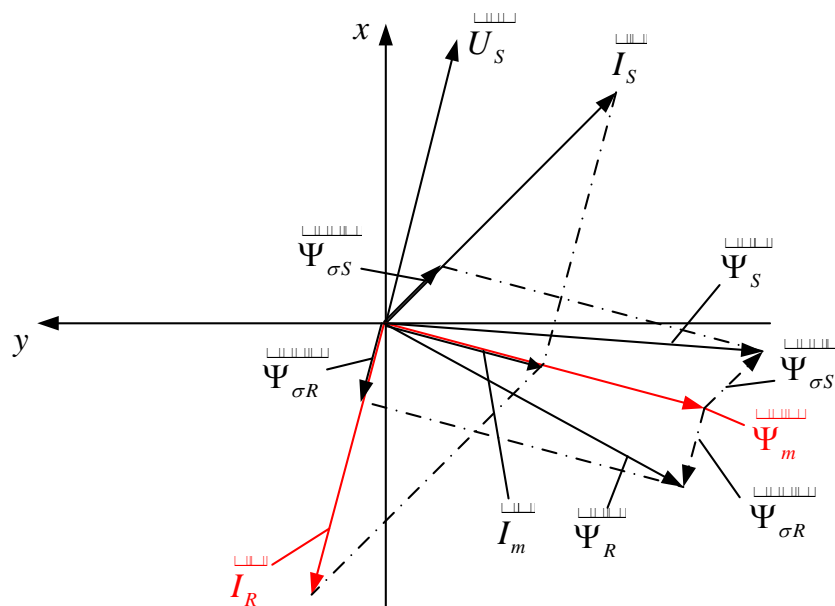


Рисунок 2 – Качественная картина расположения векторов в двигательном режиме в системе абсолютных единиц

Так как электромагнитный момент определяется через переменные Ψ_m и I_R , то из уравнений (1), ..., (4) необходимо исключить Ψ_S и I_S .

В работе [2] приведены следующие выражения векторных величин:

$$\vec{\Psi}_R = \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{\sigma R};$$

$$\vec{\Psi}_{\sigma R} = L_{\sigma R} \cdot \vec{I}_R;$$

$$\vec{\Psi}_R = \vec{\Psi}_m + L_{\sigma R} \cdot \vec{I}_R. \quad (7)$$

$$\vec{\Psi}_m = L_m \cdot (\vec{I}_S + \vec{I}_R). \quad (8)$$

Из уравнения (8) выразим \underline{I}_S :

$$\underline{I}_S = \frac{1}{L_m} \cdot \underline{\Psi}_m - \underline{I}_R. \quad (9)$$

Подставим ток \underline{I}_S из уравнения (9) в уравнение (3):

$$\underline{\Psi}_S = \frac{L_m + L_{\sigma S}}{L_m} \cdot \underline{\Psi}_m - (L_m + L_{\sigma S}) \cdot \underline{I}_R + L_m \cdot \underline{I}_R.$$

Обозначим $\frac{L_m + L_{\sigma S}}{L_m} = \frac{l_m + l_{\sigma S}}{l_m} = \frac{1}{k_s}$, тогда:

$$\underline{\Psi}_S = \frac{1}{k_s} \cdot \underline{\Psi}_m - L_{\sigma S} \cdot \underline{I}_R. \quad (10)$$

Расписываем векторы через проекции:

$$\begin{aligned} \underline{U}_S &= U_{Sx} + jU_{Sy}; & \underline{I}_S &= I_{Sx} + jI_{Sy}; & \underline{I}_R &= I_{Rx} + jI_{Ry}; \\ \underline{\Psi}_S &= \Psi_{Sx} + j\Psi_{Sy}; & \underline{\Psi}_R &= \Psi_{Rx} + j\Psi_{Ry}; & \underline{\Psi}_m &= \Psi_{mx} + j\Psi_{my}. \end{aligned}$$

Записываем уравнения (1), ..., (10) по проекциям.

$$U_{Sx} + jU_{Sy} = R_S \cdot I_{Sx} + jR_S \cdot I_{Sy} + \Psi_{Sx} \cdot s + j\Psi_{Sy} \cdot s + j\Omega_\kappa \cdot \Psi_{Sx} - \Omega_\kappa \cdot \Psi_{Sy}.$$

По оси
(+1):
$$U_{Sx} = R_S \cdot I_{Sx} + \Psi_{Sx} \cdot s - \Omega_\kappa \cdot \Psi_{Sy}. \quad (1')$$

По оси
(+j):
$$U_{Sy} = R_S \cdot I_{Sy} + \Psi_{Sy} \cdot s + \Omega_\kappa \cdot \Psi_{Sx}. \quad (1'')$$

Уравнение (2):

$$0 = R_{R\kappa} \cdot I_{Rx} + jR_{R\kappa} \cdot I_{Ry} + \Psi_{Rx} \cdot s + j\Psi_{Ry} \cdot s + j(\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Rx} - (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Ry}.$$

По оси
(+1):
$$0 = R_{R\kappa} \cdot I_{Rx} + \Psi_{Rx} \cdot s - (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Ry}. \quad (2')$$

По оси
(+j):
$$0 = R_{R\kappa} \cdot I_{Ry} + \Psi_{Ry} \cdot s + (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Rx}. \quad (2'')$$

Уравнение (7):

$$\Psi_{Rx} + j\Psi_{Ry} = \Psi_{mx} + j\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx} + j(L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

По оси
(+1):
$$\Psi_{Rx} = \Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}. \quad (7')$$

По оси
(+j):
$$\Psi_{Ry} = \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}. \quad (7'')$$

Уравнение (9):

$$I_{Sx} + jI_{Sy} = \frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + j \left(\frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{my} \right) - I_{Rx} - jI_{Ry}.$$

По оси
(+1):
$$I_{Sx} = \frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - I_{Rx}. \quad (9')$$

По оси
(+j):
$$I_{Sy} = \frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{my} - I_{Ry}. \quad (9'')$$

Уравнение (10):

$$\Psi_{Sx} + j\Psi_{Sy} = \frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{mx} + j \left(\frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{my} \right) - L_{\sigma S} \cdot I_{Rx} - j(L_{\sigma S} \cdot I_{Ry}).$$

По оси
(+1):
$$\Psi_{Sx} = \frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma S} \cdot I_{Rx}. \quad (10')$$

По оси
(+j):
$$\Psi_{Sy} = \frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma S} \cdot I_{Ry}. \quad (10'')$$

Полученные зависимости рассмотрим в единой системе по проекции

(+1):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{Sx} = R_S \cdot I_{Sx} + \Psi_{Sx} \cdot s - \Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{Sy}; \\ 0 = R_{R\kappa} \cdot I_{Rx} + \Psi_{Rx} \cdot s - (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Ry}; \\ \Psi_{Rx} = \Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}; \\ \Psi_{Ry} = \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}; \\ I_{Sx} = \frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - I_{Rx}; \\ \Psi_{Sx} = \frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma S} \cdot I_{Rx}; \\ \Psi_{Sy} = \frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma S} \cdot I_{Ry}. \end{array} \right.$$

Подставим (9'), (10') и (10'') в уравнение (1'):

$$U_{Sx} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_S \cdot I_{Rx} + \frac{1}{k_s} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) - L_{\sigma S} \cdot (I_{Rx} \cdot s) - \frac{1}{k_s} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Ry}). \quad (11)$$

Аналогично, подставим (7') и (7'') в (2'):

$$0 = R_{R\kappa} \cdot I_{Rx} + (\Psi_{mx} \cdot s) + L_{\sigma R} \cdot (I_{Rx} \cdot s) - (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Ry}. \quad (12)$$

Умножим уравнение (12) на $\frac{1}{k_s}$:

$$0 = \frac{R_{R\kappa}}{k_s} \cdot I_{Rx} + \frac{1}{k_s} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (I_{Rx} \cdot s) - \frac{1}{k_s} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + \frac{1}{k_s} \cdot (\Omega \cdot z_p \cdot \Psi_{my}) - \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Ry}.$$

Вычтем полученное уравнение из уравнения (11):

$$U_{Sx} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - \left(R_S + \frac{R_{R\kappa}}{k_s} \right) \cdot I_{Rx} - \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (I_{Rx} \cdot s) + \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}). \quad (13)$$

Введем обозначения:

$$R_S + \frac{R_{R\kappa}}{k_s} = R_{R6};$$

$$L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} = L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R} \cdot (L_m + L_{\sigma S})}{L_m} = L_{\sigma S} + L_{\sigma R} + \frac{L_{\sigma S} \cdot L_{\sigma R}}{L_m} =$$

$$= \left(\frac{L_{\sigma S}}{L_0} + \frac{L_{\sigma R}}{L_0} + \frac{\frac{L_{\sigma S}}{L_0} \cdot \frac{L_{\sigma R}}{L_0}}{\frac{L_m}{L_0}} \right) \cdot L_0 = \left(\frac{l_{\sigma S} + l_{\sigma R} + \frac{l_{\sigma S} \cdot l_{\sigma R}}{l_m}}{1 \ 4 \ 44 \ 2 \ 4 \ 4 \ 4 \ 3} \right) \cdot L_0 = l_{\sigma 3} \cdot L_0 = L_{\sigma 3}.$$

В уравнении (13) перенесем слагаемые с I_{Rx} в левую часть:

$$R_{R6} \cdot \left[\frac{L_{\sigma 3}}{R_{R6}} \cdot s + 1 \right] \cdot I_{Rx} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - U_{Sx} + L_{\sigma 3} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

$$\text{Обозначим } T_{R6} = \frac{L_{\sigma 3}}{R_{R6}}.$$

Тогда ток I_{Rx} определится в следующей форме:

$$I_{Rx} = \left[\frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - U_{Sx} + L_{\sigma 3} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}) \right] \cdot \frac{1 / R_{R6}}{T_{R6} \cdot s + 1}.$$

Структурная схема для определения тока I_{Rx} приведена на рисунке 3.

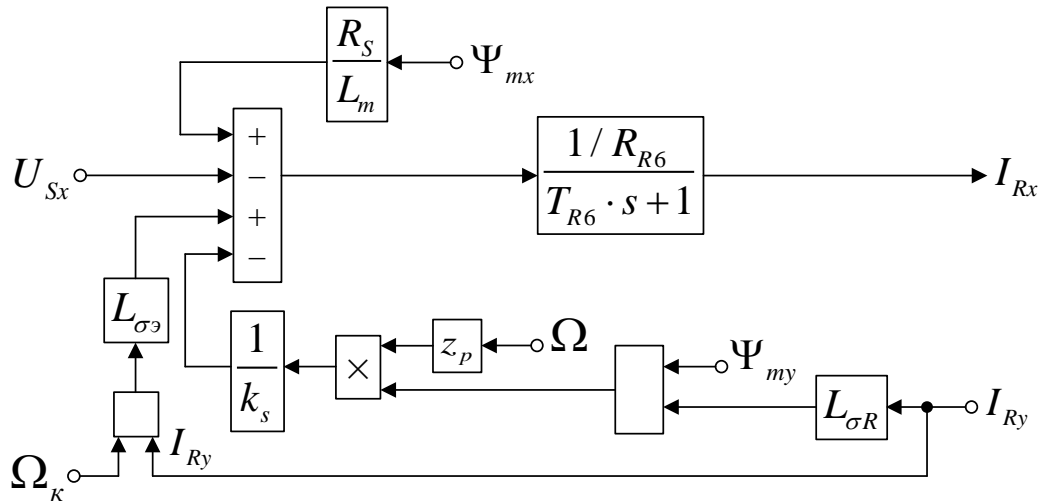


Рисунок 3 – Структурная схема для определения тока I_{Rx}

Для определения потокосцепления Ψ_{mx} умножим уравнение (11) на $L_{\sigma R}$, а уравнение (12) на $L_{\sigma S}$:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} = \frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot R_S \cdot I_{Rx} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) - L_{\sigma R} \cdot L_{\sigma S} \cdot (I_{Rx} \cdot s) - \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (\Omega_k \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma R} \cdot L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Ry});$$

$$0 = L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} \cdot I_{Rx} + L_{\sigma S} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) + L_{\sigma S} \cdot L_{\sigma R} \cdot (I_{Rx} \cdot s) - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Ry}.$$

Сложим оба уравнения и получим:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} = \frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + (L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Rx} + \left(\frac{L_{\sigma R}}{k_s} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) - \left(\frac{L_{\sigma R}}{k_s} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Omega_k \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}). \quad (14)$$

Перенесем в левую часть слагаемые с Ψ_{mx} :

$$\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \left[\left(\frac{L_m \cdot L_{\sigma S}}{L_{\sigma R} \cdot R_S} \right) \cdot s + 1 \right] \cdot \Psi_{mx} = L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} - (L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Rx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot \Psi_{my}) - L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Обозначим:

$$L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S = R_{R7};$$

$$\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} = R_{S9};$$

$$\frac{L_m \cdot L_{\sigma \varepsilon}}{L_{\sigma R} \cdot R_S} = \frac{L_{\sigma \varepsilon}}{R_{S9}} = T_{M2}.$$

Отсюда потокосцепление Ψ_{mx} определится в следующей форме:

$$\Psi_{mx} = \left[\frac{L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} - R_{R7} \cdot I_{Rx} + L_{\sigma \varepsilon} \cdot (\Omega_k \cdot \Psi_{my}) - L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry})}{T_{M2} \cdot s + 1} \right] \cdot \frac{1/R_{S9}}{T_{M2} \cdot s + 1}.$$

Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx} приведена на рисунке 4.

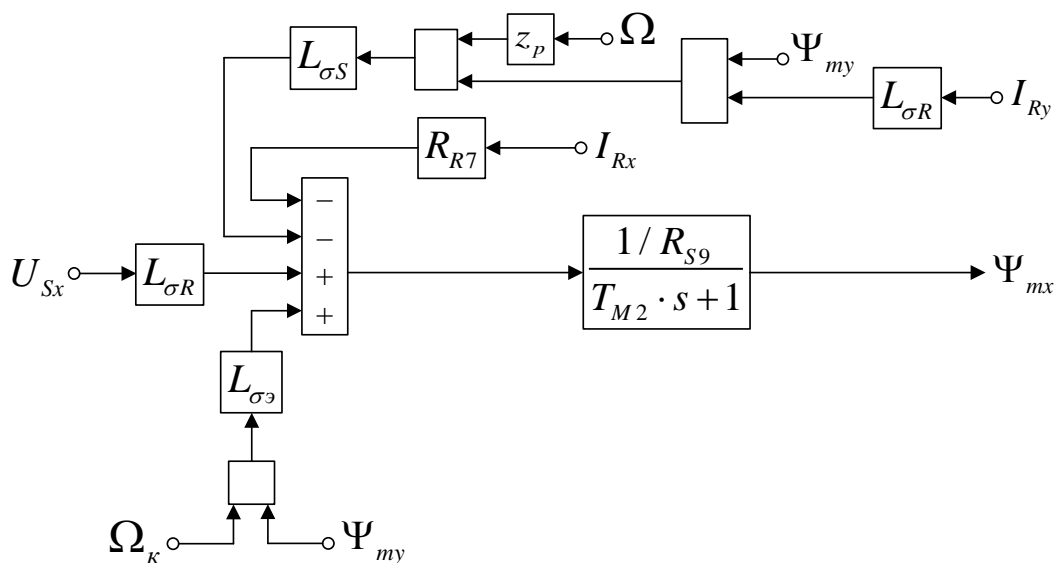


Рисунок 4 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx}

Рассмотрим систему уравнений (1''), ..., (10'') по проекции (+j):

$$\begin{cases} U_{Sy} = R_S \cdot I_{Sy} + \Psi_{Sy} \cdot s + \Omega_k \cdot \Psi_{Sx}; \\ 0 = R_{Rk} \cdot I_{Ry} + \Psi_{Ry} \cdot s + (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Rx}; \\ \Psi_{Rx} = \Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}; \\ \Psi_{Ry} = \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}; \\ I_{Sy} = \frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{my} - I_{Ry}; \\ \Psi_{Sx} = \frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma S} \cdot I_{Rx}; \\ \Psi_{Sy} = \frac{1}{k_s} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma S} \cdot I_{Ry}. \end{cases}$$

Подставим (9''), (10'') и (10') в уравнение (1''):

$$U_{Sy} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - R_S \cdot I_{Ry} + \frac{1}{k_s} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) - L_{\sigma S} \cdot (I_{Ry} \cdot s) + \frac{1}{k_s} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx}). \quad (15)$$

Аналогично, подставим (7'') и (7') в уравнение (2''):

$$0 = R_{R\kappa} \cdot I_{Ry} + (\Psi_{my} \cdot s) + L_{\sigma R} \cdot (I_{Ry} \cdot s) + (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Rx}. \quad (16)$$

Умножим уравнение (16) на $\frac{1}{k_s}$:

$$0 = \frac{R_{R\kappa}}{k_s} \cdot I_{Ry} + \frac{1}{k_s} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (I_{Ry} \cdot s) + \frac{1}{k_s} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) - \frac{1}{k_s} \cdot (\Omega \cdot z_p \cdot \Psi_{mx}) + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx}) - \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (\Omega \cdot z_p \cdot I_{Rx}).$$

Вычтем полученное уравнение из уравнения (15):

$$U_{Sy} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - \left(R_S + \frac{R_{R\kappa}}{k_s} \right) \cdot I_{Ry} - \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (I_{Ry} \cdot s) - \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}). \quad (17)$$

Перенесем в левую часть слагаемые с I_{Ry} :

$$R_{R6} \cdot \left[\frac{L_{\sigma 2}}{R_{R6}} \cdot s + 1 \right] \cdot I_{Ry} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - U_{Sy} - L_{\sigma 2} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Определим ток I_{Ry} :

$$I_{Ry} = \left[\frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - U_{Sy} - L_{\sigma 2} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}) \right] \cdot \frac{1/R_{R6}}{T_{R6} \cdot s + 1}.$$

Структурная схема для определения тока I_{Ry} представлена на рисунке

5.

