

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

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С
ПЕРЕМЕННЫМИ $\Psi_M - I_S$**

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: 548

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 $\Psi_M - I_s$**

Исполнитель:
студент группы ЗЭС-404С

_____ В.О. Одинцов

Руководитель:
доцент кафедры ЭТ

_____ А.А.Емельянов

Нормоконтролер:
старший преподаватель кафедры ЭТ

_____ Т.В.Лискова

Екатеринбург 2018

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 66 страницах, содержит 48 рисунков, 24 источников литературы, а также 4 приложения на 4 страницах.

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

Одинцов В. О. Разработка математической модели асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_s$ выпускная квалификационная работа / В. О. Одинцов; 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 $\Psi_m - I_s$ ». 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 $\Psi_m - I_s$ 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	7
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ $\Psi_m - I_s$	14
2.1 Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_s$ на выходе апериодических звеньев в simulink-script.....	14
2.2 Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_s$ на выходе интегрирующих звеньев в simulink-script	28
2.3 Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_s$ на выходе интегрирующих звеньев в simulink.....	35
3. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	59
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	63
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	63
ПРИЛОЖЕНИЕ В	65
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование — это идеальное научное знаковое формальное моделирование, при котором описание объекта осуществляется на языке математики, а исследование модели проводится с использованием тех или иных математических методов.

Особенностью математических моделей является то, что получение с их помощью каких-либо результатов связано с вычислениями. Так возникает необходимость понятия вычислительного эксперимента. Вычислительный эксперимент – это получение результатов с помощью математической модели для какого-либо конкретного случая исследований. Это может быть как единичный расчет одного параметра, так и комплекс расчетов целого спектра параметров модели во множестве определенным образом связанных условий.

Математические модели основываются на математическом описании объекта. В математическое описание, прежде всего, входят, и это естественно, взаимосвязи параметров объекта, что характеризует его особенности функционирования. Такие связи могут представляться в виде:

- вектор-функций $y = f(x,t)$,
- неявных функций $F(y,x,t) = 0$,
- обыкновенных дифференциальных уравнений $F(x,x',x'',\dots,x^{(m)},t) = 0$,
- дифференциальных уравнений с частными производными

$$F\left(y, z, t, \frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial y}{\partial t}, \dots\right) = 0$$

- вычислительного алгоритма,
- вероятностного (стохастического) описания.

В качестве дополнения к классификации *математические модели* в зависимости от природы объекта, решаемых задач и применяемых методов могут различаться следующими видами:

- расчетные (формулы, таблицы, алгоритмы, графики, номограммы);

- соответственные (например, модель в аэродинамической трубе и реальный полет самолета в атмосфере);
- подобные (одинаковые математические описания и пропорциональные соответствующие параметры);
- линейные или нелинейные (описываемые функциями, которые содержат основные параметры только в степени 0 и 1, или любыми видами функций),
- непрерывные или дискретные,
- детерминированные или стохастические (точные, однозначные или вероятностные: модели массового обслуживания, имитационные и др.),
- четкие или нечеткие (примеры нечетких множеств: около 10; глубоко или мелко; хорошо или плохо).

Понятие математических моделей объединяет чрезвычайно широкий круг моделей разнообразного вида.^[21]

Объектом исследования является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

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

Цель работы: разработать математическую модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_s$ 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

Понятие «математическое моделирование» в последние два-три десятилетия является едва ли не самым распространенным в научной литературе, по крайней мере в естественнонаучной и технической. Сегодня трудно представить себе проектную или конструкторскую организацию, не использующую в своей практике в той или иной мере математические модели. Все более распространенным и эффективным становится применение математического моделирования в научных исследованиях. ^[23]

Основные успехи в теории электрических машин на всех этапах истории были связаны с развитием математических моделей. первый этап развития теории электромеханического преобразования энергии был связан с уравнениями установившихся режимов. Основное достижение в теории электрических машин в последние десятилетия были достигнуты в создании математических моделей электромеханического преобразования энергии в динамических режимах. ^[24]

Современная методология проектирования электрических машин опирается на позиции системного подхода, согласно которому электрическая машина является элементом большой многосвязанной системы (электроэнергетической системы, либо системы электропривода). В этой связи задача строгого математического описания различных электрических машин в статике и, особенно, в динамике становится наиболее важной. Решение этой задачи связано с проведением большого объема теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов. В основе теоретических исследований переходных процессов электрических машин лежит метод математического моделирования.

Под «математической моделью» подразумевают условную замену исследуемого объекта или процесса и ее последующие изучение методами

вычислительной математики с привлечением средств современной вычислительной техники.

Поскольку такое изучение математической модели можно рассматривать как проведение эксперимента на ЭВМ при помощи вычислительно-логических алгоритмов, то в научно-технической литературе термин вычислительный эксперимент часто выступает как синоним термина «математическое моделирование».

Совершенство большинства технических устройств определяется главным образом эффективностью преобразования и перемещения ограниченного числа субстанций: энергии, импульса, электрического заряда, крутящего момента.

На пути реализации в технике наиболее перспективных научных открытий и разработок обычно стоят препятствия, связанные с отсутствием или ограниченными возможностями конструкционных или функциональных материалов и недостаточностью достигнутого технического уровня.

При изучении реально существующего или мыслимого технического объекта математические методы применяют к его математической модели. Это применение будет эффективным, если свойства математической модели удовлетворяют определенным требованиям.

Полнота позволяет отразить в достаточной мере именно те характеристики и особенности объекта исследования. Например, модель может достаточно полно описывать протекающие в объекте процессы, но не отражать его габаритные, массовые или технические показатели.

Точность дает возможность обеспечить приемлемое совпадение реальных и найденных при помощи математического моделирования значений выходных параметров.

Адекватность - это способность математической модели описывать выходные параметры объекта с относительной погрешностью не более некоторого заданного значения δ . В более общем смысле под адекватностью математической модели понимают правильное качественное и достаточно

точное количественное описание именно тех технических характеристик изучаемого объекта, которые важны в данном конкретном случае. Модель, адекватная при выборе одних характеристик, может быть неадекватной при выборе других характеристик того же технического объекта.

Устойчивость характеризует отношением к погрешностям исходных данных, способность нивелировать эти погрешности и не допускать их чрезмерного влияния на результат вычислительного эксперимента.

Продуктивность связана с возможностью располагать достаточно достоверными исходными данными. Если они являются результатом измерений, то точность их измерения должна быть выше, чем для тех параметров, которые получаются при использовании математического моделирования. В противном случае математическая модель будет непродуктивной и ее применение для анализа конкретного технического объекта теряет смысл.

Наглядность является ее желательным, но необязательным свойством. Тем не менее использование математического моделирования и ее модификация упрощается, если ее составляющие (например, отдельные члены уравнений) имеют ясный содержательный смысл.

Особенностями функциональных математических моделей является наличие или отсутствие среди ее параметров случайных величин. При наличии таких величин математическую модель называют *стохастической*, а при их отсутствии – детерминированной.

Далеко не все параметры реальных технических объектов можно характеризовать вполне определенными значениями. Поэтому математические модели таких технических объектов, строго говоря, следует отнести к стохастическим.

При математическом моделировании достаточно сложного технического объекта описать его поведение одной математической моделью, как правило, не удастся, а если такая математическая модель и была построена, то она оказалась бы слишком сложной для количественного анализа. Поэтому для

таких моделей обычно применяют принцип декомпозиции. Он состоит в условном разбиении модели на отдельные более простые блоки и элементы, допускающие их независимое исследование с последующим учетом взаимного влияния блоков и элементов друг на друга. В свою очередь, принцип декомпозиции можно применить и к каждому выделенному блоку вплоть до уровня достаточно простых элементов. В таком случае возникает иерархия математической модели связанных между собой блоков и элементов.

Среди функциональных математических моделей иерархические уровни отражают степень детализации описания процессов, протекающих в объекте, его блоках и элементах. С этой точки зрения обычно выделяют три основных уровня: микро, макро и мета уровень.

Математические модели микроуровня описывают процессы в системах с распределенными параметрами (континуальных системах), а математические модели макроуровня – в системах с сосредоточенными параметрами (в дискретных системах). В первых из них фазовые переменные могут зависеть как от времени, так и от пространственных координат, а во втором – только от времени.

Математическую модель микроуровня называют одномерной, двумерной или трехмерной, если искомые фазовые переменные зависят одной, двух или трех пространственных координат соответственно. Два последних типа объединяют в многоуровневые математические модели микроуровня.

Достаточно полные и адекватные реалистичным техническим объектам математические модели обычно оказываются нелинейными. Количественный анализ нелинейных математических моделей существенно сложнее, чем линейных математических моделей, и часто требует применения численных методов и вычислительной техники. Вместе с тем полезной является и информация качественного характера о поведении нелинейной математической модели, позволяющая получить предварительное представление об ожидаемых результатах более детального количественного анализа.

Среди причин, приводящих к необходимости рассматривать нелинейные математические модели, одной из основных является непосредственная зависимость значений внутренних параметров технического объекта от их внешних и выходных параметров. [23]

История развития электромеханики свидетельствует о существовании двух крайних подходов к теории электромеханического преобразования энергии: на базе теории поля и теории цепей. Теория поля развивается на основе уравнений Максвелла, а теория цепей – на основе уравнений Кирхгофа.

Третий наиболее прогрессивный подход к анализу процессов электромеханического преобразования энергии – комбинированный подход, сочетающий теории поля и цепей. Магнитное поле неотъемлемо от токов, его создающих, а токи не могут существовать без магнитного поля. Третий метод, объединяющий два фундаментальных метода, и составляет теоретическую основу, когда исходя из картины поля в воздушном зазоре электрического преобразователя, записывают уравнения напряжения, а через токи или потокосцепления выражаются уравнения электромагнитного момента.