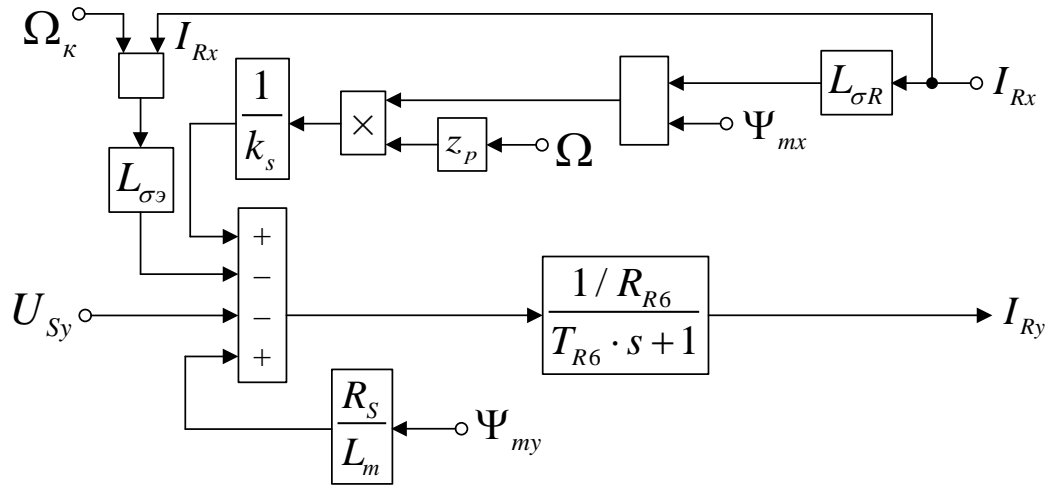


Рисунок 5 – Структурная схема для определения тока I_{Ry}

Для определения потокосцепления Ψ_{my} умножим уравнение (15) на $L_{\sigma R}$, а (16) на $L_{\sigma S}$:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} = \frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot R_S \cdot I_{Ry} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) - L_{\sigma R} \cdot L_{\sigma S} \cdot (I_{Ry} \cdot s) + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma R} \cdot L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx});$$

$$0 = L_{\sigma S} \cdot R_{R\kappa} \cdot I_{Ry} + L_{\sigma S} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) + L_{\sigma S} \cdot L_{\sigma R} \cdot (I_{Ry} \cdot s) + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma S} \cdot (\Omega \cdot z_p \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma R} \cdot L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx}) - L_{\sigma R} \cdot L_{\sigma S} \cdot (\Omega \cdot z_p \cdot I_{Rx}).$$

Сложим оба уравнения и получим:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} = \left(\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \right) \cdot \Psi_{my} + \left(\frac{L_{\sigma R} \cdot R_{R\kappa} - L_{\sigma R} \cdot R_S}{R_{R7}} \right) \cdot I_{Ry} + \left(\frac{L_{\sigma R}}{k_s} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Psi_{my} \cdot s) + \left(\frac{L_{\sigma R}}{k_s} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}). \quad (18)$$

Перенесем в левую часть слагаемые с Ψ_{my} :

$$R_{S9} \cdot \left[\left(\frac{L_{\sigma R}}{R_{S3}} \right) \cdot s + 1 \right] \cdot \Psi_{my} = L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} - R_{R7} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Выразим потокосцепление Ψ_{my} :

$$\Psi_{my} = \left[\frac{L_{\sigma R}}{R_{S3}} \cdot U_{Sy} - R_{R7} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}) \right] \cdot \frac{1/R_{S9}}{T_{M2} \cdot s + 1}.$$

Схема для определения потокосцепления Ψ_{my} представлена на рисунке

6.

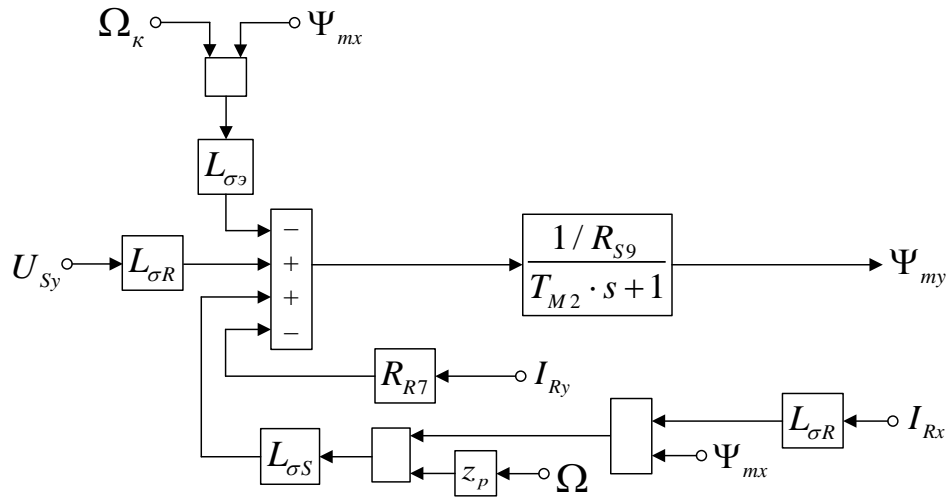


Рисунок 6 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my}

На рисунке 7 представлена структурная схема для реализации уравнения электромагнитного момента (5):

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} \cdot I_{Rx} - \Psi_{mx} \cdot I_{Ry}).$$

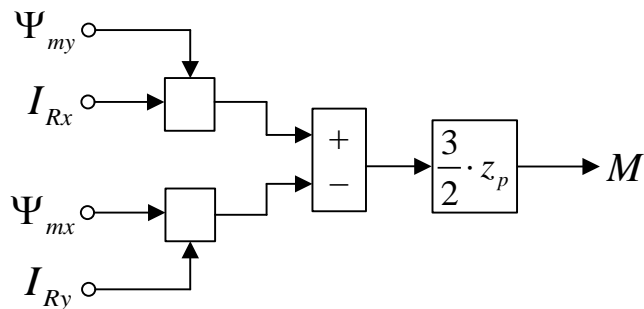


Рисунок 7 – Математическая модель определения электромагнитного момента M

Наконец, из уравнения движения (6) выразим механическую угловую скорость вращения вала двигателя (рисунок 8):

$$M - M_c = J \cdot \Omega \cdot s;$$

$$\Omega = (M - M_c) \cdot \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{s}.$$

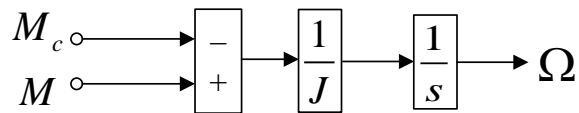


Рисунок 8 – Математическая модель уравнения движения

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе аperiodических звеньев в системе абсолютных единиц приведена на рисунке 9. Параметры асинхронного двигателя рассмотрены в работах [2] и [3].

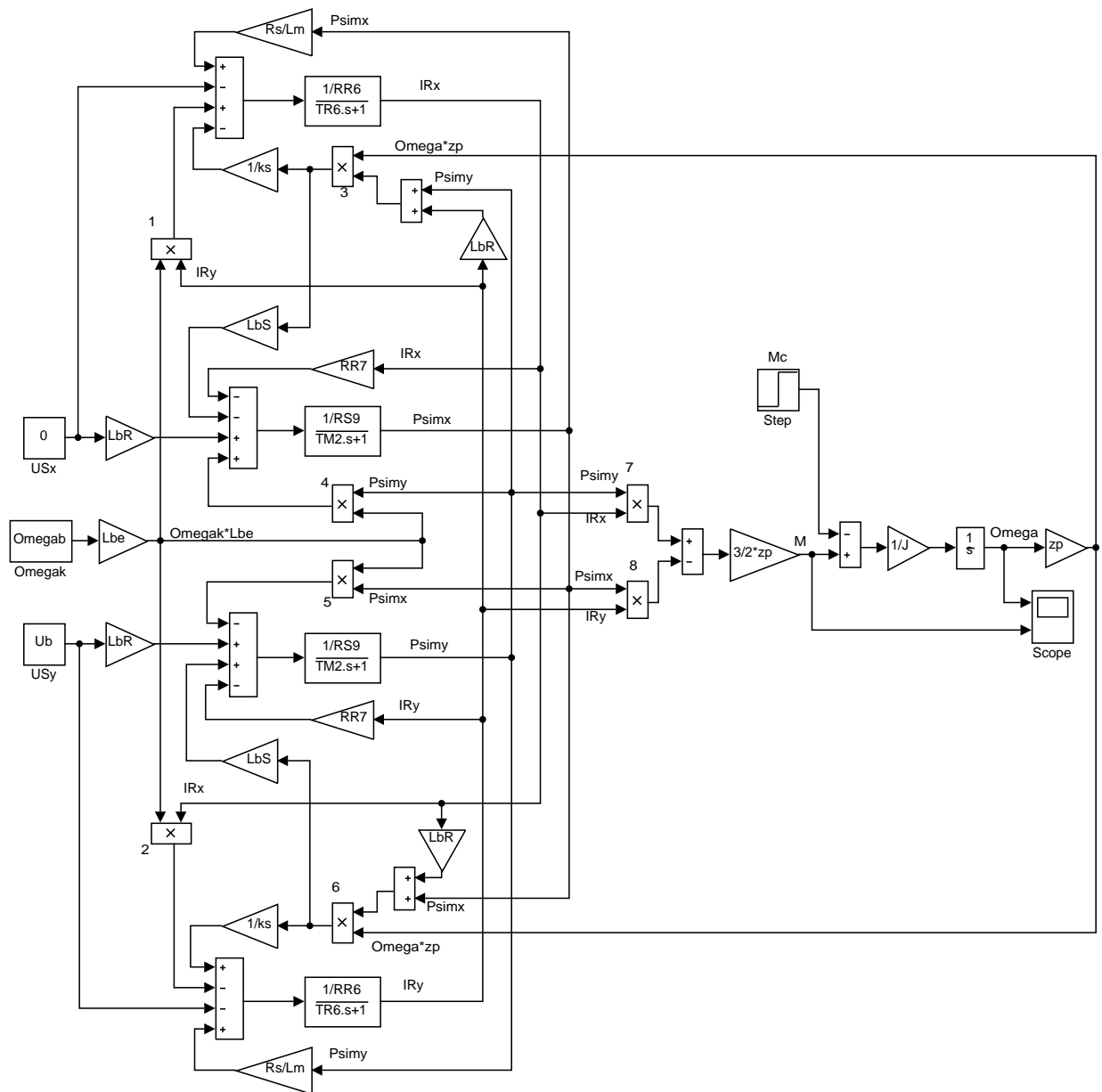


Рисунок 9 – Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе аperiodических звеньев в системе абсолютных единиц

Расчет параметров производим в Script:

```
PN=320000 Ub=sqrt(2)*UsN; betaN=(Omega0N-  
; Ib=sqrt(2)*IsN; OmegaN)/Omega0N;  
UsN=380; OmegasN=2*pi*fN lbe=lbs+lbr+lbs*lbr*lm^(  
IsN=324; ; -1);  
fN=50; Omegab=OmegasN; Lbe=lbe*Lb;  
Omega0N=1 Zb=Ub/Ib; roN=0.9962;  
04.7; Psib=Ub/Omegab; rrk=roN*betaN;  
OmegaN=10 Lb=Psib/Ib; RRk=rrk*Zb;  
2.83; rs=Rs/Zb; RR6=Rs+RRk/ks;  
nN=0.944; lbs=Xs/Zb; TR6=Lbe/RR6;  
cos_phiN= rr=Rr/Zb; LbS=lbs*Lb;  
0.92; lbr=Xr/Zb; LbR=lbr*Lb;  
zp=3; lm=Xm/Zb; RR7=LbS*RRk-LbR*Rs;  
Rs=0.0178 Lm=lm*Lb; RS9=LbR*Rs/Lm;  
; ks=lm/(lm+lbs); TM2=Lbe/RS9;  
Xs=0.118; kr=lm/(lm+lbr);  
Rr=0.0194  
;  
Xr=0.123;  
Xm=4.552;  
J=28;
```

Числовые значения параметров выводятся в окне Workspace (рисунок 10).

Name	Value
betaN	0.0179
cos_phiN	0.9200
fN	50
Ib	458.2052
IsN	324
J	28
kr	0.9737
ks	0.9747
Lb	0.0037
lbe	0.2082
Lbe	7.7728e-04
lbr	0.1049
LbR	3.9152e-04
lbs	0.1006
LbS	3.7561e-04
Im	3.8812
Lm	0.0145
nN	0.9440
Omega0N	104.7000
Omegab	314.1593
OmegaN	102.8300
OmegasN	314.1593

Name	Value
PN	320000
Psib	1.7106
roN	0.9962
rr	0.0165
Rr	0.0194
RR6	0.0392
RR7	8.6905e-07
rrk	0.0178
RRk	0.0209
rs	0.0152
Rs	0.0178
RS9	4.8098e-04
TM2	1.6160
tout	671x1 double
TR6	0.0198
Ub	537.4012
UsN	380
Xm	4.5520
Xr	0.1230
Xs	0.1180
Zb	1.1728
zp	3

Рисунок 10 – Числовые значения параметров в окне Workspace

Результаты моделирования асинхронного двигателя на рисунке 11.

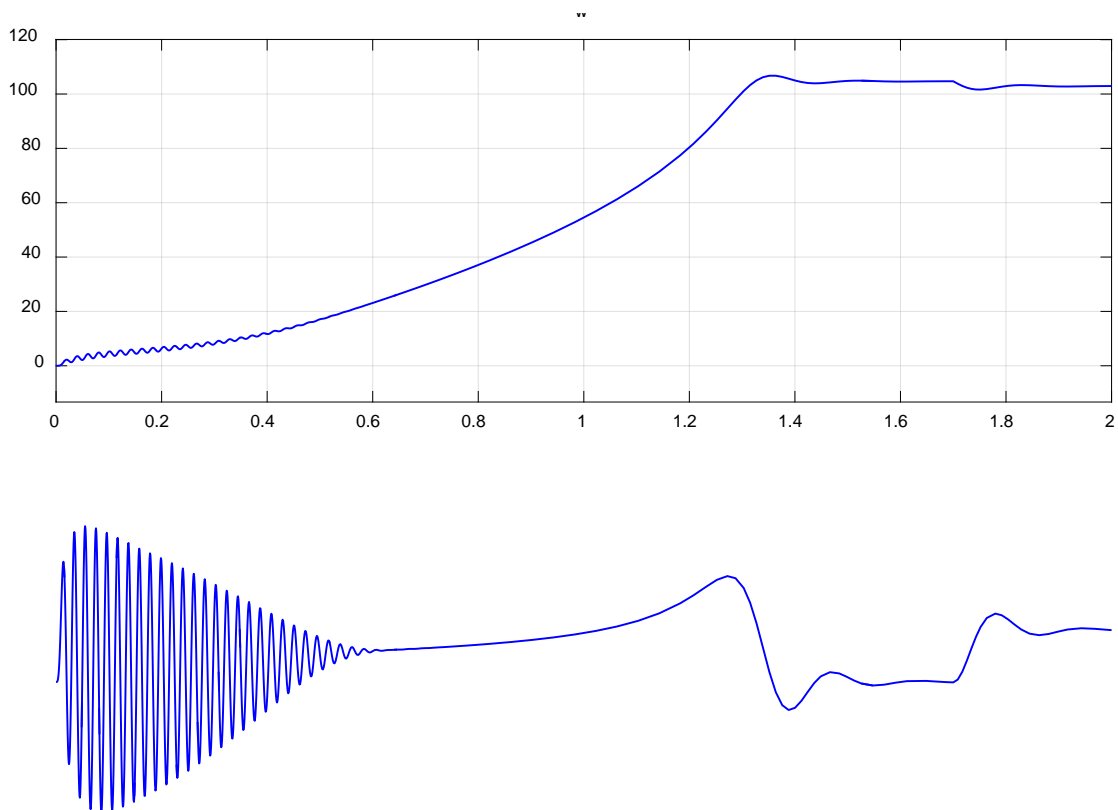


Рисунок 11 – Графики скорости и момента

2.1. Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_r - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink-script

Данная работа является продолжением статьи [1], в которой проекции векторов \vec{I}_R и $\vec{\Psi}_m$ были получены на выходе аperiodических звеньев. В этой статье проекции векторов \vec{I}_R и $\vec{\Psi}_m$ выведены на основе интегрирующих звеньев в Simulink-Script.

В работе [1] было получено уравнение (13):

$$U_{Sx} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - \left(R_S + \frac{R_{Rk}}{k_s} \right) \cdot I_{Rx} - \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (I_{Rx} \cdot s) + \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_k \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Перенесем $\left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (I_{Rx} \cdot s)$ в левую часть:

$$\left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot I_{Rx} \cdot s = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - U_{Sx} - \left(R_S + \frac{R_{Rk}}{k_s} \right) \cdot I_{Rx} + \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_k \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Обозначим:

$$R_S + \frac{R_{Rk}}{k_s} = R_{R6};$$

$$L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} = L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R} \cdot (L_m + L_{\sigma S})}{L_m} = L_{\sigma S} + L_{\sigma R} + \frac{L_{\sigma S} \cdot L_{\sigma R}}{L_m} = \left(\frac{L_{\sigma S}}{L_6} + \frac{L_{\sigma R}}{L_6} + \frac{L_{\sigma S} \cdot L_{\sigma R}}{L_m} \right) \cdot L_6 = \left(\frac{l_{\sigma S} + l_{\sigma R} + \frac{l_{\sigma S} \cdot l_{\sigma R}}{l_m}}{l_{\sigma 3}} \right) \cdot L_6 = l_{\sigma 3} \cdot L_6 = L_{\sigma 3}.$$

Тогда ток I_{Rx} по оси (+1) определится в следующей форме:

$$I_{Rx} = \left[\frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - U_{Sx} - R_{R6} \cdot I_{Rx} + L_{\sigma 3} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}) \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma 3}} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для определения тока I_{Rx} приведена на рисунке 12.

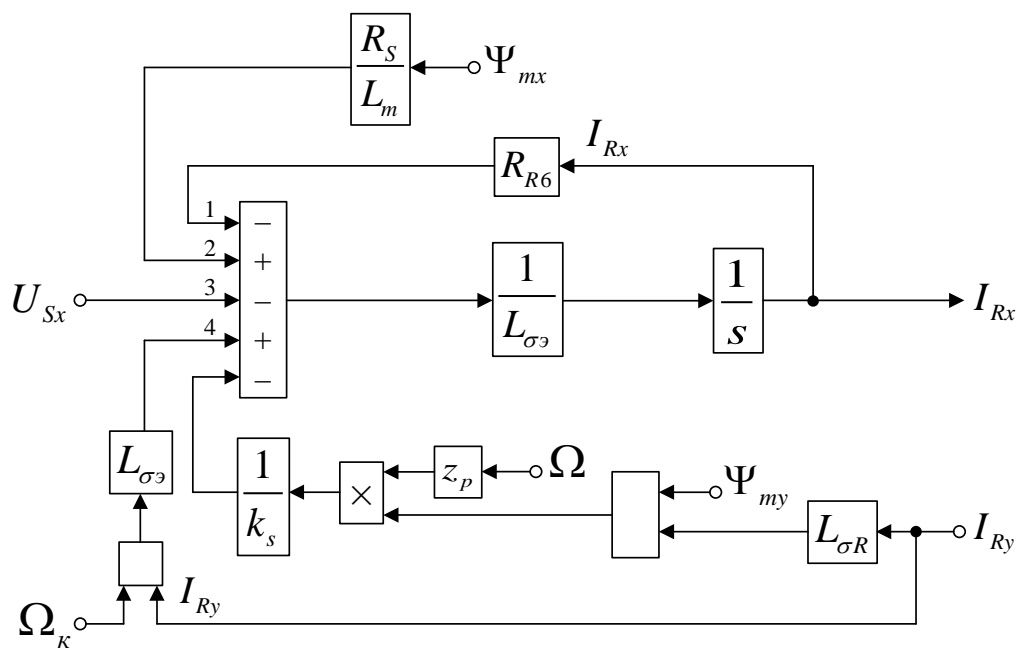


Рисунок 12 – Структурная схема для определения тока I_{Rx}

Для определения потокосцепления Ψ_{mx} приведем уравнение (14) из работы [1]:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} = \frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + (L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Rx} + \left(\frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma e}} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) -$$

$$- \left(\frac{L_{\sigma R}}{k_s} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Omega_k \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Перенесем в левую часть $L_{\sigma e} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s)$:

$$L_{\sigma e} \cdot \Psi_{mx} \cdot s = L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} - \frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - (L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Rx} + L_{\sigma e} \cdot (\Omega_k \cdot \Psi_{my}) -$$

$$- L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Обозначим:

$$L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S = R_{R7};$$

$$\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} = R_{S9}.$$

Отсюда потокосцепление Ψ_{mx} по оси (+1) определится в следующей форме:

$$\Psi_{mx} = \left[\begin{array}{c} L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} - R_{R6} \cdot \Psi_{mx} - R_{R6} \cdot I_{Rx} + L_{\sigma \varepsilon} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) - L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}) \\ \begin{array}{cccccccc} 1 & 4 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 \end{array} \end{array} \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma \varepsilon}} \cdot \frac{1}{s}$$

Схема для определения потокосцепления Ψ_{mx} приведена на рисунке 13.

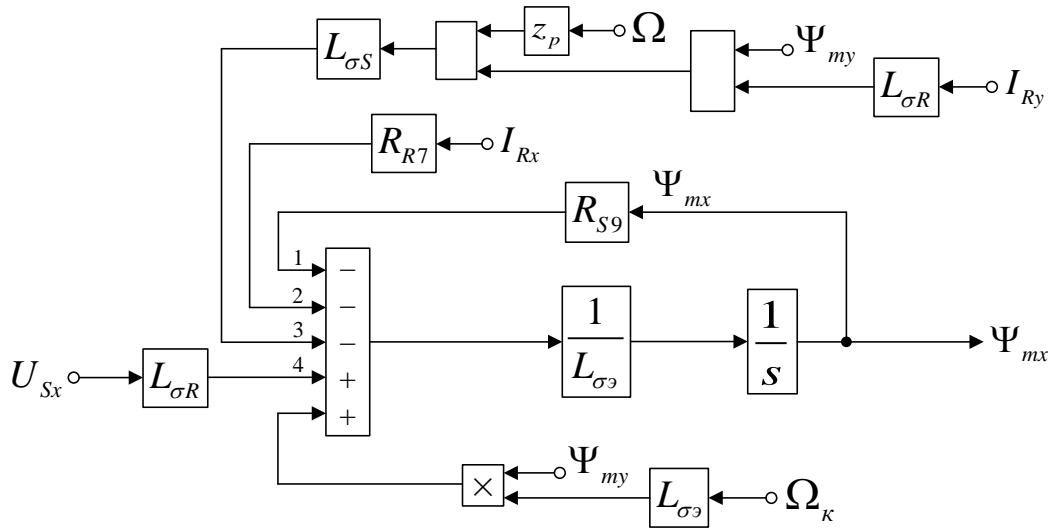


Рисунок 13 – Структурная схема для определения потока сцепления Ψ_{mx}

Аналогично определим ток I_{Ry} и потокосцепление Ψ_{my} по оси (+j).

Приведем уравнение (17) из работы [1]:

$$U_{Sy} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - \left(\begin{array}{c} R_S + R_{R\kappa} \\ \begin{array}{cccc} 1 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & 2 \end{array} \end{array} \right) \cdot I_{Ry} - \left(\begin{array}{c} L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \\ \begin{array}{cccc} 1 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & 2 \end{array} \end{array} \right) \cdot (I_{Ry} \cdot s) - \left(\begin{array}{c} L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \\ \begin{array}{cccc} 1 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & 2 \end{array} \end{array} \right) \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Перенесем в левую часть $L_{\sigma \varepsilon} \cdot (I_{Ry} \cdot s)$:

$$L_{\sigma \varepsilon} \cdot I_{Ry} \cdot s = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - U_{Sy} - R_{R6} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma \varepsilon} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Выразим ток I_{Ry} по оси (+j):

$$I_{Ry} = \left[\begin{array}{c} \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - U_{Sy} - R_{R6} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma \varepsilon} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}) \\ \begin{array}{cccccccc} 1 & 4 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 \end{array} \end{array} \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma \varepsilon}} \cdot \frac{1}{s}$$

Структурная схема для определения тока I_{Ry} представлена на рисунке

14.

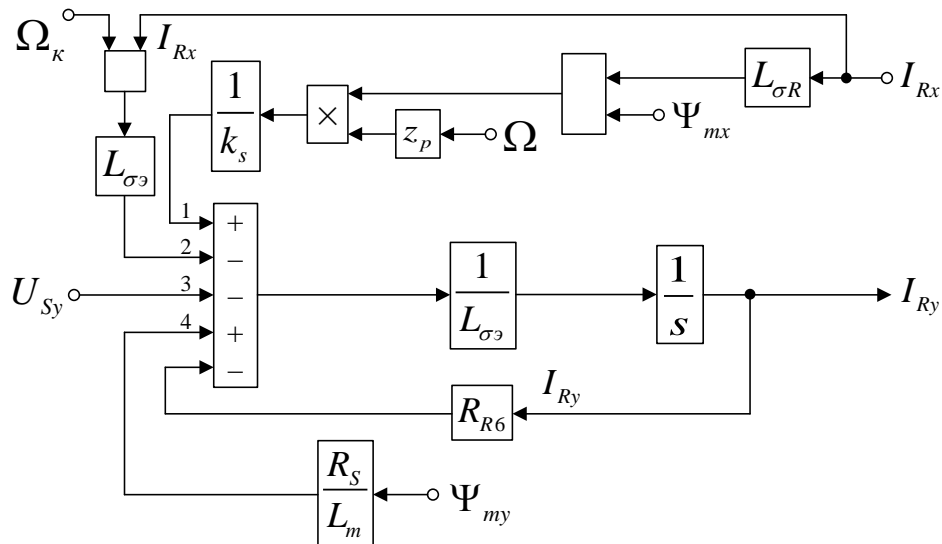


Рисунок 14 – Структурная схема для определения тока I_{Ry}

Для определения потокосцепления Ψ_{my} приведем уравнение (18) из работы [1]:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} = \left(\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \right) \cdot \Psi_{my} + \left(\frac{L_{\sigma R} \cdot R_{R7} - L_{\sigma S} \cdot R_{R6}}{L_{\sigma S}} \right) \cdot I_{Ry} + \left(\frac{L_{\sigma R} + L_{\sigma S}}{k_s} \right) \cdot (\Psi_{my} \cdot s) +$$

$$+ \left(\frac{L_{\sigma R} + L_{\sigma S}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Перенесем $L_{\sigma S} \cdot (\Psi_{my} \cdot s)$ в левую часть:

$$L_{\sigma S} \cdot \Psi_{my} \cdot s = L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} - R_{S9} \cdot \Psi_{my} - R_{R7} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Определим потокосцепление Ψ_{my} по оси (+j):

$$\Psi_{my} = \left[\frac{L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} - R_{R7} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx})}{L_{\sigma S} \cdot s + R_{S9}} \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma S}} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my} представлена на рисунке 15.

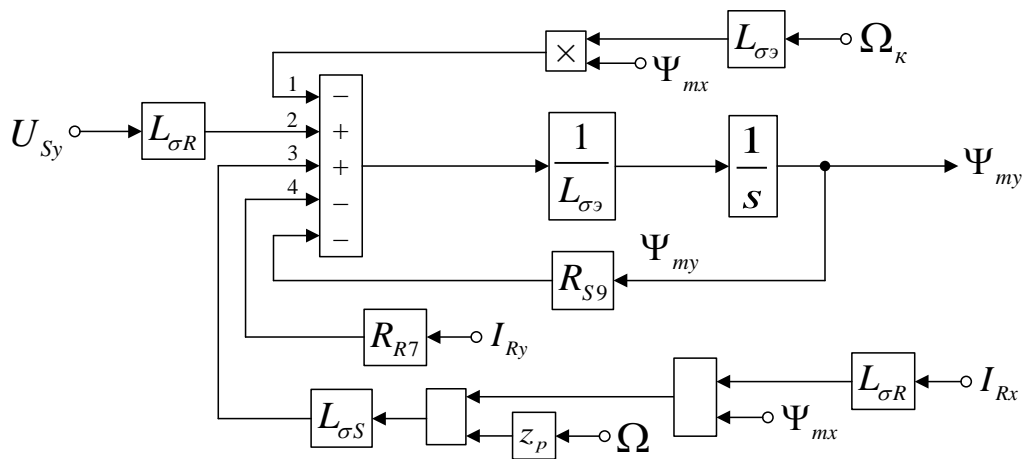


Рисунок 15 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my}

На рисунке 16 представлена структурная схема для реализации уравнения электромагнитного момента:

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} \cdot I_{Rx} - \Psi_{mx} \cdot I_{Ry}).$$

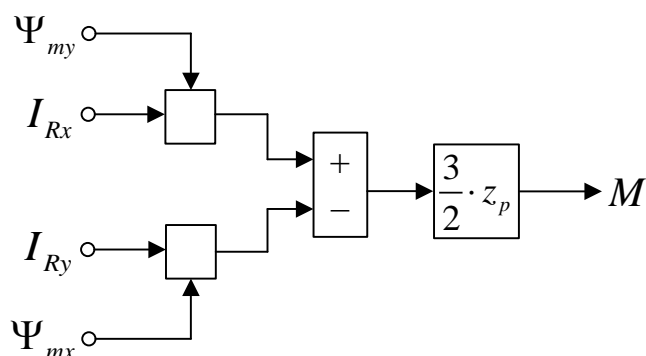


Рисунок 16 – Математическая модель определения электромагнитного момента M

Из уравнения движения выразим механическую угловую скорость вращения вала двигателя (рисунок 17):

$$M - M_c = J \cdot \Omega \cdot s;$$

$$\Omega = (M - M_c) \cdot \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{s}.$$

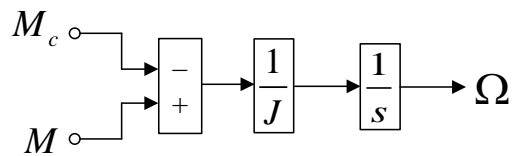


Рисунок 17 – Математическая модель уравнения движения

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в системе абсолютных единиц приведена на рисунке 18. Параметры асинхронного двигателя рассмотрены в работах [2] и [3].

Расчет параметров производим в Script:

```

PN=320000   J=28;           ks=lm/(lm+lbs);
;           Ub=sqrt(2)*UsN;  kr=lm/(lm+lbr);
UsN=380;    Ib=sqrt(2)*IsN;  betaN=(Omega0N-
IsN=324;    OmegasN=2*pi*fN  OmegaN)/Omega0N;
fN=50;      ;               lbe=lbs+lbr+lbs*lbr*lm^(
Omega0N=1   Omegab=OmegasN;  -1);
04.7;      Zb=Ub/Ib;         Lbe=lbe*Lb;
OmegaN=10   Psib=Ub/Omegab;  roN=0.9962;
2.83;      Lb=Psib/Ib;       rrk=roN*betaN;
nN=0.944;  rs=Rs/Zb;         RRk=rrk*Zb;
cos_phiN=  lbs=Xs/Zb;        RR6=Rs+RRk/ks;
0.92;      rr=Rr/Zb;         LbS=lbs*Lb;
zp=3;      lbr=Xr/Zb;        LbR=lbr*Lb;
Rs=0.0178  lm=Xm/Zb;         RR7=LbS*RRk-LbR*Rs;
;           Lm=lm*Lb;        RS9=LbR*Rs/Lm;
Xs=0.118;
Rr=0.0194
;
Xr=0.123;
Xm=4.552;

```

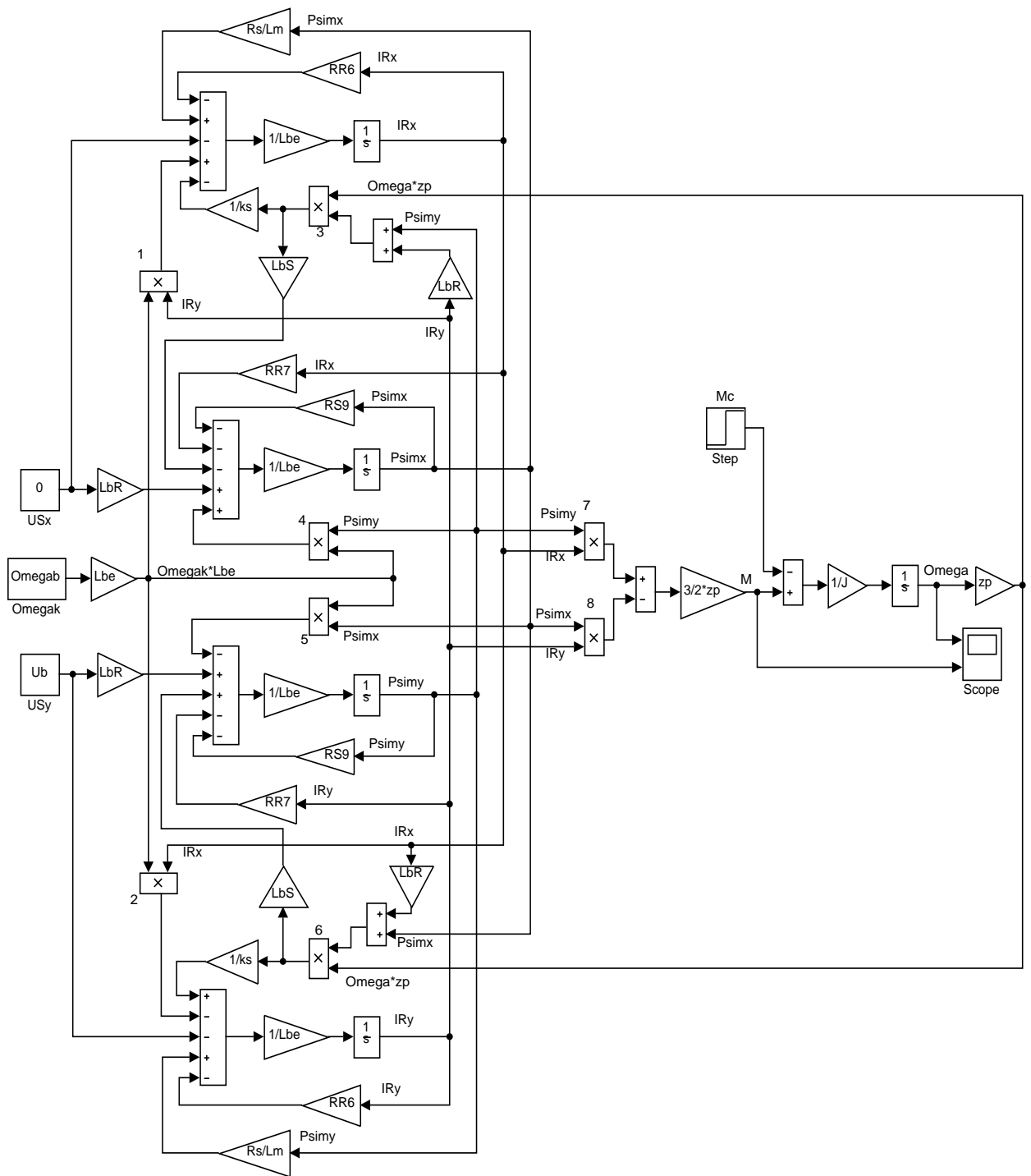



Рисунок 18 – Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в системе абсолютных единиц

Результаты моделирования асинхронного двигателя представлены на рисунке 19.

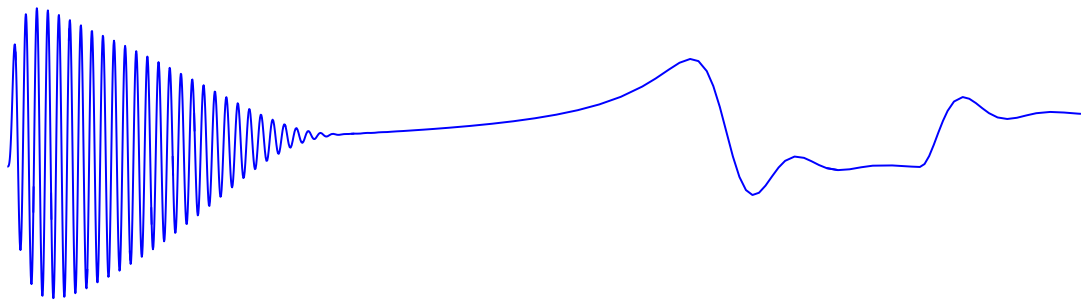
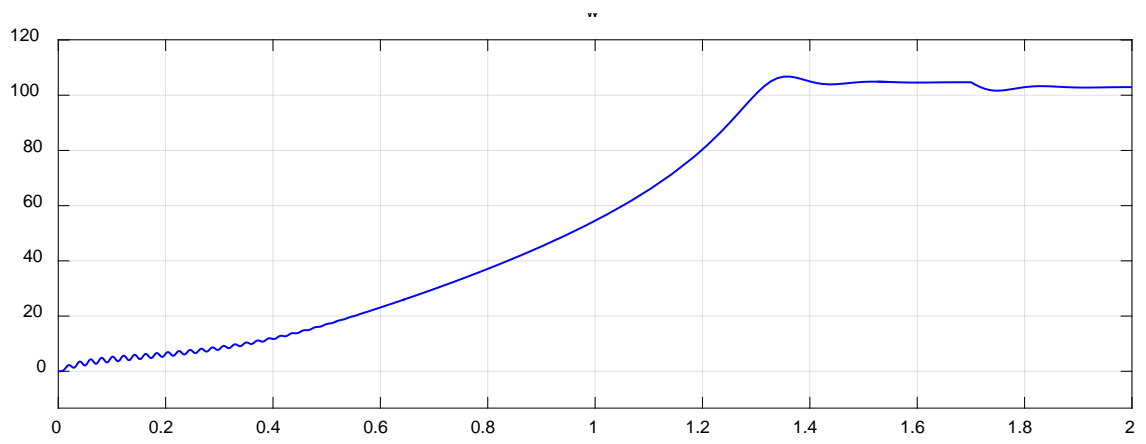


Рисунок 19 – Графики скорости и момента

2.2. Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink

Проекции векторов $\overset{\text{uu}}{I}_R$ и $\overset{\text{uuu}}{\Psi}_m$ выведены на основе интегрирующих звеньев с моделированием в Simulink.

В работе [1] было получено уравнение (13) для расчета I_{Rx} в Script-Simulink:

$$U_{Sx} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - \left(R_S + \frac{R_{Rk}}{k_s} \right) \cdot I_{Rx} - \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (I_{Rx} \cdot s) + \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_k \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Перенесем $\left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (I_{Rx} \cdot s)$ в левую часть:

$$\left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot I_{Rx} \cdot s = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - U_{Sx} - \left(R_S + \frac{R_{Rk}}{k_s} \right) \cdot I_{Rx} + \left(L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_k \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Обозначим:

$$L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k_s} = L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R} \cdot (L_m + L_{\sigma S})}{L_m} = L_{\sigma S} + L_{\sigma R} + \frac{L_{\sigma S} \cdot L_{\sigma R}}{L_m} = \left(\frac{L_{\sigma S}}{L_0} + \frac{L_{\sigma R}}{L_0} + \frac{\frac{L_{\sigma S}}{L_0} \cdot \frac{L_{\sigma R}}{L_0}}{\frac{L_m}{L_0}} \right) \cdot L_0 = \left(l_{\sigma S} + l_{\sigma R} + \frac{l_{\sigma S} \cdot l_{\sigma R}}{l_{\sigma 3}} \right) \cdot L_0 = l_{\sigma 3} \cdot L_0 = L_{\sigma 3};$$

$$R_S + \frac{R_{Rk}}{k_s} = R_{R6}.$$

Выразим ток I_{Rx} по оси (+1):

$$I_{Rx} = \left[\frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - U_{Sx} - R_{R6} \cdot I_{Rx} + L_{\sigma 3} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Ry}) - \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}) \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma 3}} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для определения тока I_{Rx} приведена на рисунке 20.