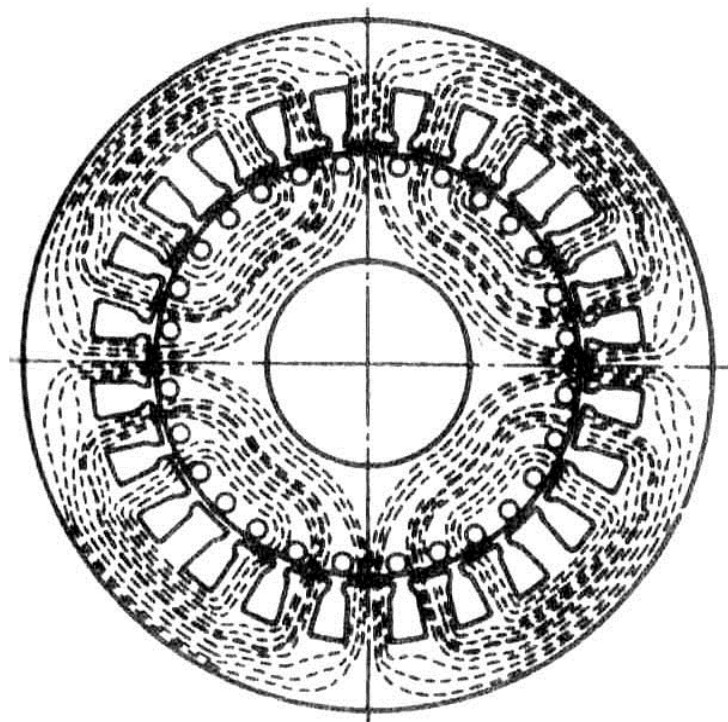


Рисунок 1 – Картина магнитного поля асинхронной машины

Электромеханическое преобразование энергии в индуктивных электрических машинах происходит в воздушном зазоре – пространстве, где сосредоточена энергия магнитного поля. Зная картину поля можно определить напряжение, токи, моменты, потери, электрические параметры электромагнитного преобразователя в установившемся и переходных процессах. Определить электромагнитное поле в любом, даже самом простом электромагнитном преобразователе – сложная задача, решить которую сложно даже с помощью вычислительной техники. Однако приближенное представление картины поля в воздушном зазоре дает достаточную точность решения для большинства задач электромеханики.

За последние десятилетия накоплено значительное число методов анализа и расчета электромагнитных полей. Отправной точкой для расчетов электромагнитного поля являются уравнения Максвелла, которые обычно приводятся в дифференциальной форме.

Идеальной или простейшей электрической машиной является машина с круговым полем в воздушном зазоре. Синусоидальное поле в воздушном зазоре электромеханического преобразователя может быть только в идеальной машине, когда в зазоре нет временных и пространственных гармоник.

В установившихся режимах электрические машины могут характеризовать три режима: номинальный режим, режим холостого хода, и короткого замыкания. Переходные процессы значительно разнообразнее и сложнее установившихся процессов, которые являются частным случаем переходных процессов.

Переходные процессы в электрических машинах происходят при изменении напряжений и частоты на выводах машины, а также нагрузки на валу, при включении машины и ее отключении от сети, реверсе, коротких замыканиях, при изменении ее параметров и т.п. в реальных условиях переходные процессы протекают при одновременном изменении нескольких факторов. Комбинации факторов, влияющих на динамику, могут быть весьма разнообразны (изменение напряжения, частоты и параметров, напряжения и

нагрузки и т.д.) поэтому при исследовании надо уметь выбрать «главное» и не усложнять, без необходимости задачу.

По важности и числу выполняемых работ переходные процессы делятся на процессы при пуске, торможении, реверсе, повторном включении и изменении нагрузки. Эти процессы могут протекать при симметричных и несимметричных напряжениях в симметричных и несимметричных машинах. Динамика асинхронных машин отлична от синхронных машин. Наличие коллектора или иного преобразователя частоты вносит соответствующую специфику.

Исследовать динамику электрической машины – значит ответить, как влияют параметры и изменения независимых переменных на переходные процессы, а также выбрать с учетом условий, в которых будет работать электрическая машина, оптимальные параметры и характер изменения независимых переменных. Переходные процессы столь многообразны, что полностью их изучить невозможно.

Параметрами электрических машин являются коэффициенты перед независимыми переменными в уравнениях электромеханического преобразования энергии. В зависимости от формы записи уравнений параметрами могут быть индуктивность, активное сопротивление, момент инерции и индуктивное сопротивление. Параметры машины определяют ее показатели: масса, КПД, $\cos \varphi$, ударные токи и моменты, а также стоимость и надежность.

Точность результатов вычислительного эксперимента определяется точностью задания начальных параметров. В переходных процессах, особенно при пуске, значения индуктивностей и активного сопротивления из-за насыщения значительно изменяется, поэтому нельзя подставлять значения параметров машины в установившемся режиме в дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ $\Psi_m - I_s$

2.1 Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_M - I_S$ на выходе аperiodических звеньев в Simulink-script

Векторные уравнения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором имеют следующий вид:

$$\begin{cases} U_S = R_S \cdot I_S + \frac{d\Psi_S}{dt} + j\Omega_K \cdot \Psi_S; \\ 0 = R_{R\kappa} \cdot I_R + \frac{d\Psi_R}{dt} + j(\Omega_K - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_R; \\ \Psi_S = (L_m + L_{\sigma S}) \cdot I_S + L_m \cdot I_R; \\ \Psi_R = (L_m + L_{\sigma R}) \cdot I_R + L_m \cdot I_S; \\ \Psi_m = L_m \cdot I_m = L_m \cdot (I_S + I_R); \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} \cdot I_{Sy} - \Psi_{my} \cdot I_{Sx}); \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}. \end{cases}$$

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

$$U_S = R_S \cdot I_S + \Psi_S \cdot s + j\Omega_K \cdot \Psi_S; \quad (1)$$

$$0 = R_{R\kappa} \cdot I_R + \Psi_R \cdot s + j(\Omega_K - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_R; \quad (2)$$

$$\Psi_S = \Psi_m + L_{\sigma S} \cdot I_S; \quad (3)$$

$$\Psi_R = \Psi_m + L_{\sigma R} \cdot I_R; \quad (4)$$

$$\Psi_m = L_m \cdot I_m = L_m \cdot (I_R + I_S); \quad (5)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{mx} \cdot I_{Sy} - \Psi_{my} \cdot I_{Sx}); \quad (6)$$

$$M - M_c = J \cdot \Omega \cdot s. \quad (7)$$

Обозначим токи, потокосцепления и индуктивности:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_m &= \dot{I}_S + \dot{I}_R; & \dot{\Psi}_m &= L_m \cdot \dot{I}_m; & \dot{\Psi}_{\sigma S} &= L_{\sigma S} \cdot \dot{I}_S; & \dot{\Psi}_{\sigma R} &= L_{\sigma R} \cdot \dot{I}_R; \\
\dot{\Psi}_S &= (L_m + L_{\sigma S}) \cdot \dot{I}_S + L_m \cdot \dot{I}_R = L_m \cdot (\dot{I}_S + \dot{I}_R) + L_{\sigma S} \cdot \dot{I}_S = \dot{\Psi}_m + \dot{\Psi}_{\sigma S}; \\
\dot{\Psi}_R &= (L_m + L_{\sigma R}) \cdot \dot{I}_R + L_m \cdot \dot{I}_S = L_m \cdot (\dot{I}_R + \dot{I}_S) + L_{\sigma R} \cdot \dot{I}_R = \dot{\Psi}_m + \dot{\Psi}_{\sigma R}; \\
L_S &= L_m + L_{\sigma S}; & L_R &= L_m + L_{\sigma R}.
\end{aligned}$$

Разложение векторных величин по проекциям:

$$\dot{U}_s = U_{sx} + jU_{sy};$$

$$\dot{I}_s = I_{sx} + jI_{sy};$$

$$\dot{I}_r = I_{rx} + jI_{ry};$$

$$\dot{\Psi}_s = \Psi_{sx} + j\Psi_{sy};$$

$$\dot{\Psi}_r = \Psi_{rx} + j\Psi_{ry}.$$

Схема замещения и векторная диаграмма переменных изображены на рисунках 2 и 3 [4].