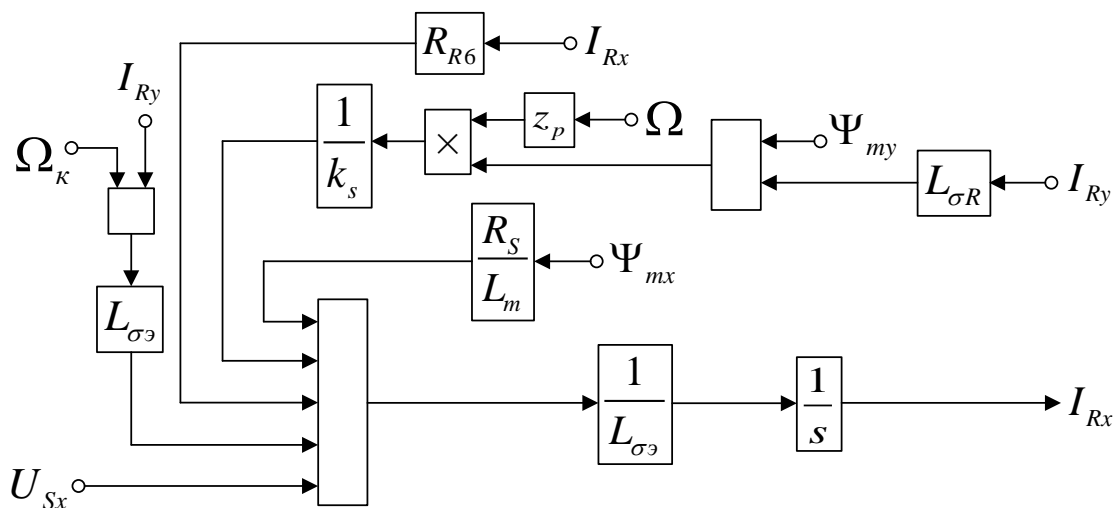


Рисунок 20 – Структурная схема для определения тока I_{Rx} в Script-Simulink

Преобразуем структурную схему на рис. 20 в оболочку, позволяющую производить расчет коэффициентов в отдельном блоке Subsystem. Для этого вместо операторов с коэффициентами, рассчитываемыми в Script, установим блоки перемножения, к которым подведены сигналы с результатами расчетов в Simulink, как показано на рисунке 21.

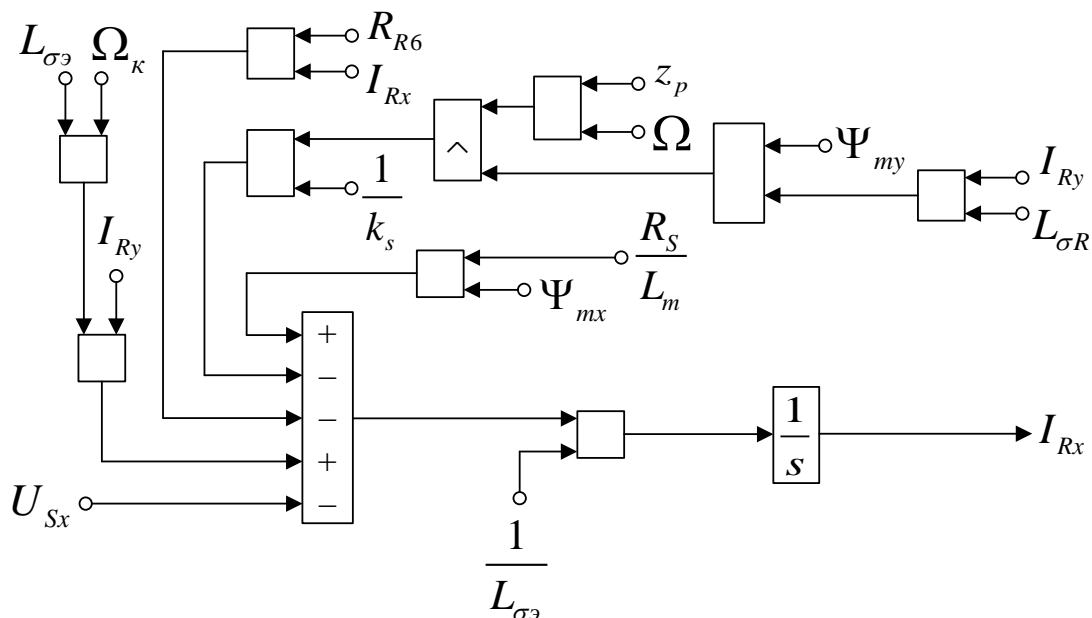


Рисунок 21 – Структурная схема для определения тока I_{Rx} в Simulink

Для определения потокосцепления Ψ_{mx} приведем уравнение (14) из работы [1]:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} = \frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + (L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Rx} + \left(\frac{L_{\sigma R}}{k} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) -$$

$$- \left(\frac{L_{\sigma R}}{k} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Перенесем $\left(\frac{L_{\sigma R}}{k} + L_{\sigma S} \right) \cdot (\Psi_{mx} \cdot s)$ в левую часть:

$$L_{\sigma S} \cdot \Psi_{mx} \cdot s = L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} - \frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - (L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Rx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) -$$

$$- L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}).$$

Обозначим:

$$L_{\sigma S} \cdot R_{Rk} - L_{\sigma R} \cdot R_S = R_{R7};$$

$$\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} = R_{S9}.$$

Определим Ψ_{mx} по оси (+1):

$$\Psi_{mx} = \left[\frac{L_{\sigma R} \cdot U_{Sx} - R_{R7} \cdot I_{Rx} - R_{S9} \cdot I_{Rx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) - L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry})}{L_{\sigma S} \cdot s} \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma S}} \cdot \frac{1}{s}.$$

Схема для определения потокосцепления Ψ_{mx} приведена на рисунке 22.

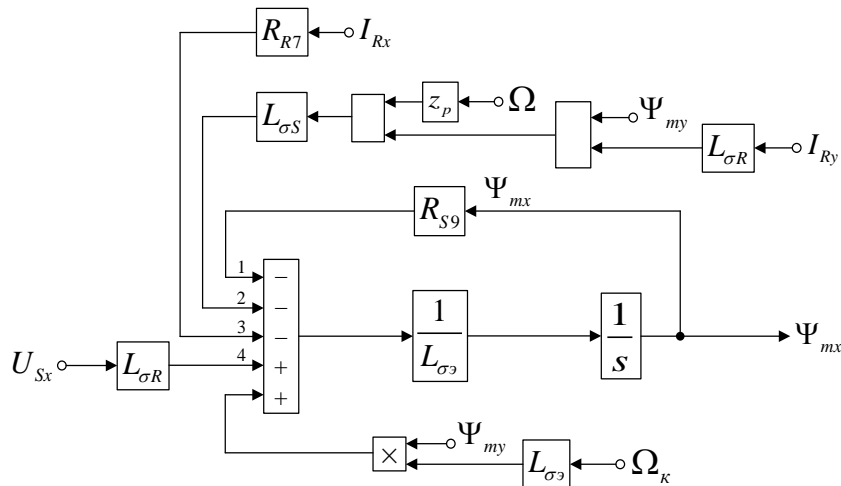


Рисунок 22 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx} в Script-Simulink

Расчет коэффициентов будем производить в отдельном блоке Subsystem, поэтому вносим в структурную схему на рис. 22 блоки перемножения (рисунок 23).

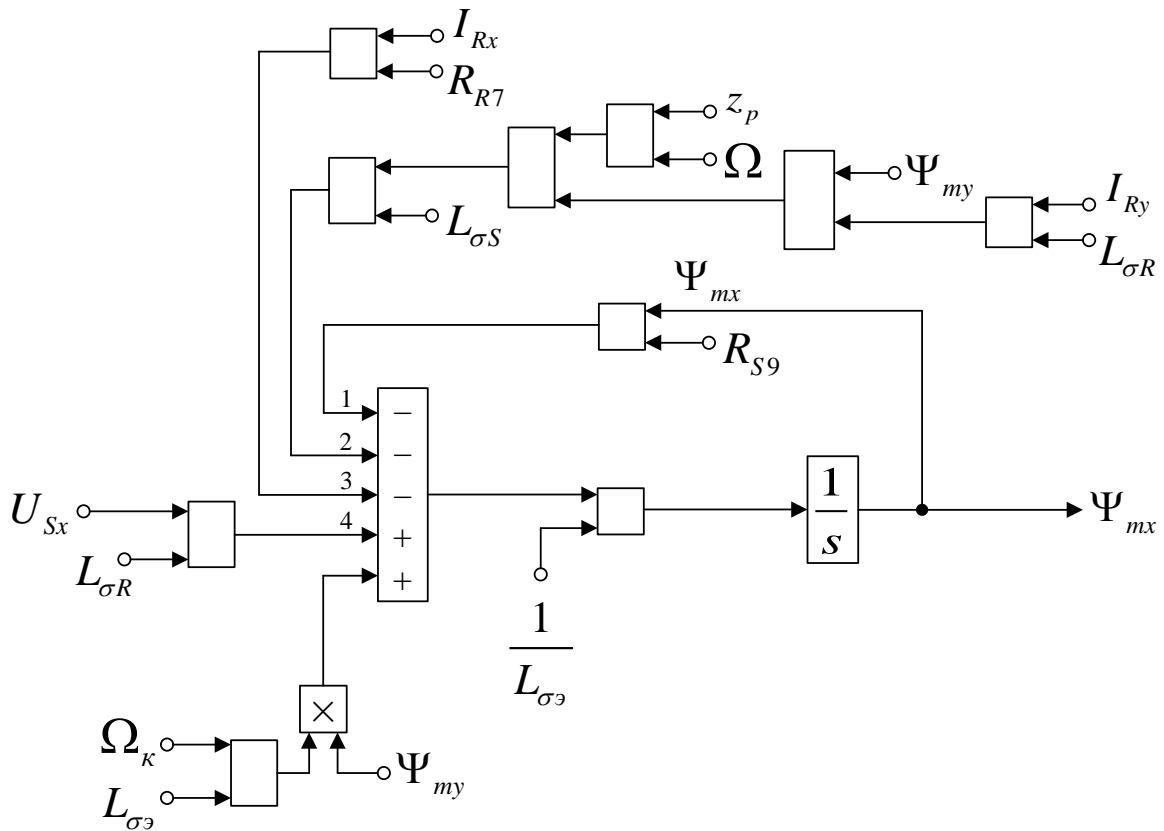


Рисунок 23 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx} в Simulink

Аналогично определим ток I_{Ry} и потокосцепление Ψ_{my} по оси (+j).

Приведем уравнение (17) из работы [1]:

$$U_{Sy} = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - \left(\frac{R_S + \frac{R_{R\kappa}}{k}}{R_{R6}} \right) \cdot I_{Ry} - \left(\frac{L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k}}{L_{\sigma\epsilon}} \right) \cdot (I_{Ry} \cdot s) - \left(\frac{L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k}}{L_{\sigma\epsilon}} \right) \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Перенесем $\left(\frac{L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma R}}{k}}{L_{\sigma\epsilon}} \right) \cdot (I_{Ry} \cdot s)$ в левую часть:

$$L_{\sigma\epsilon} \cdot I_{Ry} \cdot s = \frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - U_{Sy} - R_{R6} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma\epsilon} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Определим ток I_{Ry} по оси (+j):

$$I_{Ry} = \left[\frac{R_S}{L_m} \cdot \Psi_{my} - U_{Sy} - R_{R6} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma\epsilon} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Rx}) + \frac{1}{k_s} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}) \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma\epsilon}} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для определения тока I_{Ry} представлена на рисунке

24.

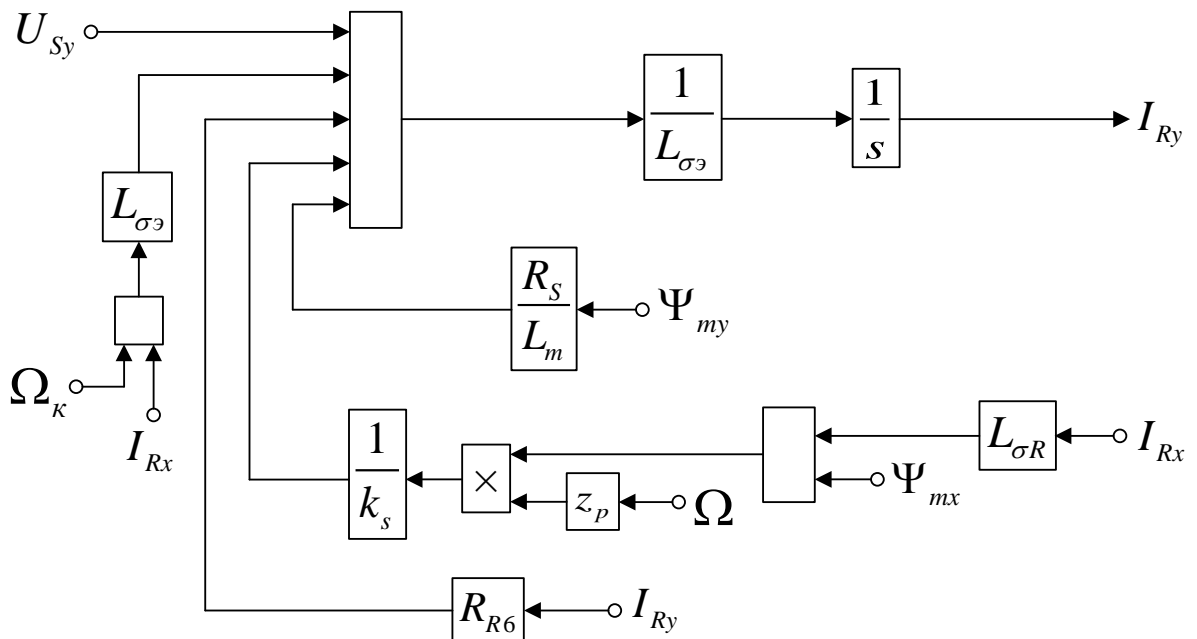


Рисунок 24 – Структурная схема для определения тока I_{Ry} в Script-Simulink

Схема для расчета I_{Ry} в Simulink представлена на рисунке 25.

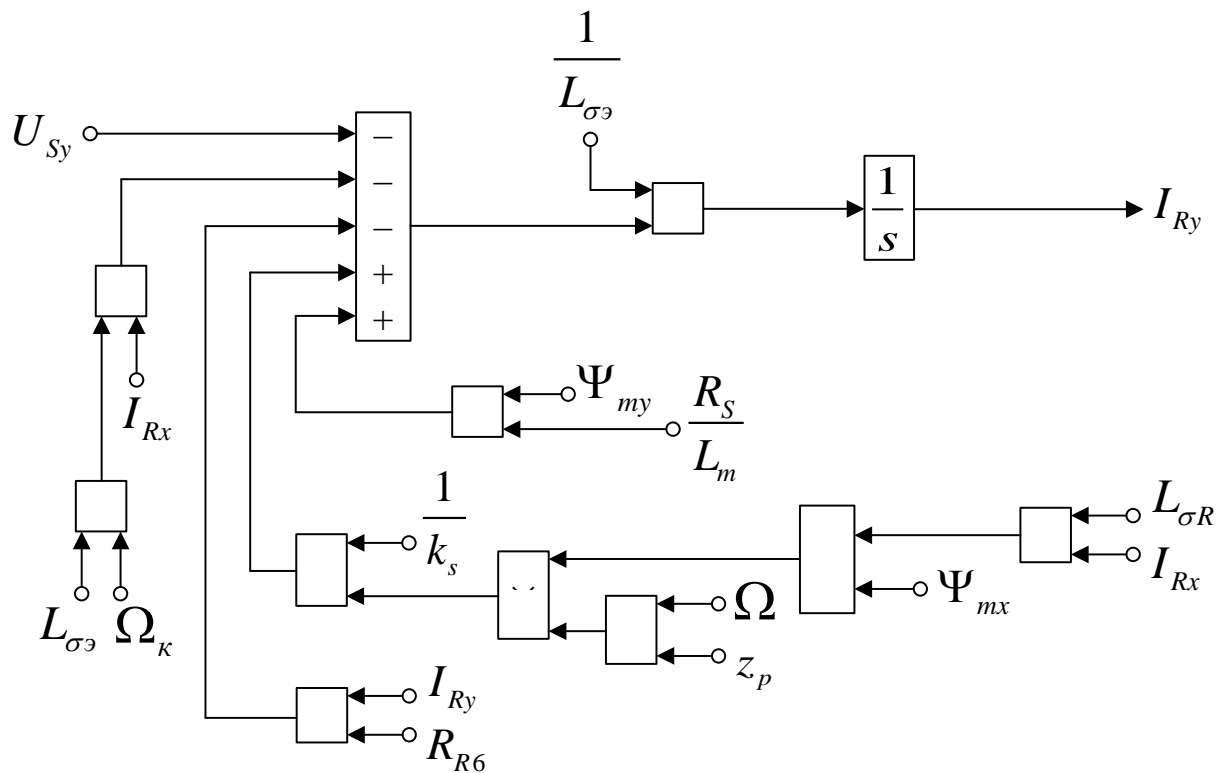


Рисунок 25 – Структурная схема для определения тока I_{Ry} в Simulink

Для определения потокосцепления Ψ_{my} приведем уравнение (18) из работы [1]:

$$L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} = \left(\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \right) \cdot \Psi_{my} + (L_{\sigma S} \cdot R_{R\kappa} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Ry} + \left(\frac{L_{\sigma R} + L_{\sigma S}}{k_s} \right) \cdot (\Psi_{my} \cdot s) +$$

$$+ \left(\frac{L_{\sigma R} + L_{\sigma S}}{k_s} \right) \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Перенесем $\left(\frac{L_{\sigma R} + L_{\sigma S}}{k_s} \right) \cdot (\Psi_{my} \cdot s)$ в левую часть:

$$L_{\sigma S} \cdot \Psi_{my} \cdot s = L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} - \left(\frac{L_{\sigma R} \cdot R_S}{L_m} \right) \cdot \Psi_{my} - (L_{\sigma S} \cdot R_{R\kappa} - L_{\sigma R} \cdot R_S) \cdot I_{Ry} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) +$$

$$+ L_{\sigma S} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}).$$

Выразим потокосцепление Ψ_{my} по оси (+j):

$$\Psi_{my} = \left[\begin{matrix} L_{\sigma R} \cdot U_{Sy} - R_{S9} \cdot \Psi_{my} - R_{R7} \cdot I_{Ry} - L_{\sigma \varepsilon} \cdot (\Omega_k \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma \varepsilon} \cdot \Omega \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}) \end{matrix} \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma \varepsilon}} \cdot \frac{1}{s}$$

Структурная схема для определения Ψ_{my} представлена на рисунке 26.

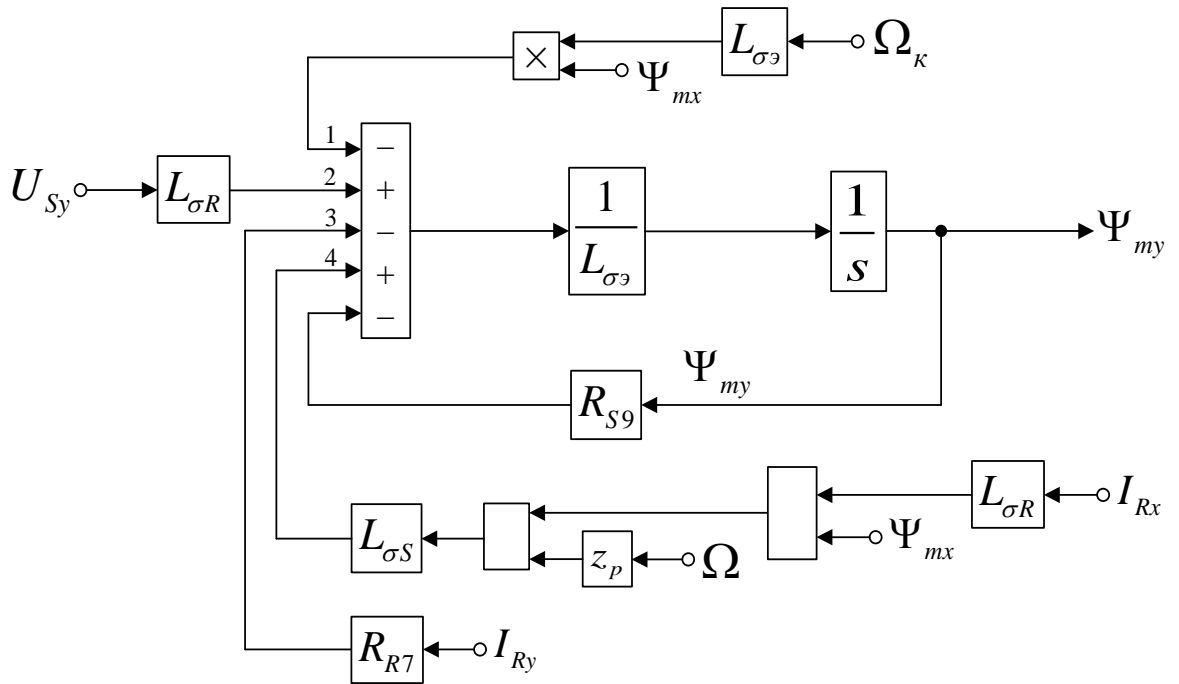


Рисунок 26 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my} в Script-Simulink

Схема для расчета Ψ_{my} в Simulink дана на рисунке 27.

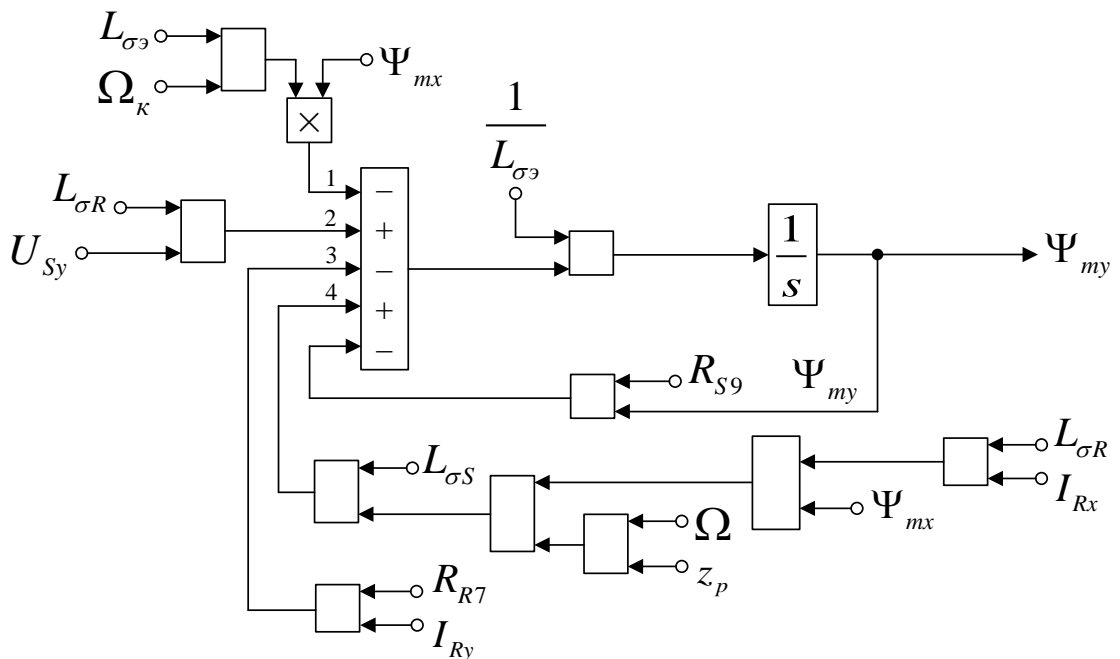


Рисунок 27 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my} в Simulink

На рисунке 28 представлена структурная схема для реализации уравнения электромагнитного момента:

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{my} \cdot I_{Rx} - \Psi_{mx} \cdot I_{Ry}).$$

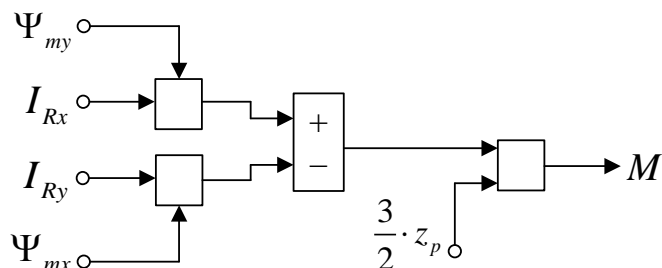


Рисунок 28 – Математическая модель определения электромагнитного момента M в Simulink

Из уравнения движения выразим механическую угловую скорость вращения вала двигателя (рисунок 29):

$$M - M_c = J \cdot \Omega \cdot s;$$

$$\Omega = (M - M_c) \cdot \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{s}.$$

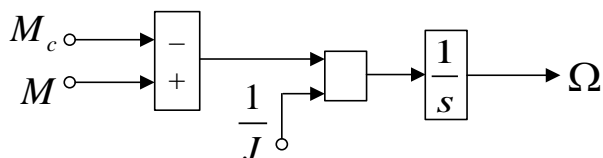


Рисунок 29 – Математическая модель уравнения движения в Simulink

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в системе абсолютных единиц в Simulink дана на рисунках 30, ..., 34.

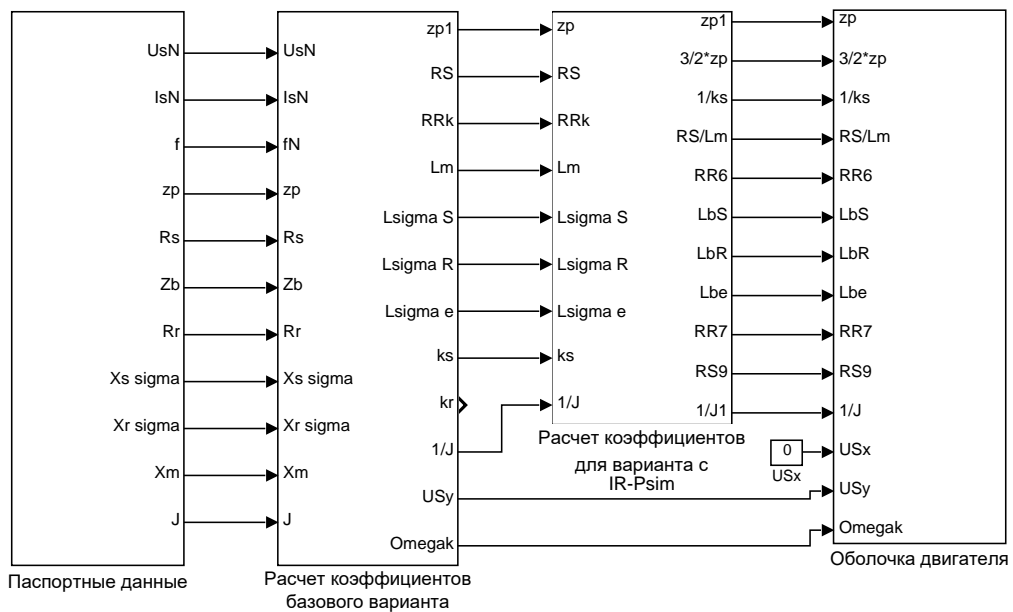


Рисунок 30 – Общая схема математической модели асинхронного двигателя с переменными

$I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в системе абсолютных единиц в

Simulink

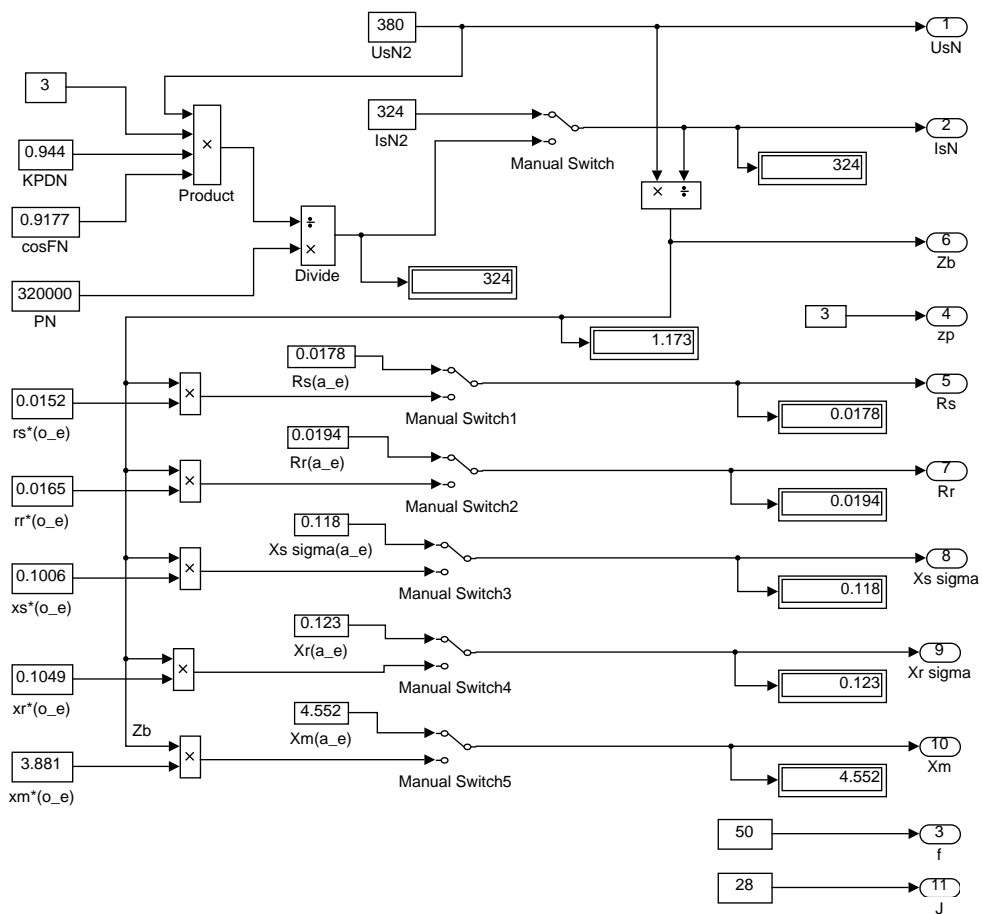


Рисунок 31 – Паспортные данные

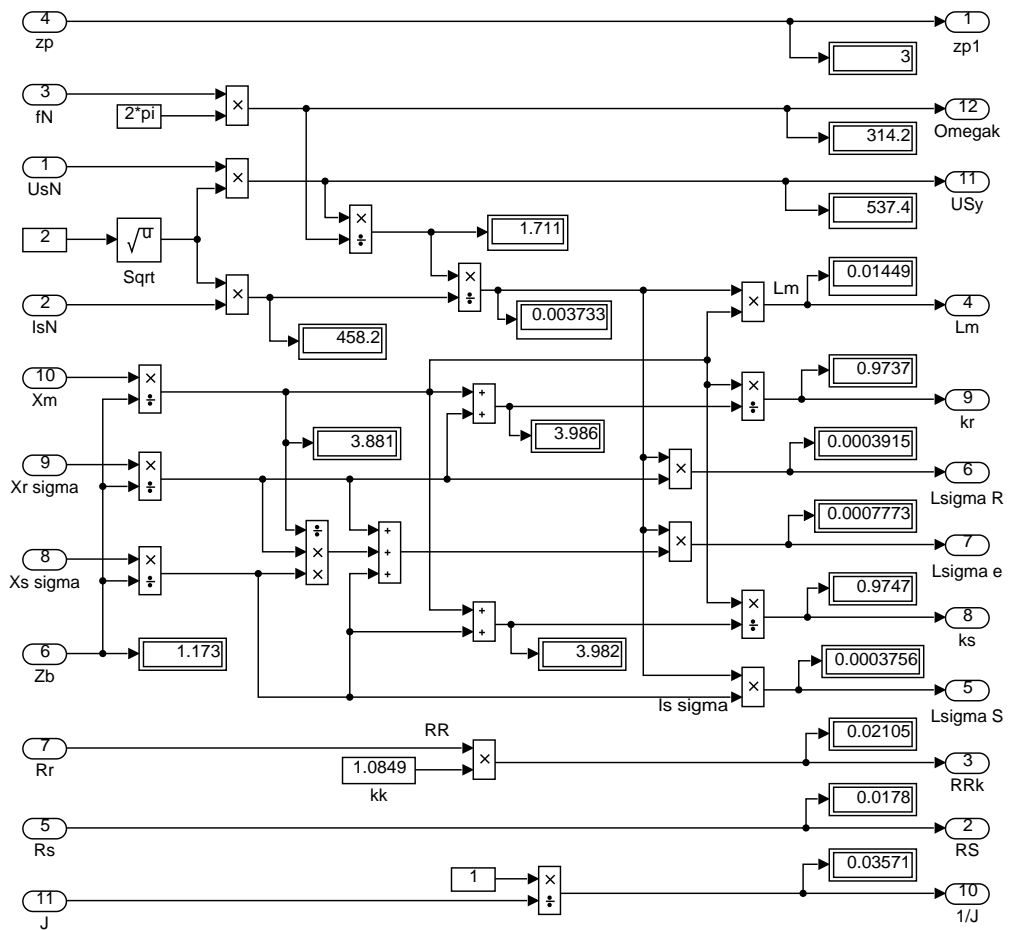


Рисунок 32 – Расчет коэффициентов базового варианта

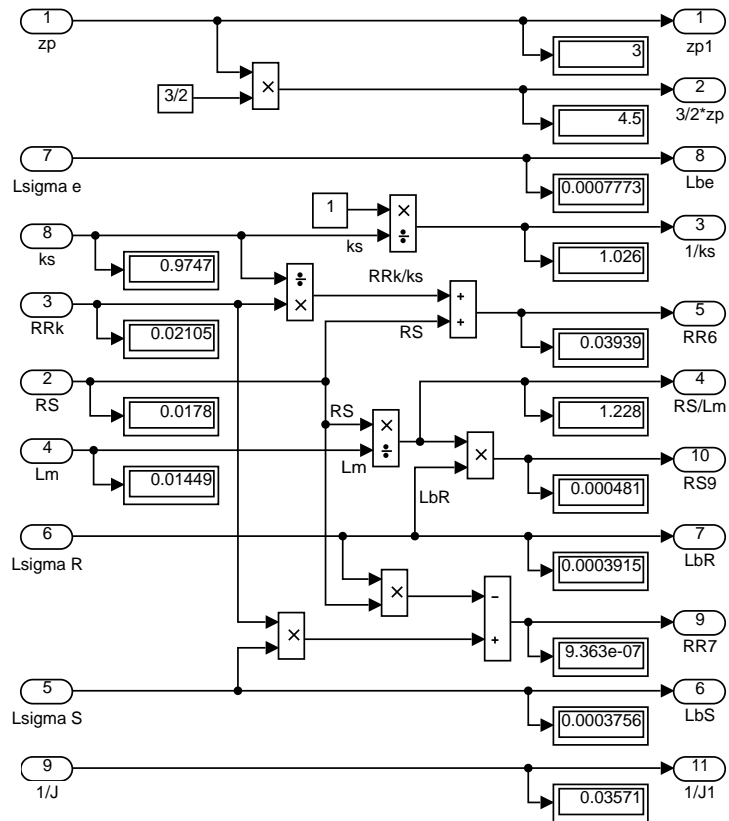


Рисунок 33 – Расчет коэффициентов для варианта с переменными I_R – Ψ_m

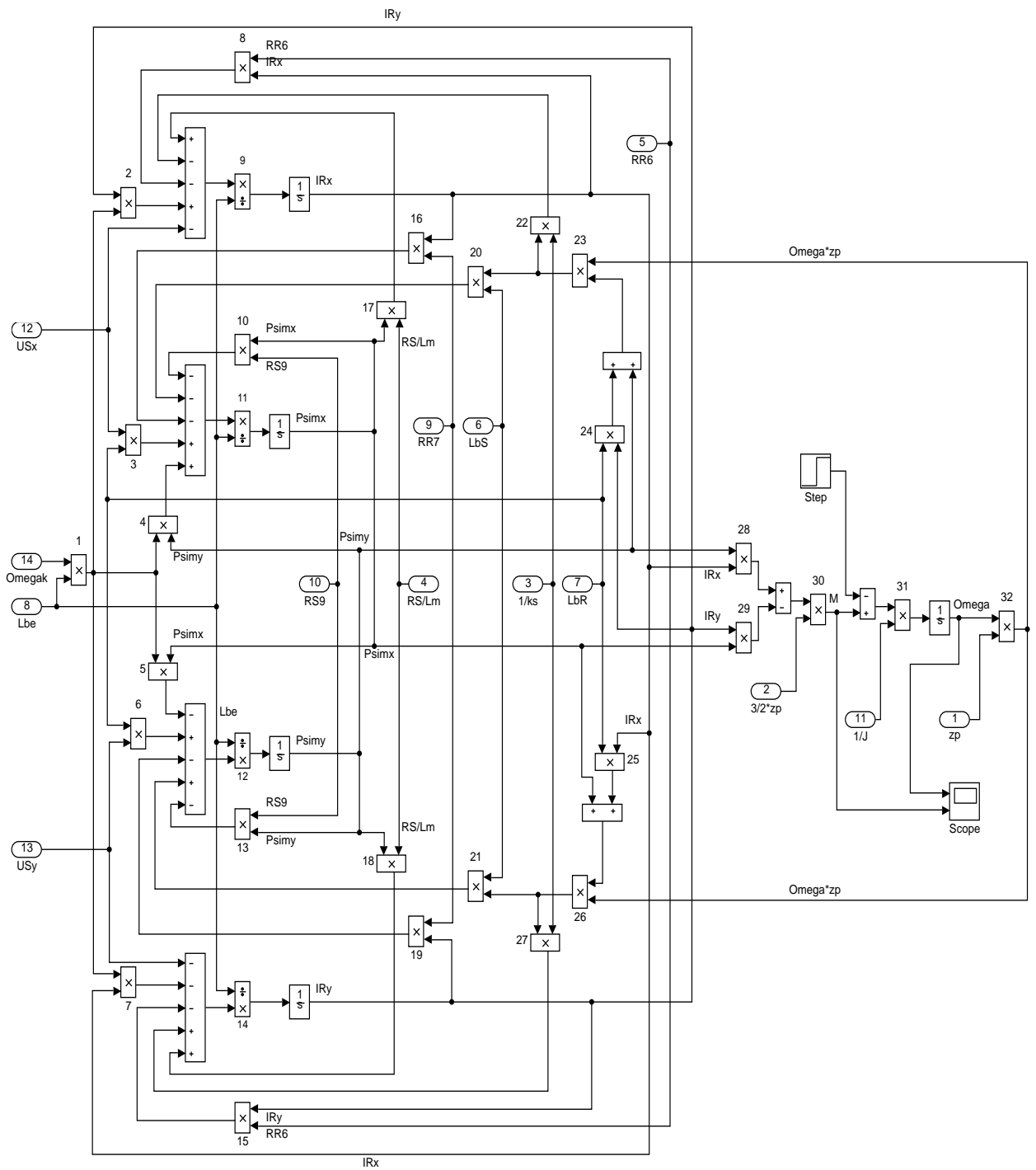


Рисунок 34 – Оболочка модели асинхронного двигателя с переменными I_R – Ψ_m на выходе интегрирующих звеньев в системе абсолютных единиц в Simulink

Эту же схему можно представить в более компактной форме с использованием блоков Goto и From (рисунок 35) и отдельных субблоков с расчетами токов и потокосцеплений, приведенных на рисунках 36, ..., 39.

40.