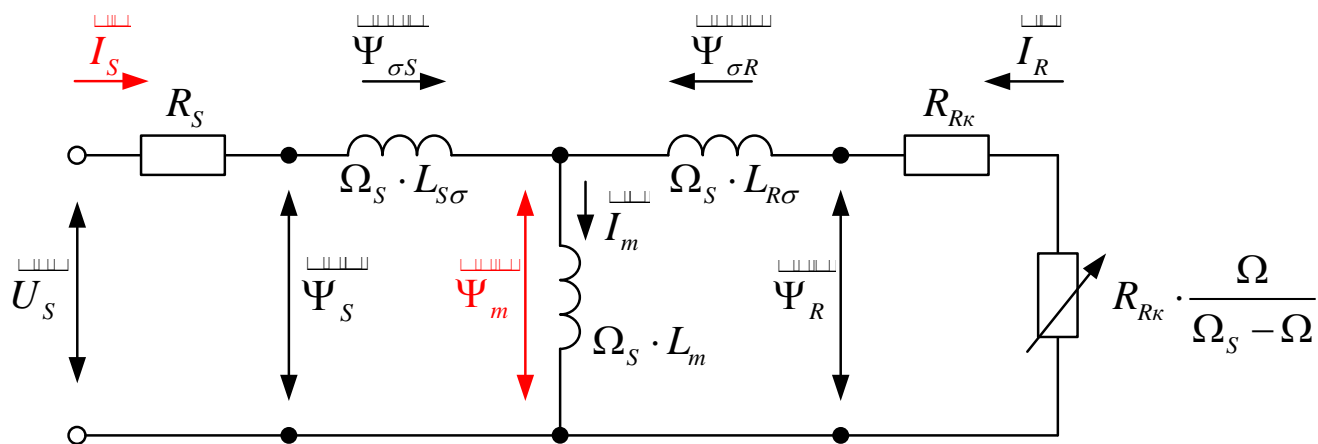


Рисунок 2 – Связь токов и потоковсцеплений в асинхронном двигателе

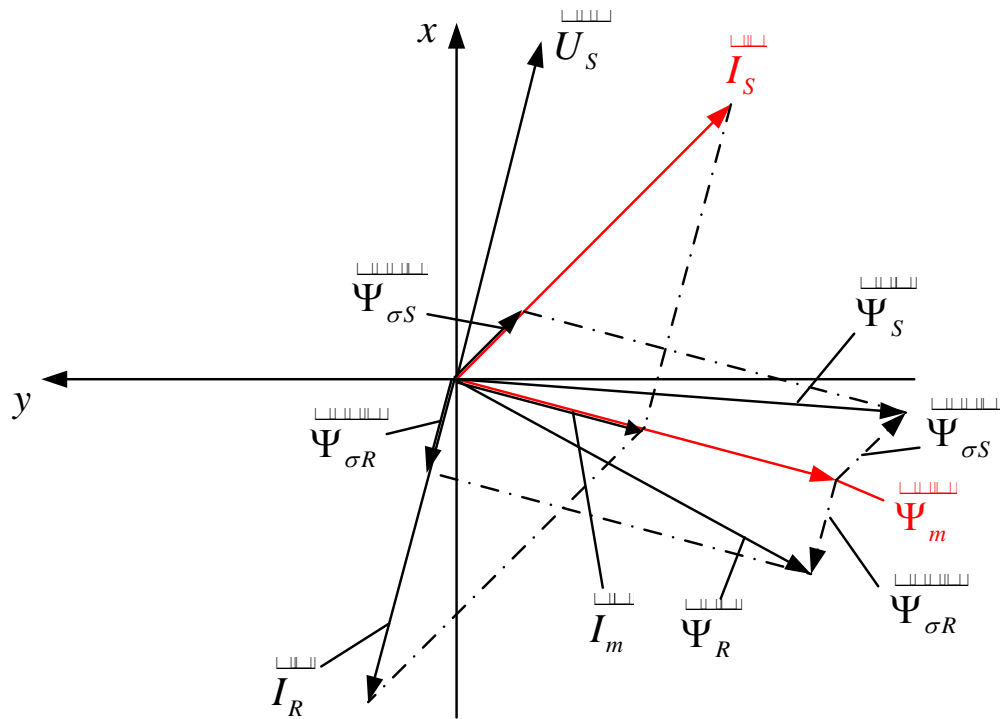


Рисунок 3 – Качественная картина расположения векторов в двигательном режиме асинхронного двигателя

Записываем уравнения по проекциям.

Уравнение (1):

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

Записываем уравнения (1), ..., (4) по проекциям.

Уравнение (1):

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

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

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

Уравнение (2):

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

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

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

Уравнение (3):

$$\Psi_{Sx} + j\Psi_{Sy} = \Psi_{mx} + j\Psi_{my} + L_{\sigma S} \cdot I_{Sx} + jL_{\sigma S} \cdot I_{Sy}.$$

$$\text{По оси (+1): } \Psi_{Sx} = \Psi_{mx} + L_{\sigma S} \cdot I_{Sx}. \quad (3')$$

$$\text{По оси (+j): } \Psi_{Sy} = \Psi_{my} + L_{\sigma S} \cdot I_{Sy}. \quad (3'')$$

Проекции потокосцепления Ψ_{Sx} и Ψ_{Sy} можно выразить и в следующей форме:

$$\Psi_{Sx} + j\Psi_{Sy} = (L_m + L_{\sigma S}) \cdot I_{Sx} + j(L_m + L_{\sigma S}) \cdot I_{Sy} + L_m \cdot I_{Rx} + jL_m \cdot I_{Ry};$$

$$\Psi_{Sx} = (L_m + L_{\sigma S}) \cdot I_{Sx} + L_m \cdot I_{Rx};$$

$$\Psi_{Sy} = (L_m + L_{\sigma S}) \cdot I_{Sy} + L_m \cdot I_{Ry}.$$

Уравнение (4):

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

$$\text{По оси (+1): } \Psi_{Rx} = \Psi_{mx} + L_{\sigma R} \cdot I_{Rx}. \quad (4')$$

$$\text{По оси (+j): } \Psi_{Ry} = \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot I_{Ry}. \quad (4'')$$

Проекции потокосцепления Ψ_{Rx} и Ψ_{Ry} можно выразить и в следующей форме:

$$\Psi_{Rx} + j\Psi_{Ry} = (L_m + L_{\sigma R}) \cdot I_{Rx} + j(L_m + L_{\sigma R}) \cdot I_{Ry} + L_m \cdot I_{Sx} + jL_m \cdot I_{Sy};$$

$$\Psi_{Rx} = (L_m + L_{\sigma R}) \cdot I_{Rx} + L_m \cdot I_{Sx};$$

$$\Psi_{Ry} = (L_m + L_{\sigma R}) \cdot I_{Ry} + L_m \cdot I_{Sy}.$$

Уравнение (5):

$$\Psi_{mx} + j\Psi_{my} = L_m \cdot I_{Sx} + jL_m \cdot I_{Sy} + L_m \cdot I_{Rx} + jL_m \cdot I_{Ry}.$$

$$\text{По оси (+1): } \Psi_{mx} = L_m \cdot I_{Sx} + L_m \cdot I_{Rx}. \quad (5')$$

$$\text{По оси (+j): } \Psi_{my} = L_m \cdot I_{Sy} + L_m \cdot I_{Ry}. \quad (5'')$$

Рассмотрим систему уравнений (1'), ..., (5') по оси (+1):

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

Из уравнения (5') выразим I_{Rx} :

$$I_{Rx} = \frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - I_{Sx}. \quad (6')$$

Подставим I_{Rx} в уравнение (4'):

$$\Psi_{Rx} = \Psi_{mx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sx} = \left(\frac{L_m + L_{\sigma R}}{L_m} \right) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sx}.$$

$$\text{Обозначим } k_r = \frac{l_m}{l_m + l_{\sigma r}} = \frac{L_m}{L_m + L_{\sigma R}}:$$

$$\Psi_{Rx} = \frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sx}. \quad (7')$$

Рассмотрим систему уравнений (1''), ..., (5'') по оси (+j):

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

Из уравнения (5'') выразим I_{Ry} :

$$I_{Ry} = \frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{my} - I_{Sy}. \quad (6'')$$

Подставим I_{Ry} в уравнение (4''):

$$\Psi_{Ry} = \Psi_{my} + \frac{L_{\sigma R}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sy} = \left(\frac{L_m + L_{\sigma R}}{L_m} \right) \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sy};$$

$$\Psi_{Ry} = \frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sy}. \quad (7'')$$

Для уравнений (1') и (2') по оси (+1):

$$\begin{cases} U_{Sx} = R_S \cdot I_{Sx} + \Psi_{Sx} \cdot s - \Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{Sy}; \\ 0 = R_{R\kappa} \cdot I_{Rx} + \Psi_{Rx} \cdot s - (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Ry}. \end{cases}$$

В первое уравнение подставим Ψ_{Sx} и Ψ_{Sy} из выражений (3') и (3''):

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

$$U_{Sx} = R_S \cdot I_{Sx} + (\Psi_{mx} \cdot s) + L_{\sigma S} \cdot (I_{Sx} \cdot s) - \Omega_\kappa \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Sy}). \quad (8)$$

Из уравнения (8) выделим $(\Psi_{mx} \cdot s)$:

$$(\Psi_{mx} \cdot s) = U_{Sx} - R_S \cdot I_{Sx} - L_{\sigma S} \cdot (I_{Sx} \cdot s) + \Omega_\kappa \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Sy}). \quad (8')$$

Подставим в уравнение (2') выражения I_{Rx} , Ψ_{Rx} и Ψ_{Ry} из уравнений (6'), (7') и (7''):

$$0 = R_{Rk} \cdot \left(\frac{1}{L_{\sigma R}} \cdot \Psi_{mx} - I_{Sx} \right) + \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sx} \right) \cdot s - (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sy} \right);$$

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{Rk} \cdot I_{Sx} + \frac{1}{k_r} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) - L_{\sigma R} \cdot (I_{Sx} \cdot s) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} +$$

$$+ L_{\sigma R} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

Затем внесем в полученное уравнение выражение $(\Psi_{mx} \cdot s)$ из (8'):

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{Rk} \cdot I_{Sx} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sx} - \frac{1}{k_r} \cdot R_S \cdot I_{Sx} - \frac{1}{k_r} \cdot L_{\sigma S} \cdot (I_{Sx} \cdot s) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{my}) +$$

$$+ \frac{1}{k_r} \cdot L_{\sigma S} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Sy}) - L_{\sigma R} \cdot (I_{Sx} \cdot s) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{my}) + \frac{1}{k_r} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy};$$

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - \left(R_{Rk} + \frac{1}{k_r} \cdot R_S \right) \cdot I_{Sx} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sx} - \left(L_{\sigma R} + \frac{1}{k_r} \cdot L_{\sigma S} \right) \cdot (I_{Sx} \cdot s) + \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Sy}) +$$

$$+ \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}. \quad (9)$$

Перенесем в левую часть слагаемые с I_{Sx} :

$$\left[\frac{k_r \cdot L_{\sigma R} + L_{\sigma S}}{k_r} \cdot s + \frac{k_r \cdot R_{Rk} + R_S}{k_r} \right] \cdot I_{Sx} = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sx} + \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Sy}) + \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) +$$

$$+ L_{\sigma R} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

Обозначим:

$$L_\vartheta = L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R};$$

$$R_{S1} = R_S + k_r \cdot R_{Rk};$$

$$T_{S1} = \frac{L_\vartheta}{R_{S1}}.$$

Умножим обе части полученного уравнения на k_r :

$$[L_s \cdot s + R_{S1}] \cdot I_{Sx} = \frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + U_{Sx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

В левой части вынесем за скобку R_{S1} :

$$R_{S1} \cdot [T_{S1} \cdot s + 1] \cdot I_{Sx} = \frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + U_{Sx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

Отсюда определим I_{Sx} :

$$I_{Sx} = \left[\frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + U_{Sx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy} \right] \cdot \frac{1/R_{S1}}{T_{S1} \cdot s + 1}.$$

Структурная схема проекции статорного тока I_{Sx} на ось (+1) приведена на рисунке 4.