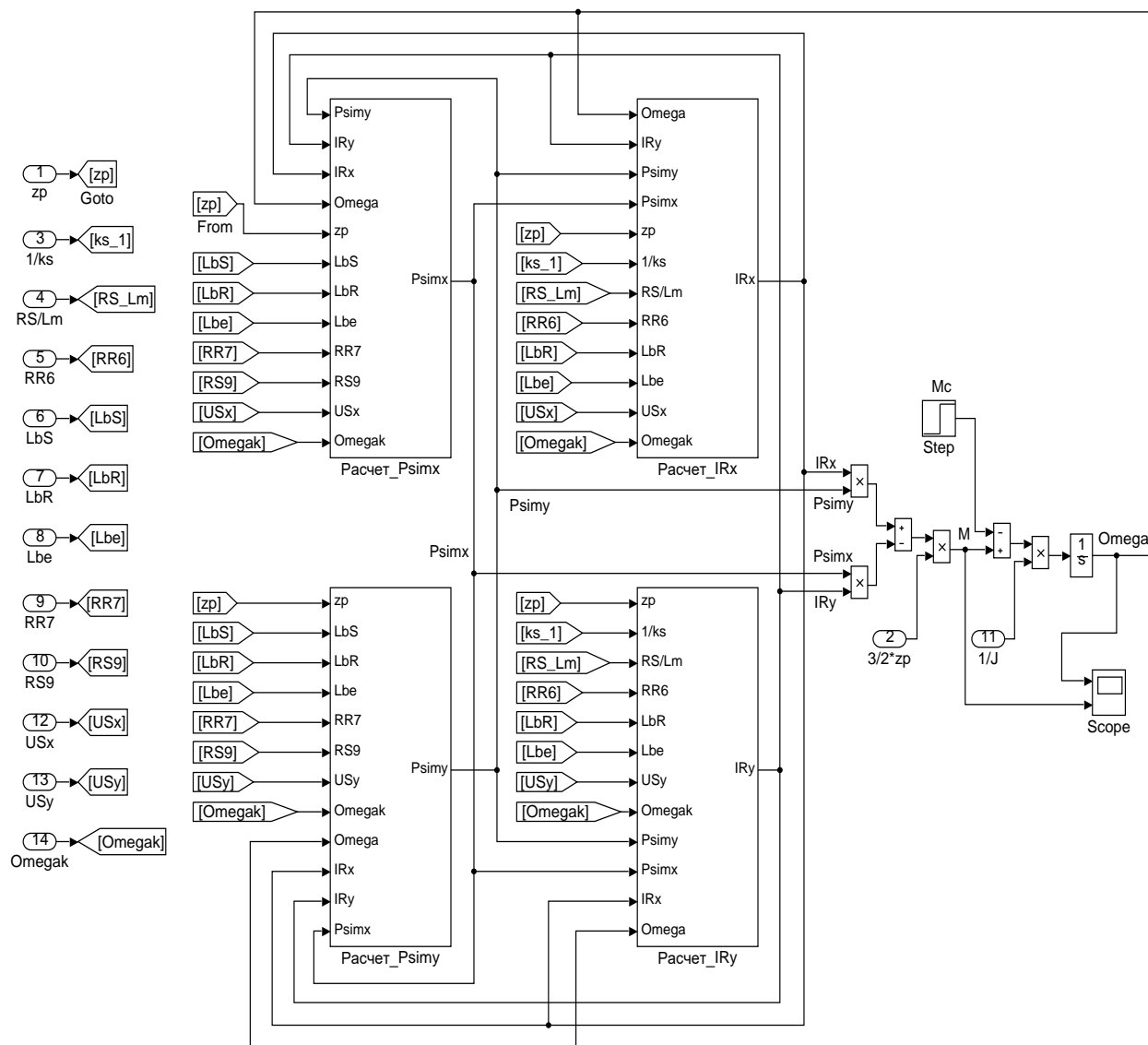


Рисунок 35 – Оболочка модели асинхронного двигателя с применением блоков Goto и From

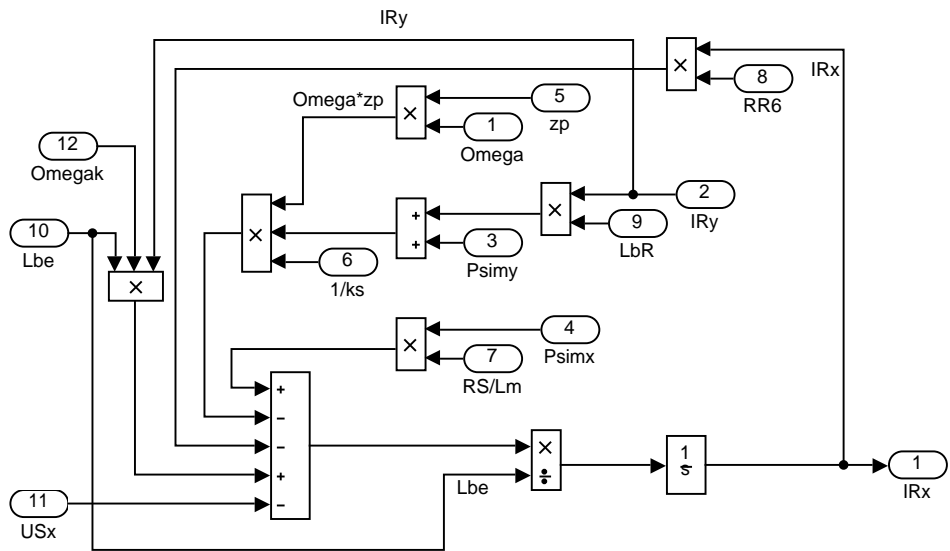


Рисунок 36 – Схема для расчета тока I_{Rx}

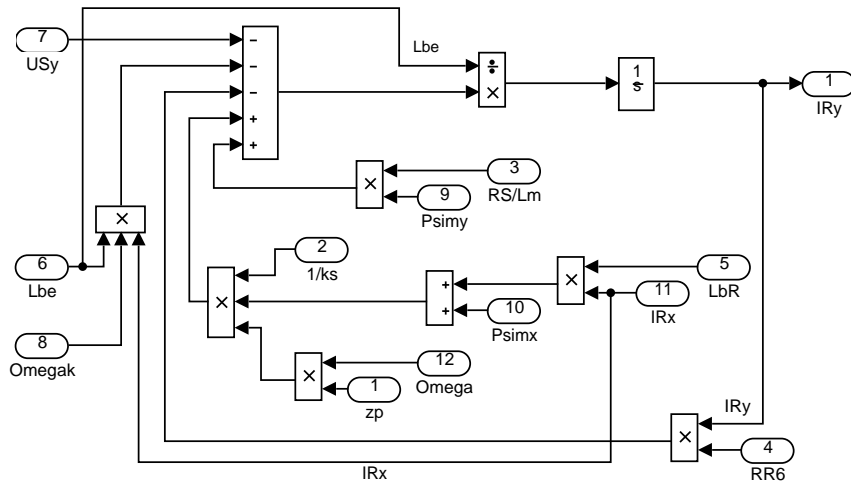


Рисунок 37 – Схема для расчета тока I_{Ry}

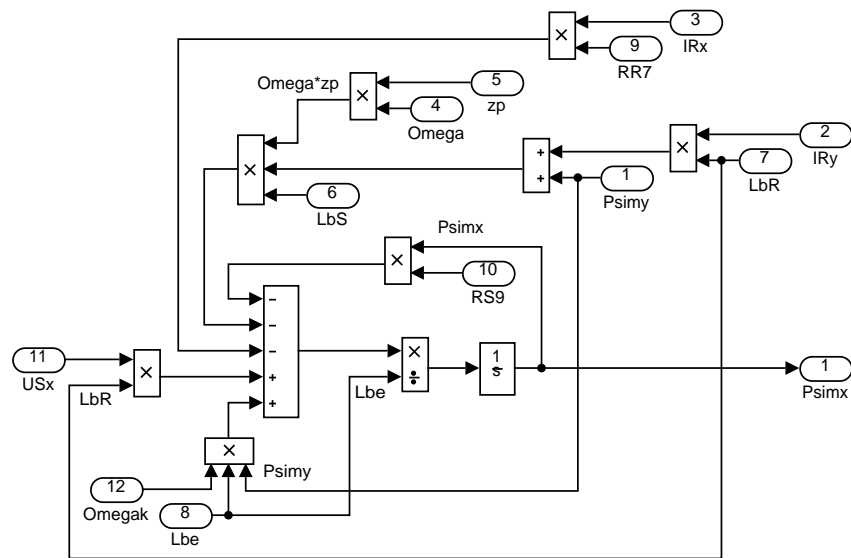


Рисунок 38 – Схема для расчета потокосцепления Ψ_{mx}

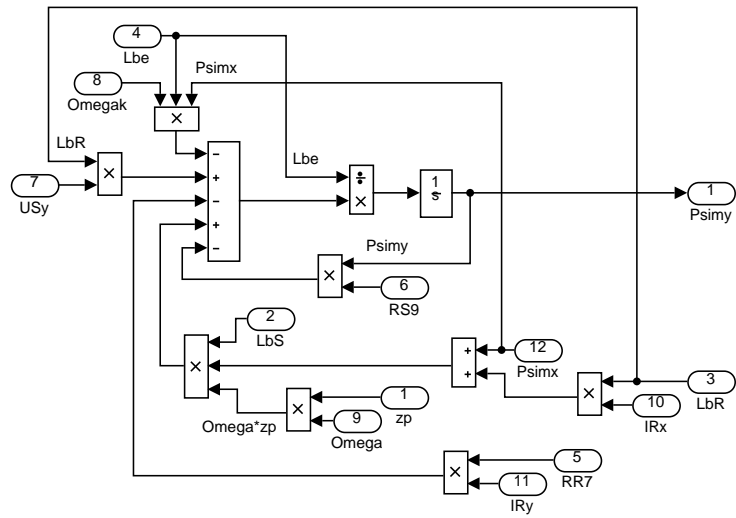


Рисунок 39 – Схема для расчета потокосцепления Ψ_{my}

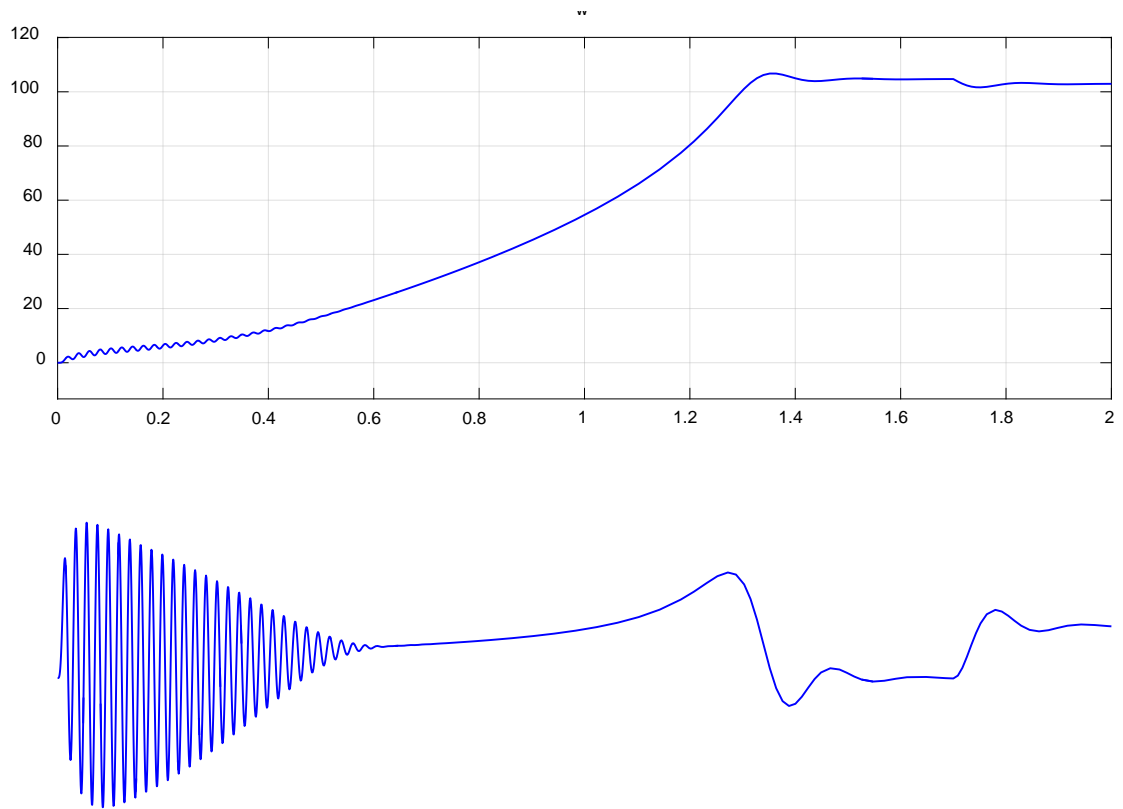


Рисунок 40 – Графики скорости и момента

3. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Тема: Исследование математической модели асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$

Цель работы: исследовать влияние параметров (моментов инерции двигателя и величины наброса нагрузки) на переходные процессы в эксперименте на математической модели асинхронного двигателя.

Оборудование: персональный компьютер, принтер.

Программное обеспечение: MathWorks MatLab – Simulink.

Порядок выполнения работы:

1. Для начала работы необходимо запустить пакет Matlab из меню «Пуск», либо с ярлыка на рабочем столе. После этого откроется основное рабочее окно приложения на рисунке 41.

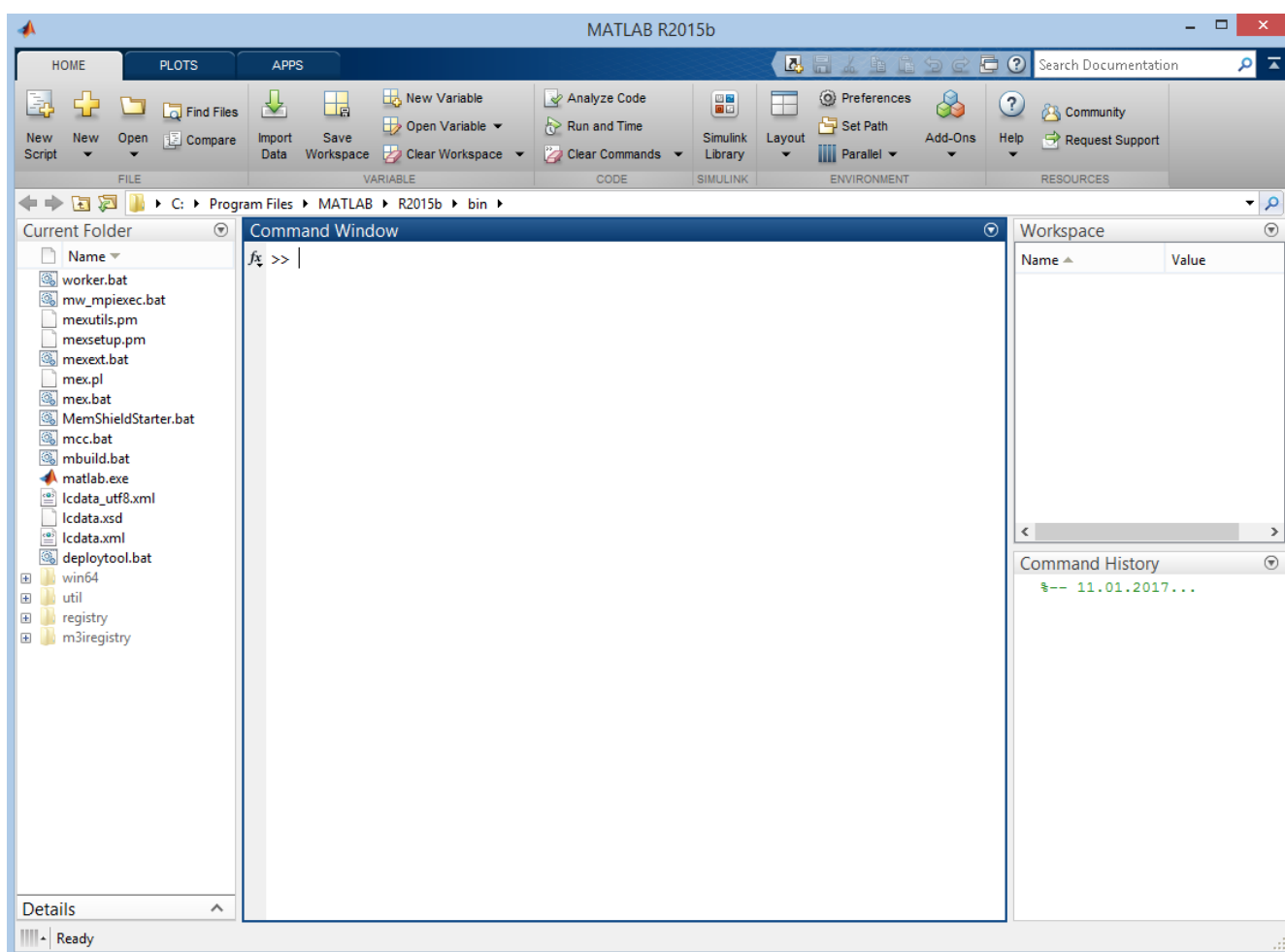


Рисунок 41 – Рабочее окно приложения MATLAB

2. Создать новый файл модели Simulink. Для этого во вкладке HOME нажать кнопку New и в открывшемся меню выбрать Simulink Model на рисунке 42.

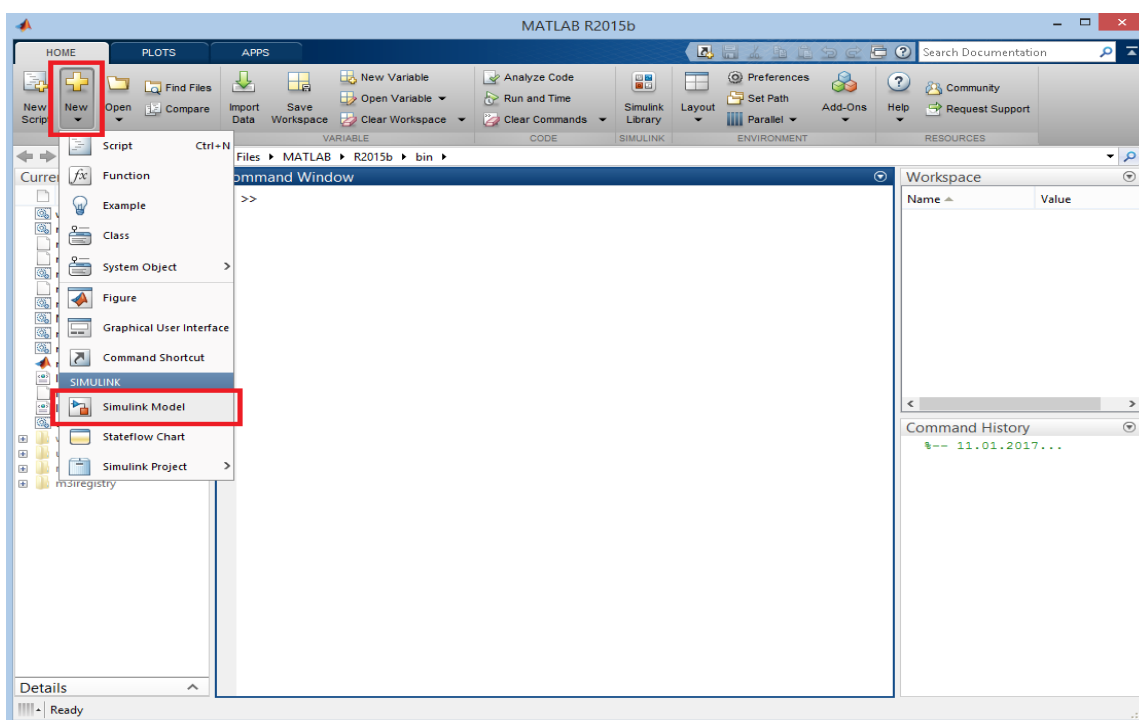


Рисунок 42 – Создание нового файла модели Simulink

После выполнения данных операций откроется окно Simulink с рабочим полем для создания модели.

3. В окне Simulink, нажав на пиктограмму с изображением четырех квадратов, открыть обозреватель библиотек элементов Simulink Library Browser на рисунке 43.

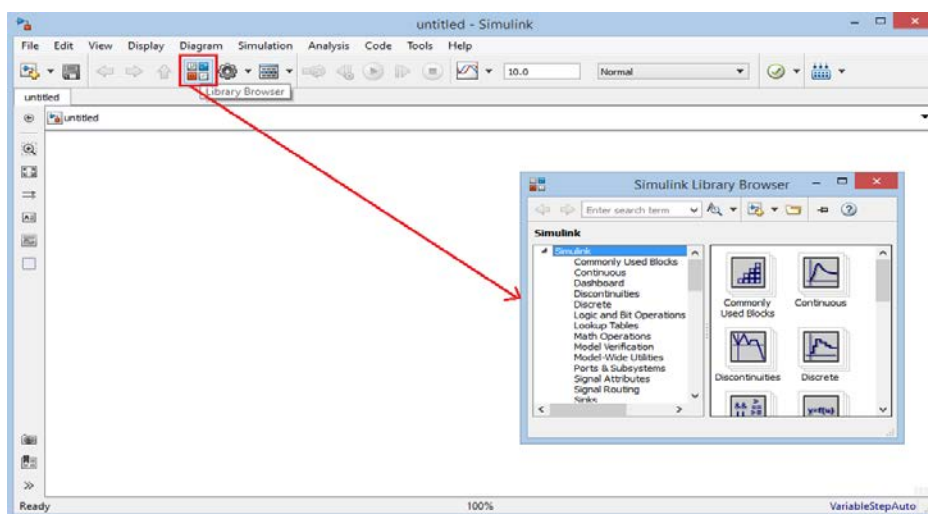


Рисунок 43 – Открытие обозревателя библиотек Simulink

4. Порядок сборки модели.

Математическая модель лабораторной работы в Simulink приведена на рисунках 44 – 48 для базового варианта.

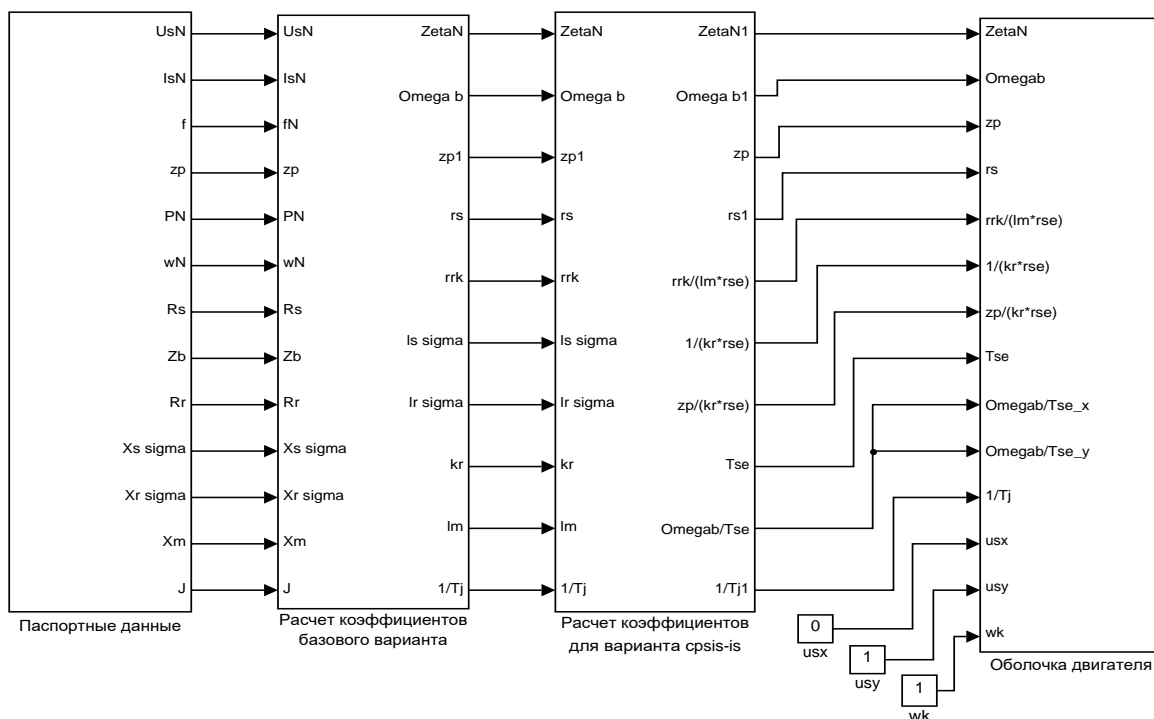


Рисунок 44 – Общая схема математической модели асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink

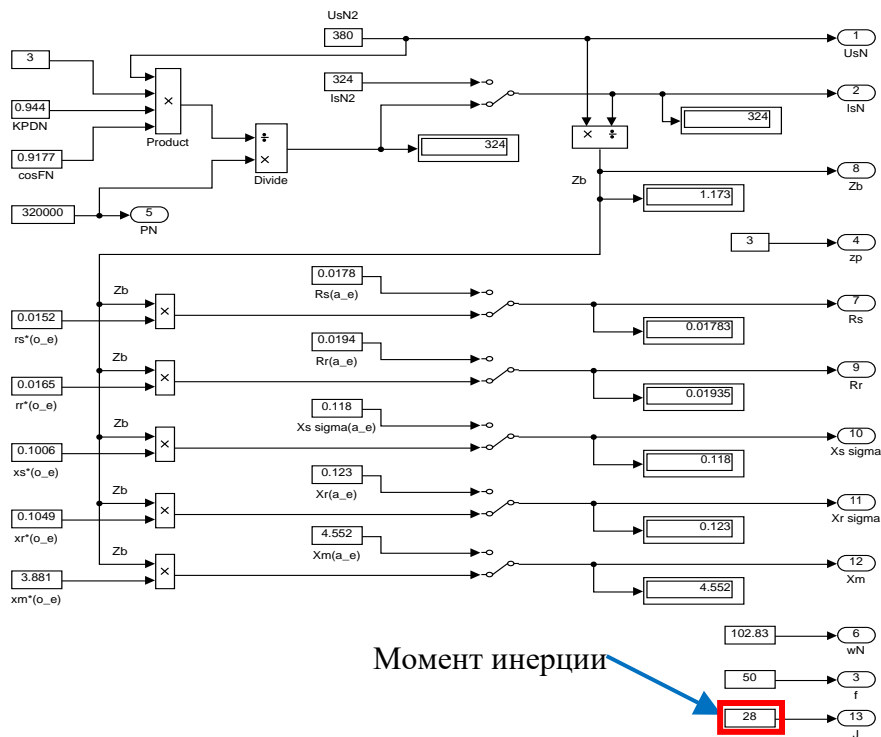


Рисунок 45 – Паспортные данные

Варианты изменения момента инерции:

$$J_{\text{базовое}} = 28 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J = J_{\text{базовое}} \cdot k,$$

где $k = 0,5; 0,75; 1,5; 2.$

Расчет коэффициентов базового варианта на рисунке 46

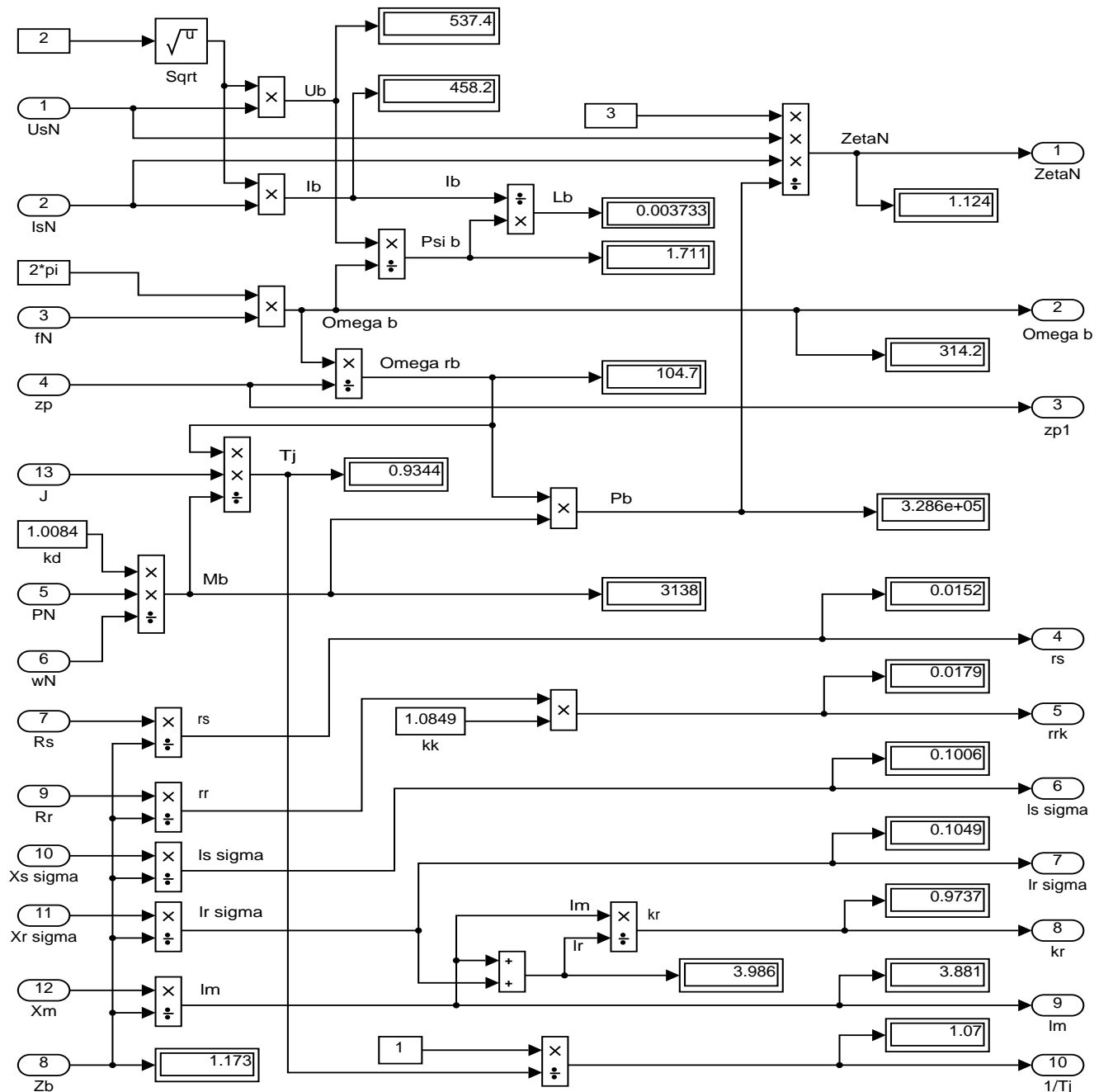


Рисунок 46 – Расчет коэффициентов базового варианта

47

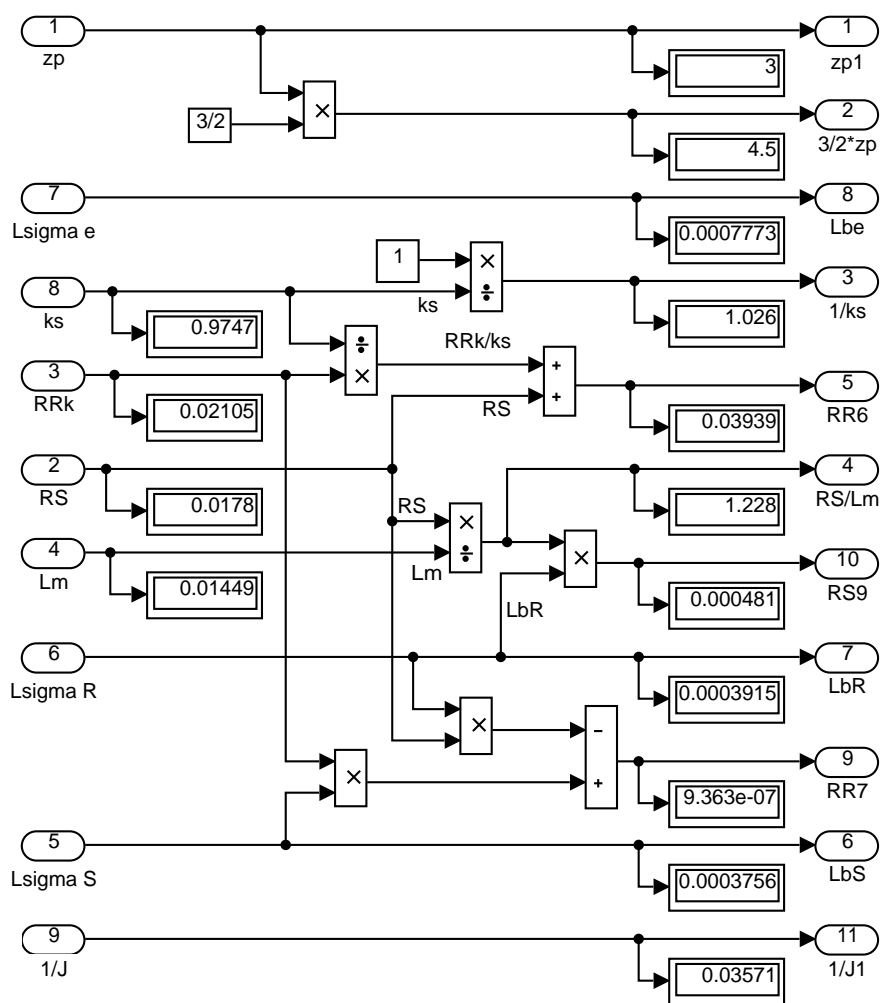


Рисунок 47 – Расчет коэффициентов для варианта с переменными $I_R - \Psi_m$

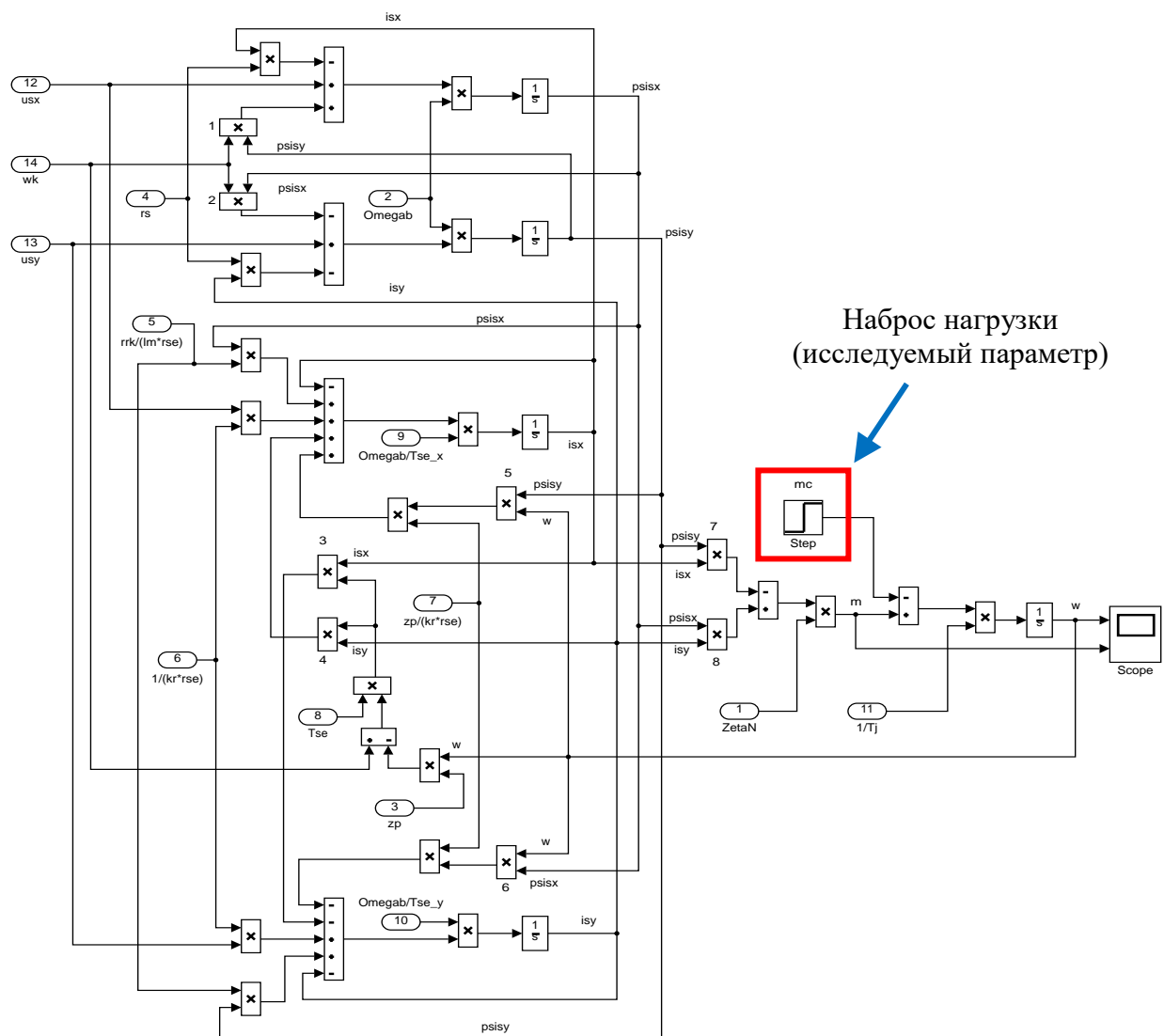


Рисунок 48 – Оболочка модели асинхронного двигателя с переменными I_R – Ψ_m на выходе интегрирующих звеньев в Simulink

Варианты изменения наброса нагрузки:

$$M_{c_{\text{базовое}}} = 3000 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_c = M_{c_{\text{базовое}}} \cdot k,$$

где $k = 0,5; 0,75; 1,5; 2$.

После окончания расчета открыть блок Scope, чтобы увидеть полученные характеристики. Результаты моделирования асинхронного двигателя представлены на рисунке 49.

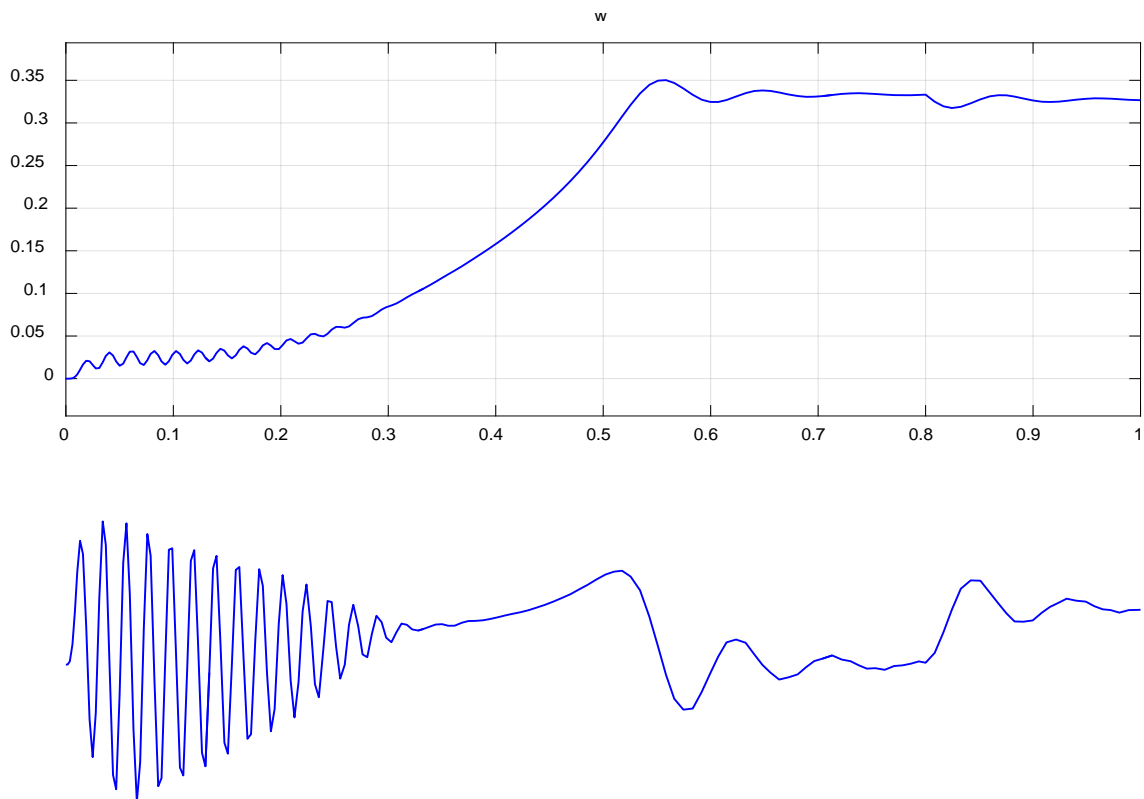


Рисунок 49 – Графики скорости и момента

5. Исследуйте, как влияет на переходный процесс, в сравнении с базовым, изменение того или иного параметра. Вариант исследуемого параметра задается преподавателем.