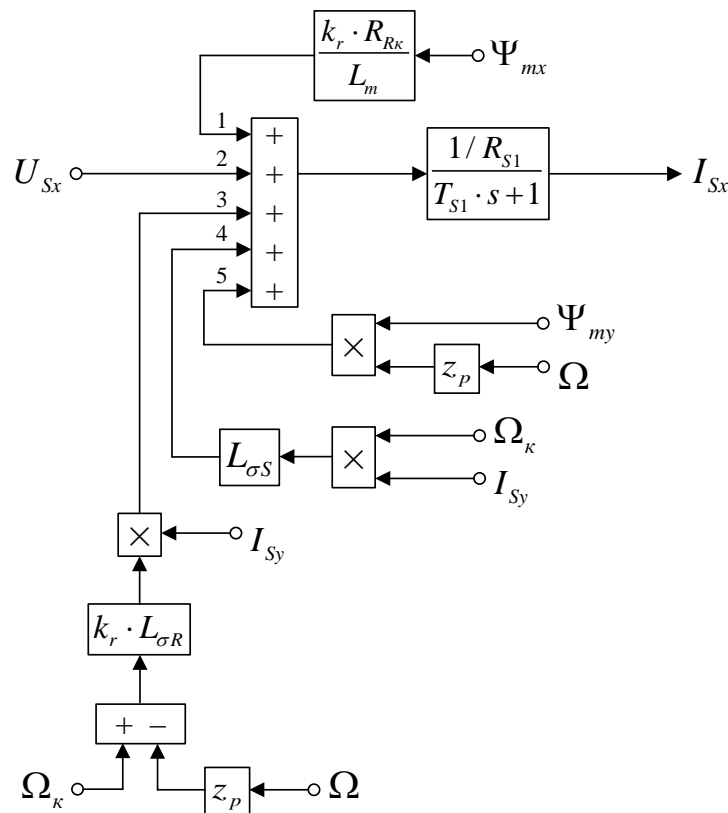


Рисунок 4 - Структурная схема проекции статорного тока I_{Sx} на ось (+1)

Для уравнений (1'') и (2'') по оси (+j):

$$U_{Sy} = R_S \cdot I_{Sy} + \Psi_{Sy} \cdot s + \Omega_k \cdot \Psi_{Sx};$$

$$0 = R_{Rk} \cdot I_{Ry} + \Psi_{Ry} \cdot s + (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{Rx}.$$

В первое уравнение подставим Ψ_{Sy} и Ψ_{Sx} из выражений (3'') и (3'):

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

$$U_{Sy} = R_S \cdot I_{Sy} + (\Psi_{my} \cdot s) + L_{\sigma S} \cdot (I_{Sy} \cdot s) + \Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}). \quad (10)$$

Из уравнения (10) выделим $(\Psi_{my} \cdot s)$:

$$(\Psi_{my} \cdot s) = U_{Sy} - R_S \cdot I_{Sy} - L_{\sigma S} \cdot (I_{Sy} \cdot s) - \Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}). \quad (10')$$

Подставим в уравнение (2'') выражения I_{Ry} , Ψ_{Ry} и Ψ_{Rx} из уравнений (6''), (7'') и (7')

$$0 = R_{Rk} \cdot \left(\frac{1}{L_m} \cdot \Psi_{my} - I_{Sy} \right) + \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sy} \right) \cdot s + (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sx} \right).$$

Внесем в полученное уравнение выражение $(\Psi_{my} \cdot s)$ из (10')

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - R_{Rk} \cdot I_{Sy} + \frac{1}{k_r} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) - L_{\sigma R} \cdot (I_{Sy} \cdot s) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) - \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - \\ &- L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx}; \\ 0 &= \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - R_{Rk} \cdot I_{Sy} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sy} - \frac{R_S}{k_r} \cdot I_{Sy} - \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (I_{Sy} \cdot s) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) - \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) - \\ &- L_{\sigma R} \cdot (I_{Sy} \cdot s) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) - \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx}; \\ 0 &= \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - \left(\frac{R_{Rk} \cdot k_r + R_S}{k_r} \right) \cdot I_{Sy} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sy} - \left(\frac{L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \cdot k_r}{k_r} \right) \cdot (I_{Sy} \cdot s) - \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) - \\ &- \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx}. \end{aligned} \quad (11)$$

Перенесем в левую часть слагаемые с I_{Sy} и умножим обе части на k_r :

$$\left[\left(\frac{L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \cdot k_r}{L_{\sigma S}} \right) \cdot s + \left(\frac{R_{Rk} \cdot k_r + R_S}{R_{S1}} \right) \right] \cdot I_{Sy} = \frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{my} + U_{Sy} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) - z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx};$$

$$R_{S1} \cdot \left[\left(\frac{L_{\sigma S}}{R_{S1}} \right) \cdot s + 1 \right] \cdot I_{Sy} = \frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{my} + U_{Sy} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) - z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx}.$$

Отсюда ток I_{Sy} :

$$I_{Sy} = \left[\frac{k_r \cdot R_{Rk} \cdot \Psi_{my}}{1 \cdot \frac{L_{\sigma R}}{L_m} \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3} + \frac{U_{Sy}}{4} + \frac{L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx})}{2 \cdot 4 \cdot 3} - \frac{z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx})}{1 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3} - \frac{k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx}}{1 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3} \right] \cdot \frac{1/R_{S1}}{T_{S1} \cdot s + 1}$$

Структурная схема для реализации I_{Sy} приведена на рисунке 5.

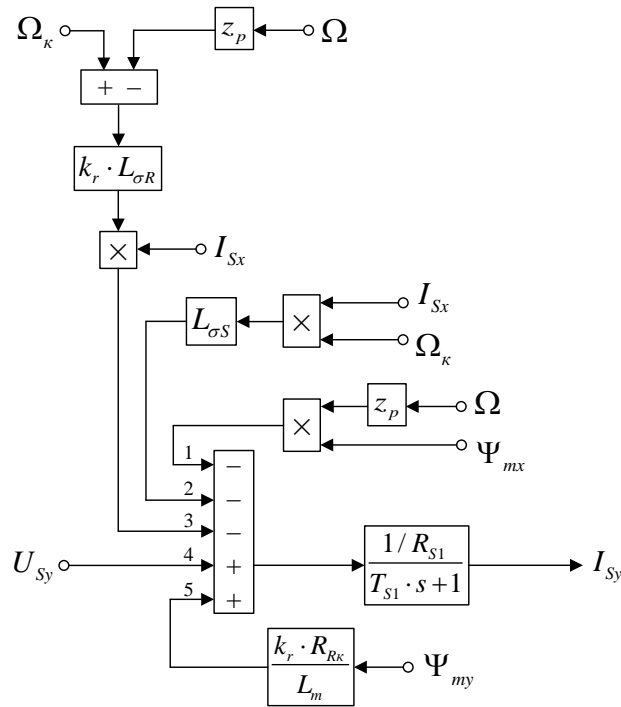


Рисунок 5 - Структурная схема для определения проекции статорного тока I_{Sy} на ось (+j)

Из уравнения (8) по оси (+1) выразим $\left(\frac{1}{\Omega_{\delta}} \cdot s \cdot i_{sx} \right)$:

$$\left(\frac{1}{\Omega_{\delta}} \cdot s \cdot i_{sx} \right) = \frac{1}{l_{\sigma s}} \cdot u_{sx} - \frac{r_s}{l_{\sigma s}} \cdot i_{sx} - \frac{1}{l_{\sigma s}} \cdot \left(\frac{1}{\Omega_{\delta}} \cdot s \cdot \Psi_{mx} \right) + \frac{1}{l_{\sigma s}} \cdot (\omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + (\omega_{\kappa} \cdot i_{sy}). \quad (12)$$

Подставим в уравнение (2') выражения I_{Rx} , Ψ_{Rx} , Ψ_{Ry} и $(I_{Sx} \cdot s)$ из уравнений (6'), (7'), (7'') и (12):

$$0 = R_{Rk} \cdot \left(\frac{1}{L_{\sigma R}} \cdot \Psi_{mx} - I_{Sx} \right) + \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sx} \right) \cdot s - (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sy} \right);$$

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{Rk} \cdot I_{Sx} + \frac{1}{k_r} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{R_s \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) -$$

$$- \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sy}) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sy}) - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}). \quad (13)$$

Перенесем в левую часть слагаемые с Ψ_{mx} :

$$\left[\left(\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \right) \cdot s + \frac{R_{R\kappa}}{L_m} \right] \cdot \Psi_{mx} = R_{R\kappa} \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{my}) +$$

$$+ \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}).$$

В левой части вынесем за скобки $\frac{R_{R\kappa}}{L_m}$:

$$\frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \left[\left(\frac{L_m \cdot (L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R})}{R_{R\kappa} \cdot k_r \cdot L_{\sigma S}} \right) \cdot s + 1 \right] \cdot \Psi_{mx} = \left(R_{R\kappa} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \right) \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{my}) +$$

$$+ \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}).$$

Обозначим:

$$T_{M1} = \frac{L_m \cdot (L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R})}{R_{R\kappa} \cdot k_r \cdot L_{\sigma S}} \text{ и } \Delta R = R_{R\kappa} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}}.$$

Потокосцепление Ψ_{mx} определится следующим образом:

$$\Psi_{mx} = \left[\frac{\Delta R \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{my}) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy})}{T_{M1} \cdot s + 1} \right] \cdot \frac{L_m / R_{R\kappa}}{T_{M1} \cdot s + 1}.$$

Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx} приведена на рисунке 6.

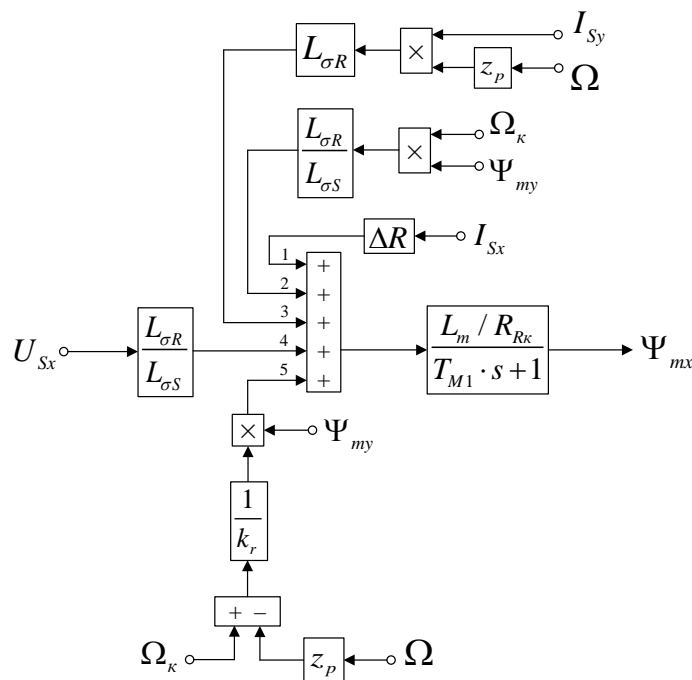


Рисунок 6 - Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx}

Определение потокосцепления Ψ_{my} .

Из уравнения (10) выделим $(I_{Sy} \cdot s)$:

$$(I_{Sy} \cdot s) = \frac{1}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{R_S}{L_{\sigma S}} \cdot I_{Sy} - \frac{1}{L_{\sigma S}} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) - \frac{1}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) - (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}). \quad (14)$$

Подставим в уравнение (2'') выражения I_{Ry} , Ψ_{Ry} , Ψ_{Rx} и $(I_{Sy} \cdot s)$ из уравнений (6''), (7''), (7') и (14):

$$0 = R_{Rk} \cdot \left(\frac{1}{L_{\sigma S}} \cdot \Psi_{my} - I_{Sy} \right) + \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{my} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sy} \right) \cdot s + (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \left(\frac{1}{k_r} \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot I_{Sx} \right);$$

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - R_{Rk} \cdot I_{Sy} + \frac{1}{k_r} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} + \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot I_{Sy} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) +$$

$$+ \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) +$$

$$+ L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}). \quad (15)$$

Перенесем в левую часть слагаемые с Ψ_{my} :

$$\left[\left(\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \right) \cdot s + \frac{R_{Rk}}{L_m} \right] \cdot \Psi_{my} = \left(R_{Rk} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \right) \cdot I_{Sy} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) -$$

$$- \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}).$$

В левой части вынесем за скобки $\frac{R_{Rk}}{L_m}$:

$$\frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \left[\left(\frac{L_m \cdot (L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R})}{R_{Rk} \cdot k_r \cdot L_{\sigma S}} \right) \cdot s + 1 \right] \cdot \Psi_{my} = \Delta R \cdot I_{Sy} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) -$$

$$- \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}).$$

Определим потокосцепление Ψ_{my} :

$$\Psi_{my} = \left[\frac{\Delta R \cdot I_{Sy}}{R_{Rk}} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}) \right] \cdot \frac{L_m / R_{Rk}}{T_{M1} \cdot s + 1}.$$

Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my} приведена на рисунке 7.

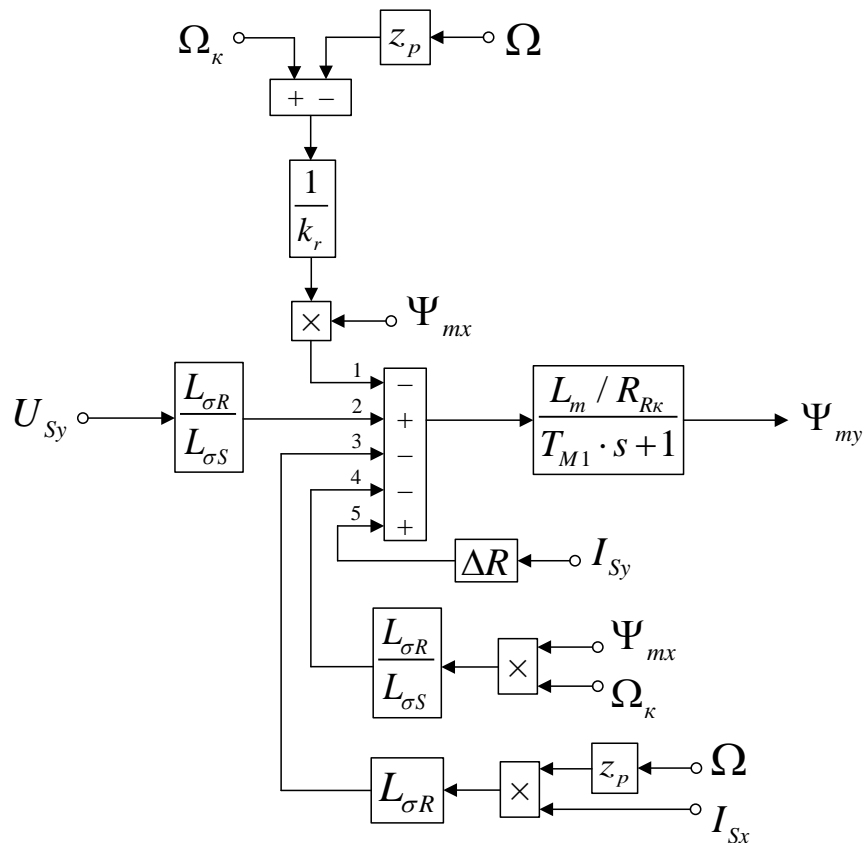


Рисунок 7 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my}

На рисунке 8 представлена структурная схема для реализации уравнения электромагнитного момента (6):

$$m = \zeta_N \cdot (\psi_{sx} \cdot i_{sy} - \psi_{sy} \cdot i_{sx}).$$

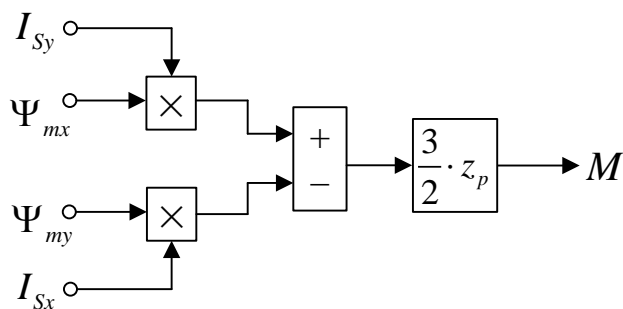


Рисунок 8 - Математическая модель определения электромагнитного момента M

Наконец, из уравнения движения (7) выразим механическую угловую скорость вращения вала двигателя (рисунок 9):

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

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

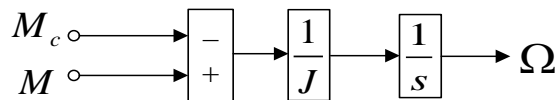


Рисунок 9 - Математическая модель уравнения движения

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе аperiodических звеньев в системе абсолютных единиц приведена на рисунке 10.

Расчет параметров производим в Script:

```

PN=320000;      J=28;      betaN=(Omega0N-OmegaN)/Omega0N;
UsN=380;        Ub=sqrt(2)*UsN;  kr=lm/(lm+lbr);
IsN=324;        Ib=sqrt(2)*IsN;  lbe=lbs+lbr+lbs*lbr*lm^(-1);
fN=50;          OmegasN=2*pi*fN;  roN=0.9962;
Omega0N=104.7;  Omegab=OmegasN;  rrk=roN*betaN;
OmegaN=102.83;  Zb=Ub/Ib;        RRk=rrk*Zb;
nN=0.944;       Psib=Ub/Omegab;  RS1=Rs+kr*RRk;
cos_phiN=0.92;  Lb=Psib/Ib;       LbS=lbs*Lb;
zp=3;          rs=Rs/Zb;        LbR=lbr*Lb;
Rs=0.0178;     lbs=Xs/Zb;       Le=LbS+kr*LbR;
Xs=0.118;     rr=Rr/Zb;       TS1=Le/RS1;
Rr=0.0194;    lbr=Xr/Zb;     dR=RRk-Rs*LbR/LbS;
Xr=0.123;     lm=Xm/Zb;      TM1=Lm*(LbS+kr*LbR)/(RRk*kr*LbS);
Xm=4.552;     Lm=lms*Lb;

```

Рисунок 10 – Расчетные параметры математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе аperiodических звеньев в системе абсолютных единиц

Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе аperiodических звеньев в системе абсолютных единиц приведена в приложении Б

Числовые значения параметров выводятся в окне Workspace рисунке - 11.

Name	Value
betaN	0.0179
cos_phiN	0.9200
dR	0.0023
fN	50
Ib	458.2052
IsN	324
J	28
kr	0.9737
Lb	0.0037
lbe	0.2082
lbr	0.1049
LbR	3.9152e-04
lbs	0.1006
LbS	3.7561e-04
Le	7.5683e-04
lm	3.8812
Lm	0.0145
nN	0.9440
Omega0N	104.7000
OmegasN	314.1593
OmegaN	102.8300

Name	Value
OmegasN	314.1593
PN	320000
Psib	1.7106
roN	0.9962
rr	0.0165
Rr	0.0194
rrk	0.0178
RRk	0.0209
rs	0.0152
Rs	0.0178
RS1	0.0381
TM1	1.4369
tout	704x1 double
TS1	0.0199
Ub	537.4012
UsN	380
Xm	4.5520
Xr	0.1230
Xs	0.1180
Zb	1.1728
zp	3

Рисунок 11 - Числовые значения параметров в окне Workspace

Результаты моделирования асинхронного двигателя представлены на рисунке 12.