6. Составьте отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать следующие пункты:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- исходные данные;
- полученные графики;
- оценка переходных процессов при изменении параметров;
- выводы по результатам лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Дать понятие апериодических и интегрирующих звеньев.
2. Почему во всех случаях получены одинаковые результаты переходных процессов в базовом варианте?
3. Чем отличаются модели в Simulink и Simulink-Script?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая выпускная квалификационная работа была посвящена математическому моделированию асинхронного двигателя.

В ходе работы были проанализированы научно-техническая литература по теории асинхронных машин и математическому моделированию электрических машин, а также научные статьи по теме исследования. В анализируемой литературе подчеркивается актуальность, доступность, структура и ориентация на аудиторию.

Далее были подготовлены математические модели асинхронных двигателей.

При этом была достигнута главная цель – представить модели в доступной для понимания студентами форме.

Для автоматизации расчетов для каждой модели была составлена программа в пакете MatLab, в результате чего были получены графики зависимостей электромагнитного усилия, линейной скорости и токов статорной обмотки от времени.

Как вы можете видеть, во всех трех главах разные математические модели имеют одинаковые переходные процессы (электромагнитный момент и скорость). Это связано с тем, что для одного и того же асинхронного двигателя построены математические модели, а характеристики фигур, полученных на математической модели, должны соответствовать структуре переходных процессов в экспериментальной установке на реальном двигателе.

Различие результатов математических моделей в Simulink, от моделей в «металле» связано с допущениями, которые производятся в моделях с одной стороны, а с другой стороны сам реальный эксперимент имеет свои неточности.

Если имеются отличия, это связано с тем, что в математической модели, как правило, не учитываются какие-либо условия реального эксперимента.

В данной работе не учтены насыщения магнитной цепи, вытеснение токов в беличьей клетке и изменение активного сопротивления при нагреве в рабочем режиме.

В результате исследования влияния момента инерции математической модели асинхронного двигателя, можно сделать следующий вывод: во сколько раз изменяется момент инерции во столько же раз изменяется длительность переходного процесса. Максимальные амплитуды электромагнитных моментов не зависят от моментов инерции.

Данную разработку можно использовать в учебном процессе для изучения по дисциплине «Математическое моделирование электромеханических систем».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст]: учеб. для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. 2-е изд. Москва.: Академия, 2004. 576 с.
2. Васильев А.Н. Matlab. Самоучитель. Практический подход. – Санкт-Петербург: Наука и Техника, 2012. – 448 с.
3. Вейнгер А. М. Проектирование электроприводов [Текст]: справочник / А. М. Вейнгер, В. В. Караман, Ю. С. Тартаковский, В. П. Чудновский; под редакцией А. М. Вейнгера. Свердловск: Средне-Уральское. книжное издательство, 1980. 160 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины [Текст]: учебник для вузов / А. И. Вольдек. 3-е издательство, Ленинград.: Энергия, 1978. 832 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. – Санкт-Петербург: КОРОНА-Принт, 2010. – 320 с.
6. Дацковский Л. Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе [Текст]: / Л. Х. Дацковский, В. И. Роговой, Б. И. Абрамов, Б. И. Моцохейн, С. П. Жижин // Электротехника. 1996. № 10.
7. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. - Москва: ДМК Пресс, 2012.- 768 с.
8. Емельянов А.А., Бесклеткин В.В., Коновалов И.Д., Антоненко И.А., Харин В.С., Ченцова Е.В., Шевнин С.С., Федосеев П.В. Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ в Simulink-Script // Молодой ученый. - 2016. - №21. - С. 20-30.
9. Емельянов А.А., Бесклеткин В.В., Авдеев А.С., Чернов М.В., Киряков Г.А., Габзалилов Э.Ф., Фуртиков К.А., Реутов А.Я., Королев О.А.

Математическая модель асинхронного двигателя с переменными в произвольной системе координат на основе интегрирующих звеньев // Молодой ученый. — 2015. — №15. — С. 7-30.

10. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В. и др. - Пространственные векторы в асинхронном двигателе в относительной системе единиц // Молодой ученый. - 2015. - № 11. - С. 133-156.

11. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В. и др. - Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ в произвольной системе координат // Молодой ученый. - 2015. - № 14. - С.30-42.

12. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В. и др. - Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат с переменными $I_R - \Psi_m$ // Молодой ученый. — 2015. — № 13. — С. 9-18.

13. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В. и др. - Пространственные векторы в асинхронном двигателе в относительной системе единиц // Молодой ученый. - 2015. - № 11. - С. 133-156.

14. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В. и др. - Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ в произвольной системе координат // Молодой ученый. - 2015. - № 14. - С.5-8.

15. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В. и др. - Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ в произвольной системе координат на основе интегрирующих звеньев // Молодой ученый. — 2015. — № 15 (95). — С. 7-30.

16. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В. и др. - Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат с переменными $I_R - \Psi_m$ // Молодой ученый. — 2015. — № 14. — С. 20-31.

17. Емельянов А.А., Козлов А.М., Бесклеткин В.В., Авдеев А.С., Чернов М.В., Киряков Г.А., Габзалилов Э.Ф., Фуртиков К.А., Реутов А.Я.,

Королёв О.А. Пространственные векторы в асинхронном двигателе в относительной системе единиц // Молодой ученый. - 2015. - № 11. - С. 133-156.

18. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода [Текст]: учебник для вузов. 3-е издание / Н. Ф. Ильинский. Москва.: Изд. дом МЭИ, 2007. 224 с.

19. Ключев В. И. Теория электропривода [Текст]: учебник для вузов / В. И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.

20. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Пер. с нем. - М.Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 735 с.: ил.

21. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др. – Москва: Энергия, 1980. – 496 с.

22. Кравчик А.И. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник: - Москва: Энергоиздат, 1982. – 502 с.

23. Петрушин В. С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе [Текст]: учебное пособие / В. С. Петрушин. Одесса: Наука и техника, 2006. 320 с.

24. Сипайлов Г. А., Лоос А. В. Математическое моделирование электрических машин (АВМ):-Учебное пособие для студентов вузов. - Москва: Высшая школа, 1980. — 176 с.

25. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст]: учебник для студентов высших учебных заведений / Г. Г. Соколовский. Москва.: ИЦ «Академия», 2006. 272 с.

26. Справочник по автоматизированным электроприводам [Текст]: справочник / под редакцией В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.

27. Фираго Б. И. Теория электропривода [Текст]: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2004. 527 с.

28. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – Москва: ДМК Пресс; Санкт-Петербург, 2012. – 288 с.

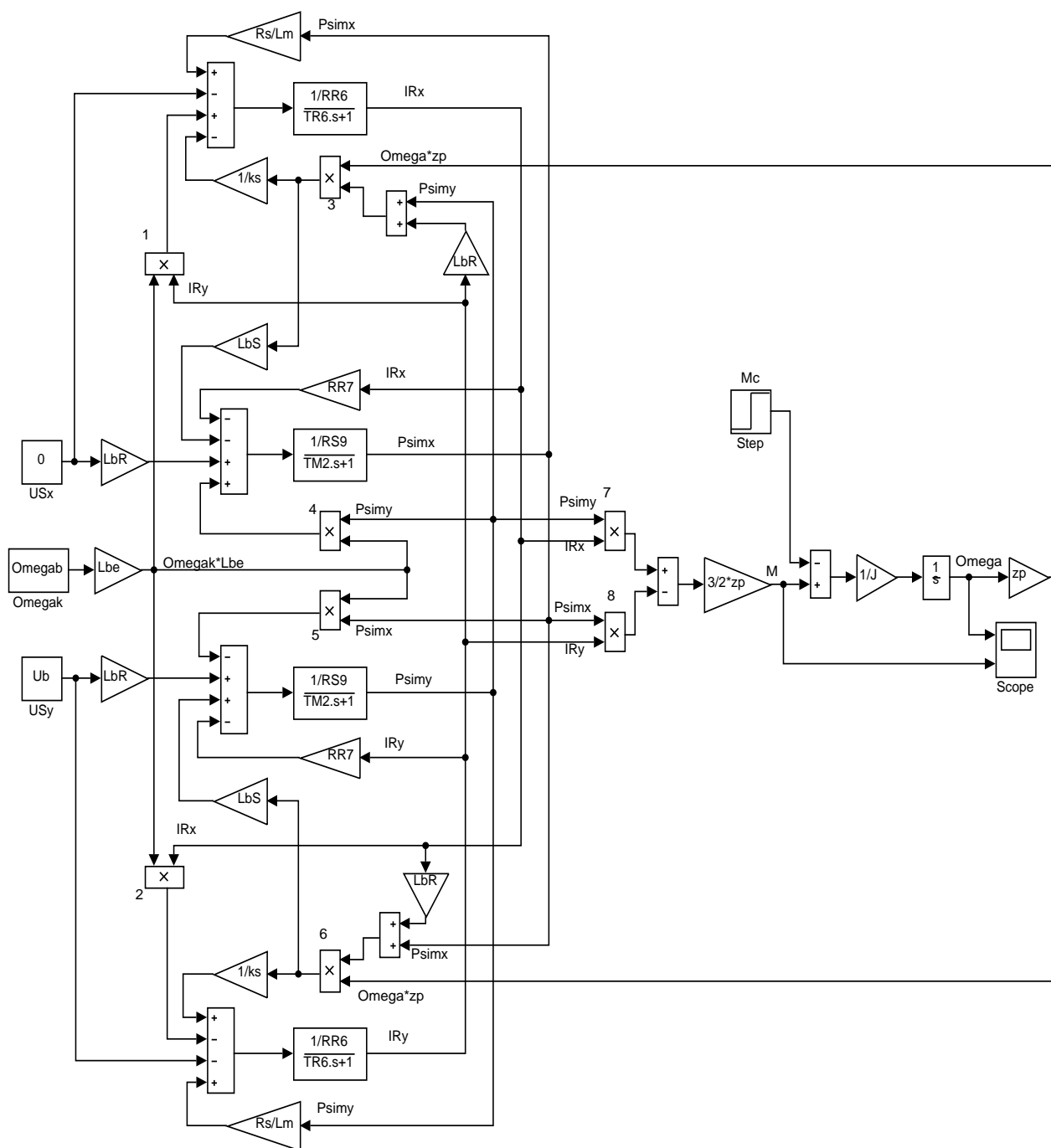
29. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода [Текст]: учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. 6-е издание, Москва: Энергоиздат, 1981. 576 с.

30. Шрейнер Р.Т. Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ: [монография] / Р.Т. Шрейнер, А.И. Калыгин, В.К. Кривовяз; под ред. Р.Т. Шрейнера; Рос. гос. проф.-пед. ун-т, Урал. отд-ние Рос. акад. образования. — Екатеринбург: Издательство РГПШУ, 2012. — 222 с. : ил.

31. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. - 654 с.

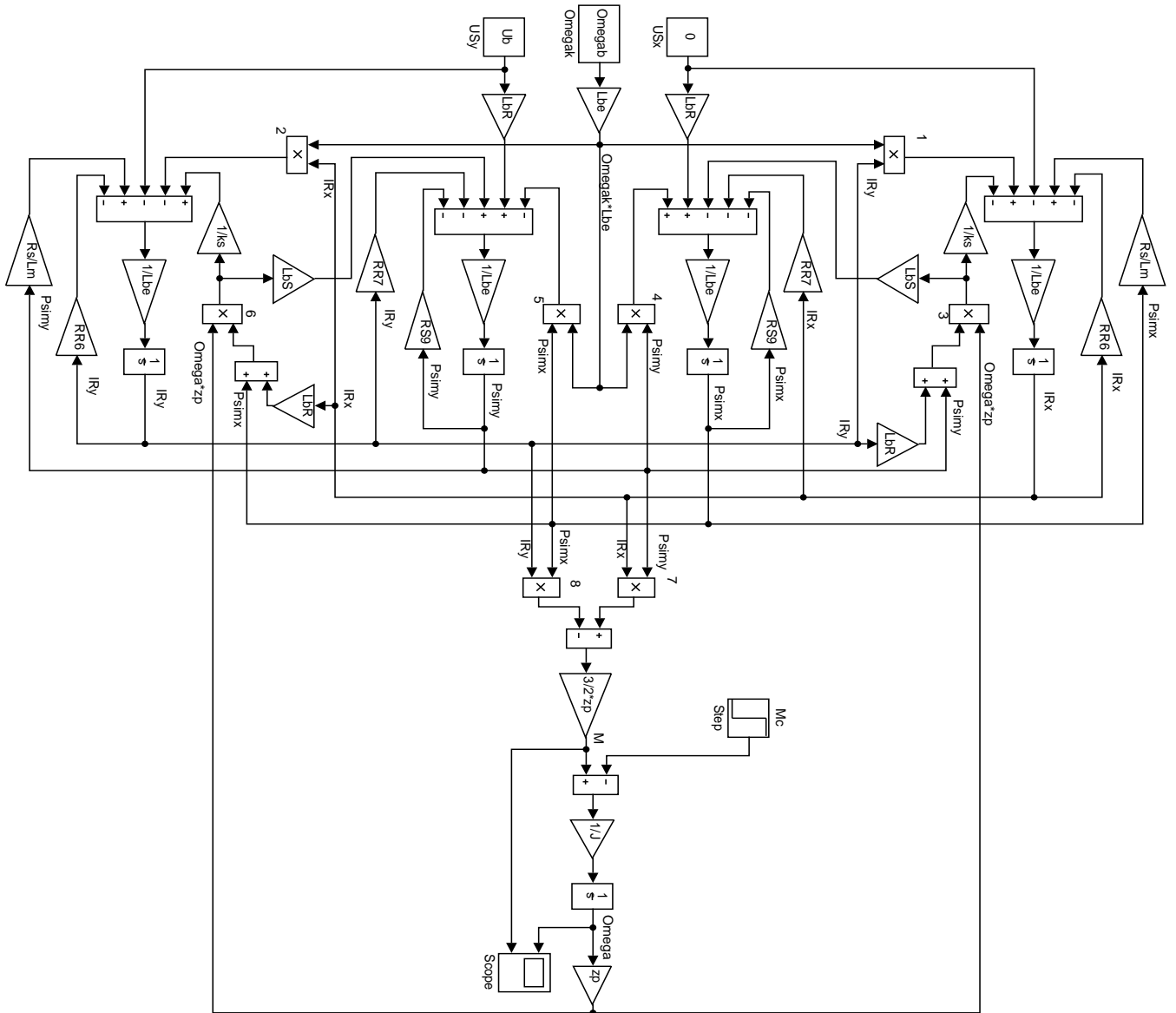
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Полная математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $I_R - \Psi_m$



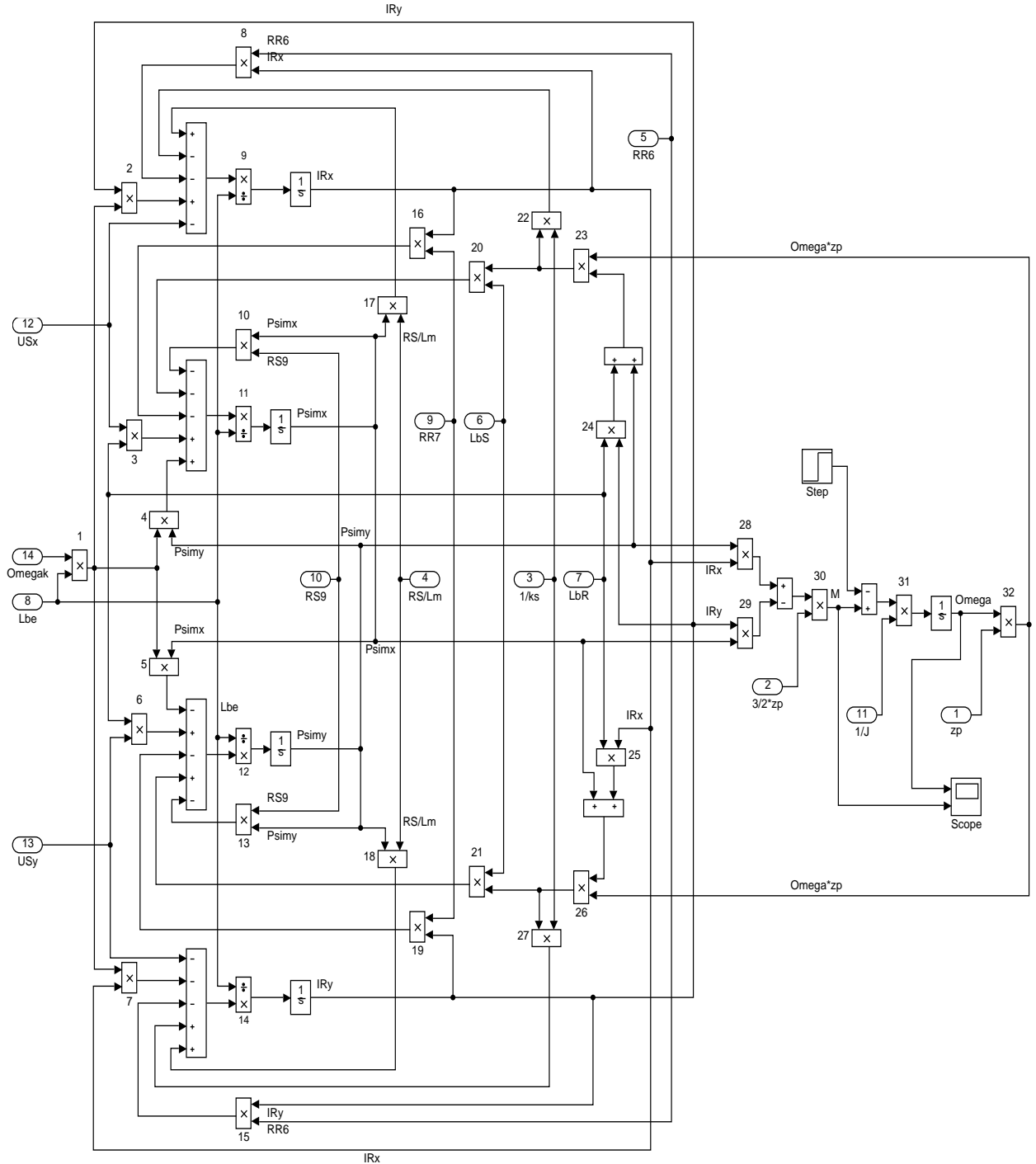
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Полная математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Модели асинхронного двигателя с переменными $I_R - \Psi_m$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Графики скорости и момента