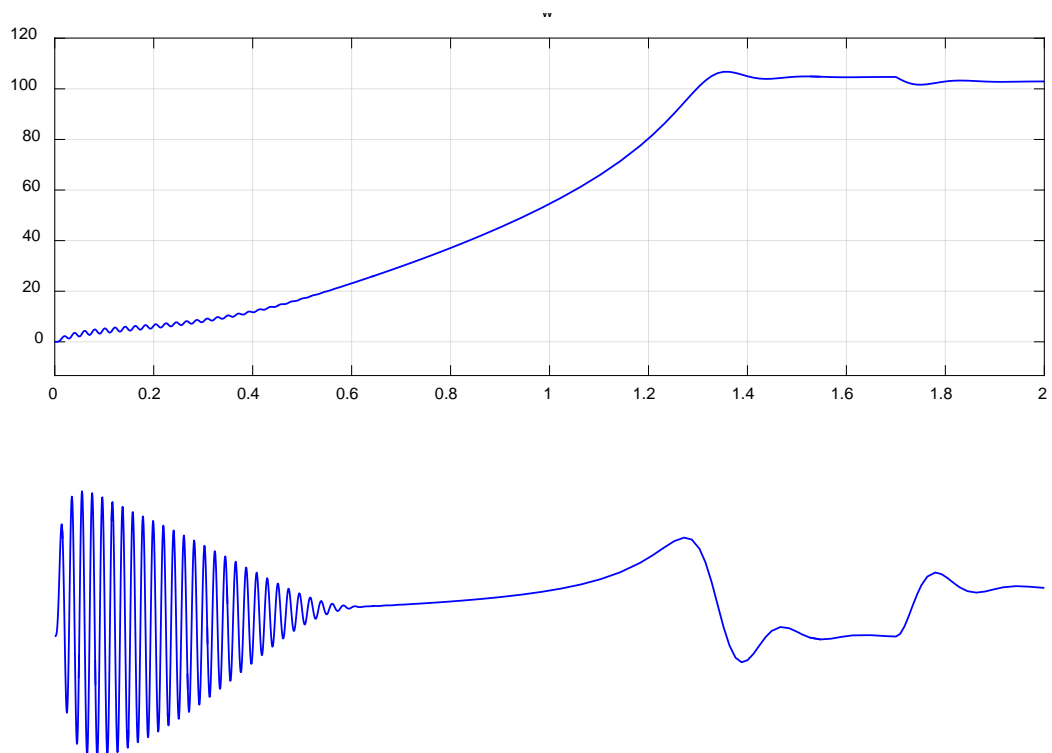


Рисунок 12 - Графики скорости и момента

2.2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ $\Psi_m - I_s$ НА ВЫХОДЕ ИНТЕГРИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ В SIMULINK-SCRIPT

Во втором разделе нашей работы проекции вектора \dot{I}_s и $\ddot{\Psi}_m$ были получены на выходе аperiodических звеньев. В этом разделе проекции векторов $\ddot{\Psi}_m$ и \dot{I}_s выведем на основе интегрирующих звеньев.

Приведем уравнение, связывающее векторы \dot{U}_s и \dot{I}_s по проекции (+1) [5]:

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - \left(R_{Rk} + \frac{1}{k_r} \cdot R_S \right) \cdot I_{Sx} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sx} - \left(L_{\sigma R} + \frac{1}{k_r} \cdot L_{\sigma S} \right) \cdot (I_{Sx} \cdot s) + \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

Перенесем в левую часть $\left(L_{\sigma R} + \frac{1}{k_r} \cdot L_{\sigma S} \right) \cdot (I_{Sx} \cdot s)$:

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

Обозначим $L_3 = L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R}$ и $R_{S1} = R_S + k_r \cdot R_{Rk}$.

Умножим обе части полученного уравнения на k_r :

$$L_3 \cdot I_{Sx} \cdot s = \frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{S1} \cdot I_{Sx} + U_{Sx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

Тогда ток I_{Sx} определится в следующем виде:

$$I_{Sx} = \left[\frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{S1} \cdot I_{Sx} + U_{Sx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy} \right] \cdot \frac{1}{L_3} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для реализации уравнения дана на рисунке 13.

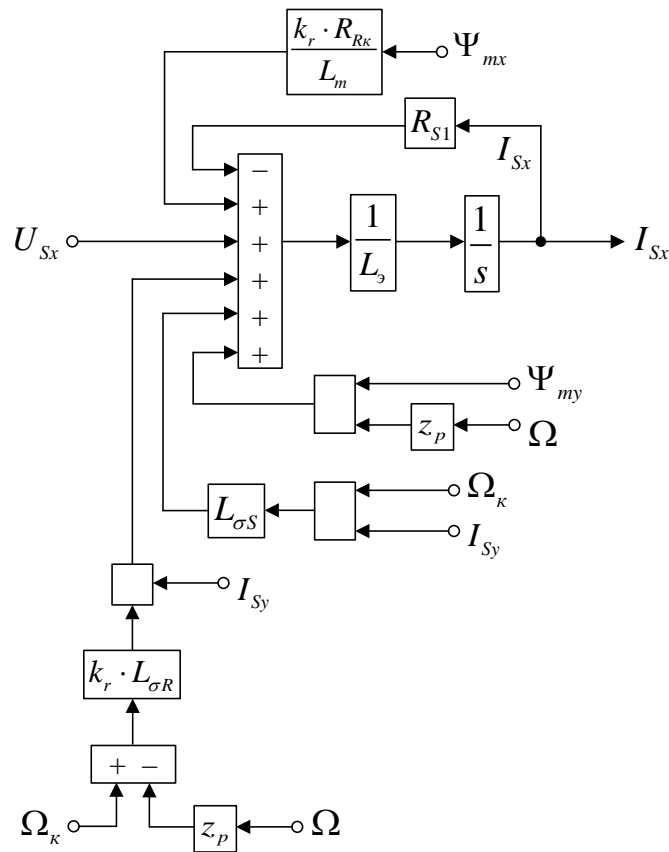


Рисунок 13 – Структурная схема проекции статорного тока I_{Sx} на ось (+1)

Аналогично, приведем уравнение (11) из работы [1].

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - \left(\frac{R_{Rk} \cdot k_r + R_S}{k_r} \right) \cdot I_{Sy} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sy} - \left(\frac{L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \cdot k_r}{k_r} \right) \cdot (I_{Sy} \cdot s) - \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sx}) - \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx}.$$

Перенесем в левую часть $\left(\frac{L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \cdot k_r}{k_r} \right) \cdot (I_{Sy} \cdot s)$ и умножим обе части на k_r :

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

Отсюда определим ток I_{Sy} :

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

Структурная схема проекции статорного тока I_{Sy} на ось +j приведена на рисунке 14.

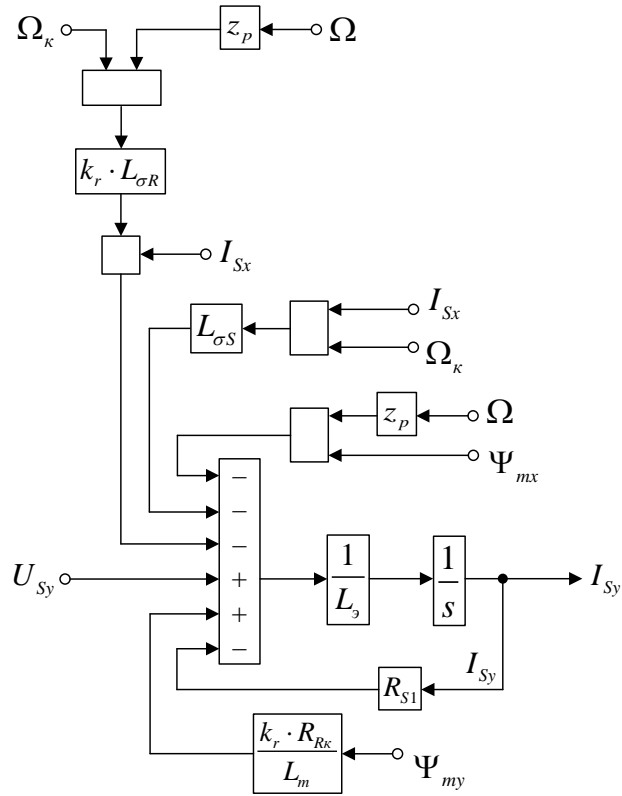


Рисунок 14 – Структурная схема для определения проекции статорного тока I_{Sy} на ось (+j)

Определим потокосцепление ψ_{mx} по оси (+1) из уравнения (13):

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

Перенесем в левую часть $\left(\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}}\right) \cdot \Psi_{mx} \cdot s$:

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

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

Обозначим:

$$\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} = \frac{L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R}}{k_r \cdot L_{\sigma S}} = \frac{L_3}{k_r \cdot L_{\sigma S}};$$

$$R_{R\kappa} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} = \Delta R.$$

$$\frac{L_3}{k_r \cdot L_{\sigma S}} \cdot \Psi_{mx} \cdot s = -\frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + \Delta R \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}).$$

Тогда потокосцепление Ψ_{mx} определится следующим образом:

$$\Psi_{mx} = \left[-\frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + \Delta R \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}) \right] \cdot \frac{k_r \cdot L_{\sigma S}}{L_3} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема проекции потокосцепления ψ_{mx} на ось +1 приведена на рисунке 15.

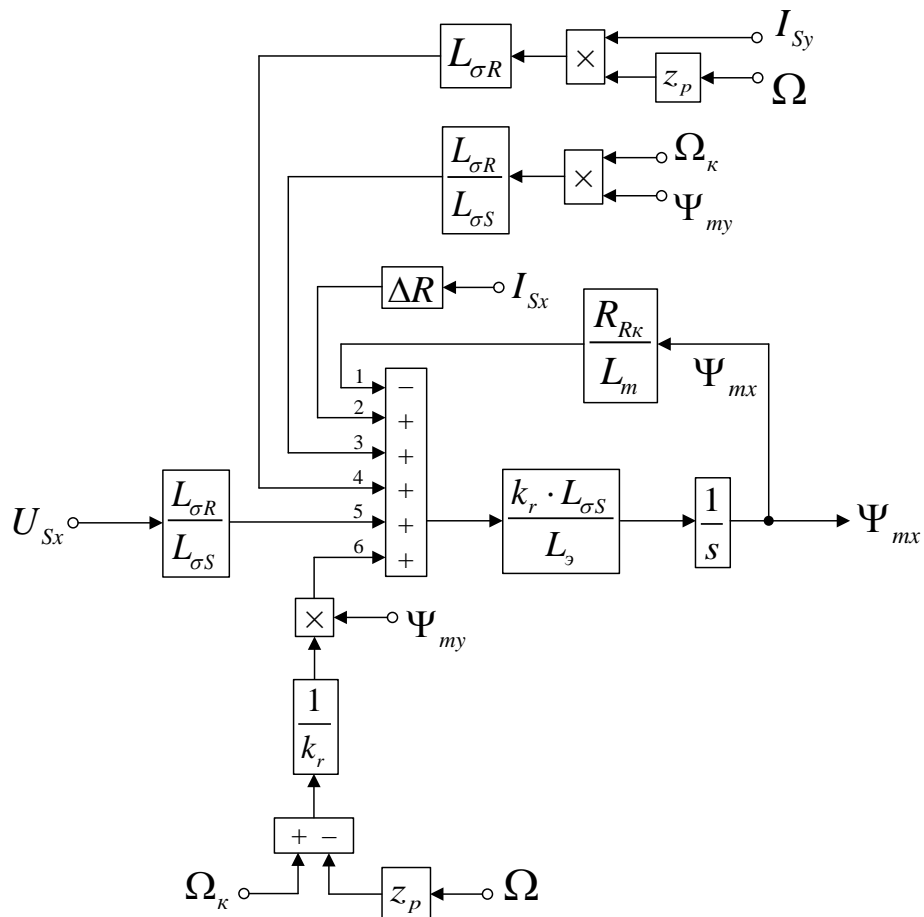


Рисунок 15 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx}

Определим потокосцепление Ψ_{my} по оси (+j) из уравнения (15) работы [1]:

$$0 = \frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - R_{R\kappa} \cdot I_{Sy} + \frac{1}{k_r} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} + \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot I_{Sy} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Psi_{my} \cdot s) +$$

$$+ \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Sx}) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_\kappa \cdot I_{Sx}) + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}).$$

Перенесем в левую часть $\left(\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}}\right) \cdot \Psi_{my} \cdot s$:

$$\left(\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}}\right) \cdot \Psi_{my} \cdot s = -\frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{my} + \left(R_{R\kappa} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}}\right) \cdot I_{Sy} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) -$$

$$L_s / (k_r \cdot L_{\sigma S})$$

$$-\frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}).$$

Потокосцепление Ψ_{my} определится следующим образом:

$$\Psi_{my} = \left[-\frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{my} + \frac{\Delta R}{L_s} \cdot I_{Sy} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_\kappa \cdot \Psi_{mx}) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_\kappa - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - \right.$$

$$\left. - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}) \right] \cdot \frac{k_r \cdot L_{\sigma S}}{L_s} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my} приведена на рисунке 16.

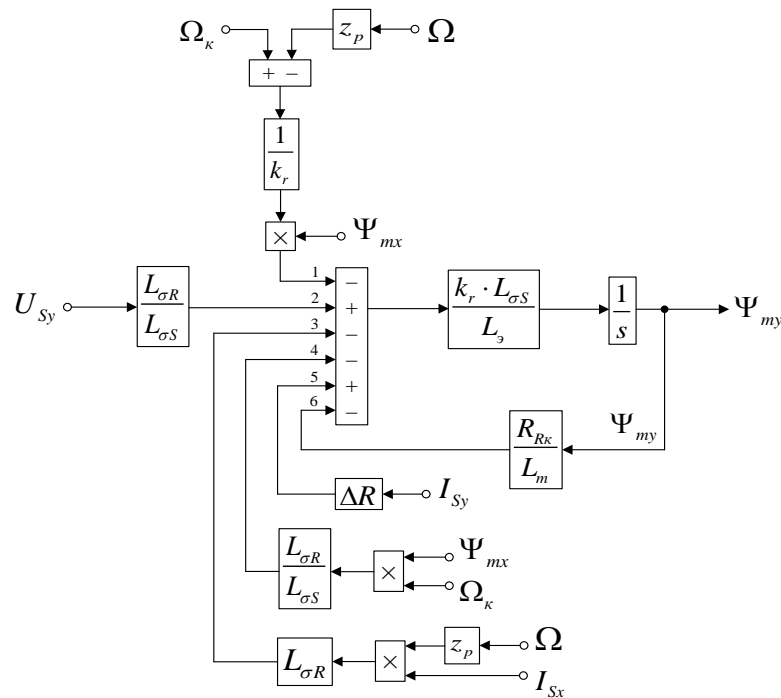


Рисунок 16 – Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my}

На рисунке 17 представлена структурная схема для реализации уравнения электромагнитного момента:

$$m = \zeta_N \cdot (\psi_{mx} \cdot i_{sy} - \psi_{my} \cdot i_{sx}).$$

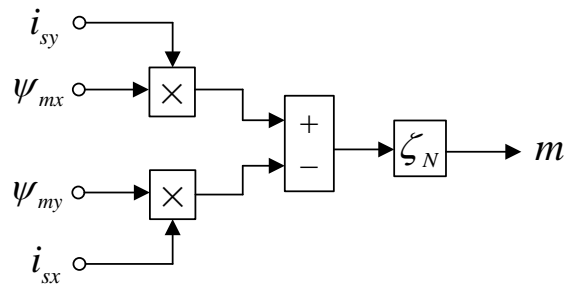


Рисунок 17 – Математическая модель определения электромагнитного момента m

Из уравнения движения выразим механическую угловую скорость вращения вала двигателя:

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

Структурная схема дана на рисунке 18.

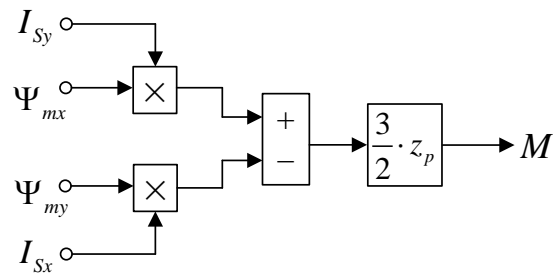


Рисунок 18 – Математическая модель уравнения движения

Расчет параметров производим в Script:

```

PN=320000;      Xm=4.552;      lm=Xm/Zb;
UsN=380;        J=28;         Lm=lm*Lb;
IsN=324;        Ub=sqrt(2)*UsN; betaN=(Omega0N-OmegaN)/Omega0N;
fN=50;          Ib=sqrt(2)*IsN; kr=lm/(lm+lbr);
Omega0N=104.7;  OmegasN=2*pi*fN;          lbe=lbs+lbr+lbs*lbr*lm^(-1);
OmegaN=102.83;  Omegab=OmegasN;        roN=0.9962;
nN=0.944;       Zb=Ub/Ib;    rrk=roN*betaN;
cos_phiN=0.92;  Psib=Ub/Omegab;  RRk=rrk*Zb;
zp=3;          Lb=Psib/Ib;    RS1=Rs+kr*RRk;
Rs=0.0178;     rs=Rs/Zb;     LbS=lbs*Lb;
Xs=0.118;     lbs=Xs/Zb;     LbR=lbr*Lb;
Rr=0.0194;     rr=Rr/Zb;    Le=LbS+kr*LbR;
Xr=0.123;     lbr=Xr/Zb;    dR=RRk-Rs*LbR/LbS;
    
```

Полная математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев приведена в приложении В

Результаты моделирования асинхронного двигателя представлены на рисунке 20.

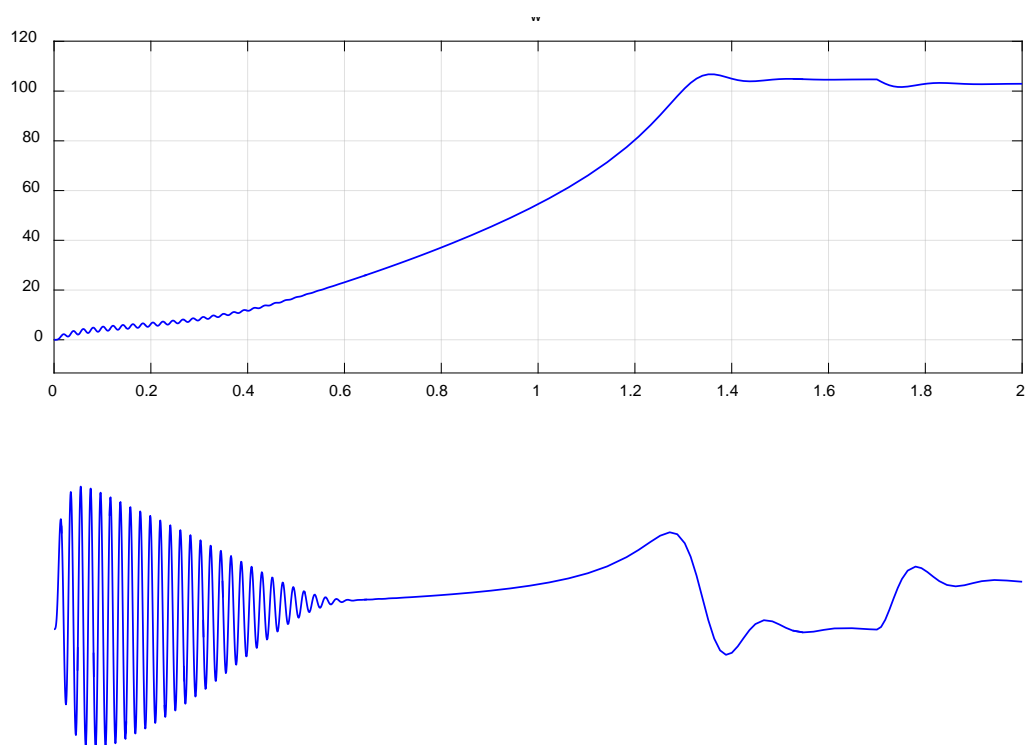


Рисунок 20 – Графики скорости и момента

2.3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ $\Psi_m - I_s$ НА ВЫХОДЕ ИНТЕГРИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ В SIMULINK

В данном разделе рассмотрим проекции векторов $\vec{\Psi}_m$ и \vec{I}_s выведенных на основе интегрирующих звеньев с моделированием в Simulink.

Во втором разделе было получено уравнение для расчета в Simulink-Script

i_{sx} :

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - \left(R_{Rk} + \frac{1}{k_r} \cdot R_S \right) \cdot I_{Sx} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sx} - \left(L_{\sigma R} + \frac{1}{k_r} \cdot L_{\sigma S} \right) \cdot (I_{Sx} \cdot s) + \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

Перенесем $\left(L_{\sigma R} + \frac{1}{k_r} \cdot L_{\sigma S} \right) \cdot (I_{Sx} \cdot s)$ в левую часть:

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

Обозначим $L_\sigma = L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R}$ и $R_{S1} = R_S + k_r \cdot R_{Rk}$.

Умножим обе части полученного уравнения на k_r :

$$L_\sigma \cdot I_{Sx} \cdot s = \frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{S1} \cdot I_{Sx} + U_{Sx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy}.$$

Ток I_{Sx} определится в следующем виде:

$$I_{Sx} = \left[\frac{k_r \cdot R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{S1} \cdot I_{Sx} + U_{Sx} + L_{\sigma S} \cdot (\Omega_k \cdot I_{Sy}) + z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{my}) + k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_k - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sy} \right] \cdot \frac{1}{L_\sigma} \cdot \frac{1}{s}.$$

Этому уравнению соответствует структурная схема для определения в программе симулинк, которую далее трансформируем в оболочку, позволяющую производить расчет коэффициентов в отдельном блоке сабсистем, что облегчит расчет результатов. Структурная схема для определения I_{Sx} в Script-Simulink приведена на рисунке 21.

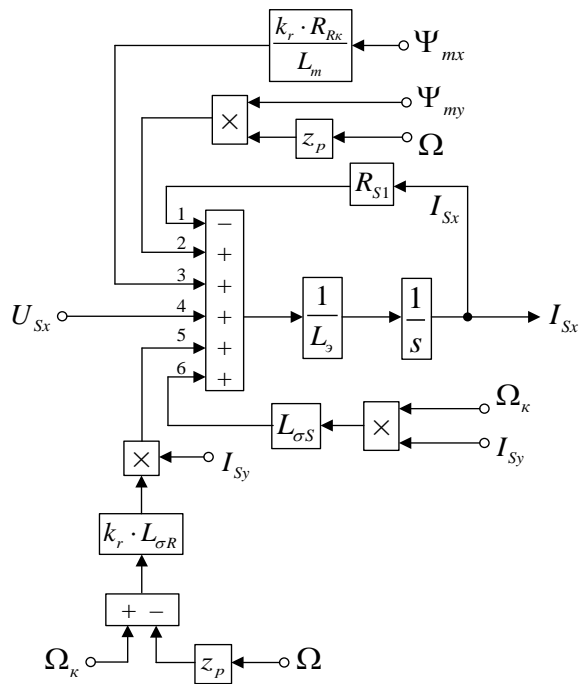


Рисунок 21 – Структурная схема для определения I_{Sx} в Script-Simulink

Трансформируем структурную схему на рисунке 21 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 22.

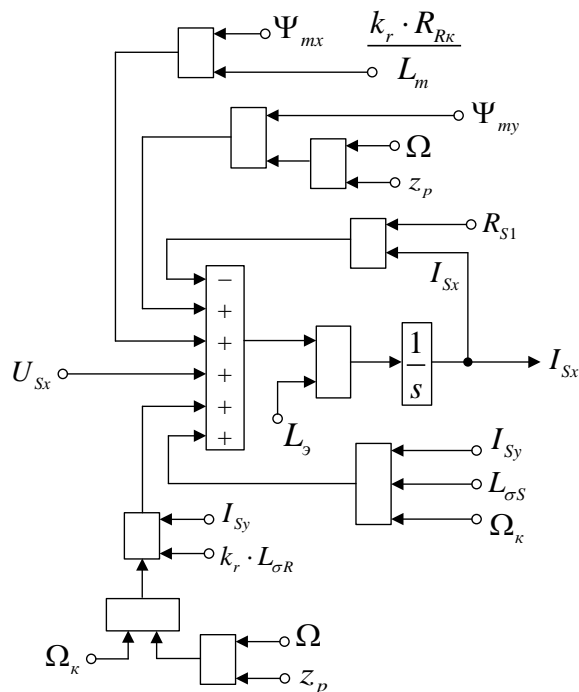


Рисунок 22 – Структурная схема для определения I_{Sx} в Simulink

Произведем аналогичную трансформацию при определении вектора тока \vec{I}_S по проекции y . В главе 2 получено следующее уравнение:

$$0 = \frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - \left(\frac{R_{R\kappa} \cdot k_r + R_S}{k_r} \right) \cdot I_{Sy} + \frac{1}{k_r} \cdot U_{Sy} - \left(\frac{L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \cdot k_r}{k_r} \right) \cdot (I_{Sy} \cdot s) - \frac{L_{\sigma S}}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) - \frac{z_p}{k_r} \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx}.$$

Перенесем $\left(\frac{L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \cdot k_r}{k_r} \right) \cdot (I_{Sy} \cdot s)$ в левую часть и умножим обе части на k_r :

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

Определим ток I_{Sy} :

$$I_{Sy} = \left[\frac{k_r \cdot R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{my} - R_{S1} \cdot I_{Sy} + U_{Sy} - L_{\sigma S} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sx}) - z_p \cdot (\Omega \cdot \Psi_{mx}) - k_r \cdot L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot I_{Sx} \right] \cdot \frac{1}{L_{\sigma S} + L_{\sigma R} \cdot k_r} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема определения тока I_{Sy} показана на рисунке 23.

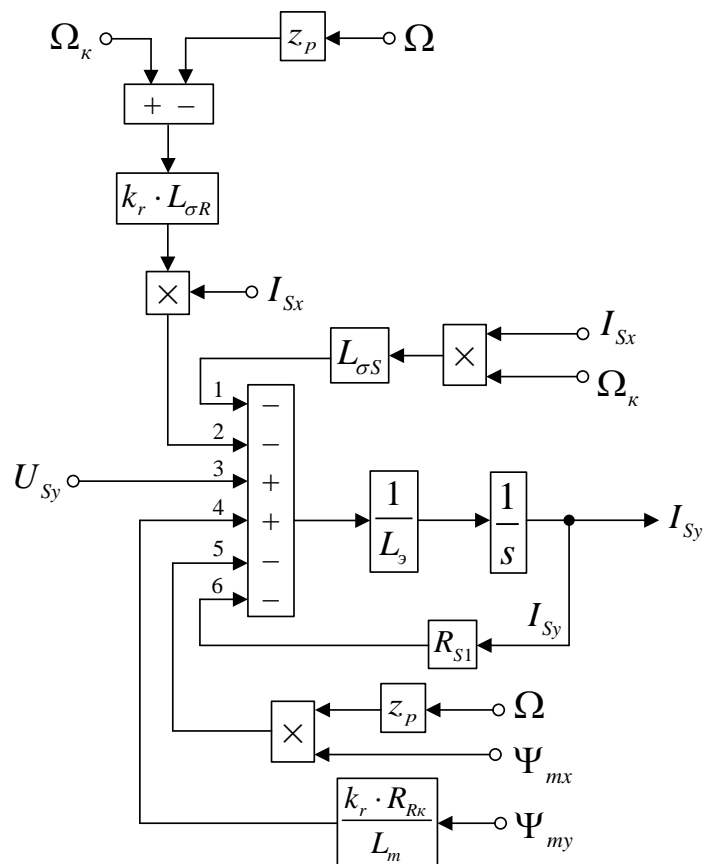


Рисунок 23 – Структурная схема для определения I_{Sy} в Script-Simulink

Расчет коэффициентов будем производить в отдельном блоке Subsystem, поэтому вносим в схему на рисунке 23 блоки перемножения (рисунок 24).

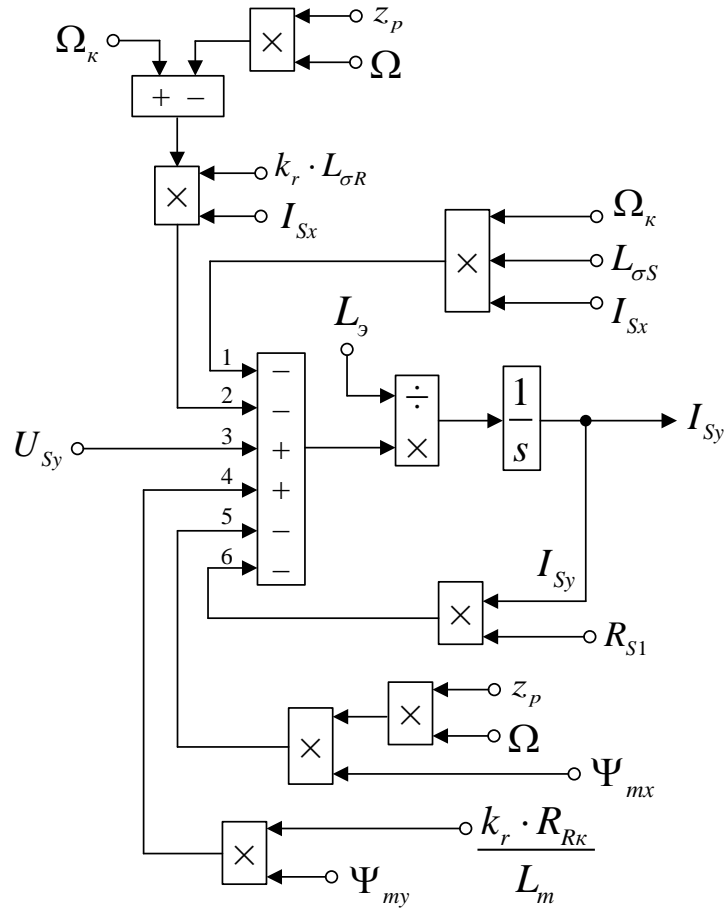


Рисунок 24 – Структурная схема для определения I_{Sy} в Simulink

Потокосцепление Ψ_{mx} по оси (+1) из уравнения:

$$0 = \frac{R_{Rk}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} - R_{Rk} \cdot I_{Sx} + \frac{1}{k_r} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Psi_{mx} \cdot s) - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) - L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sy}) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot I_{Sy}) - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}).$$

Перенесем в левую часть $\left(\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}}\right) \cdot \Psi_{mx} \cdot s$:

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

Обозначим:

$$\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} = \frac{L_{\sigma S} + k_r \cdot L_{\sigma R}}{k_r \cdot L_{\sigma S}} = \frac{L_3}{k_r \cdot L_{\sigma S}};$$

$$R_{R\kappa} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} = \Delta R.$$

$$\begin{aligned} \frac{L_3}{k_r \cdot L_{\sigma S}} \cdot \Psi_{mx} \cdot s = & -\frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + \Delta R \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + \\ & + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}). \end{aligned}$$

Определим потокосцепление Ψ_{mx} :

$$\Psi_{mx} = \left[\begin{array}{c} -\frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{mx} + \Delta R \cdot I_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sx} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{my}) + \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{my} + \\ + L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sy}) \end{array} \right] \cdot \frac{k_r \cdot L_{\sigma S}}{L_3} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{mx} приведена на рисунке 25.

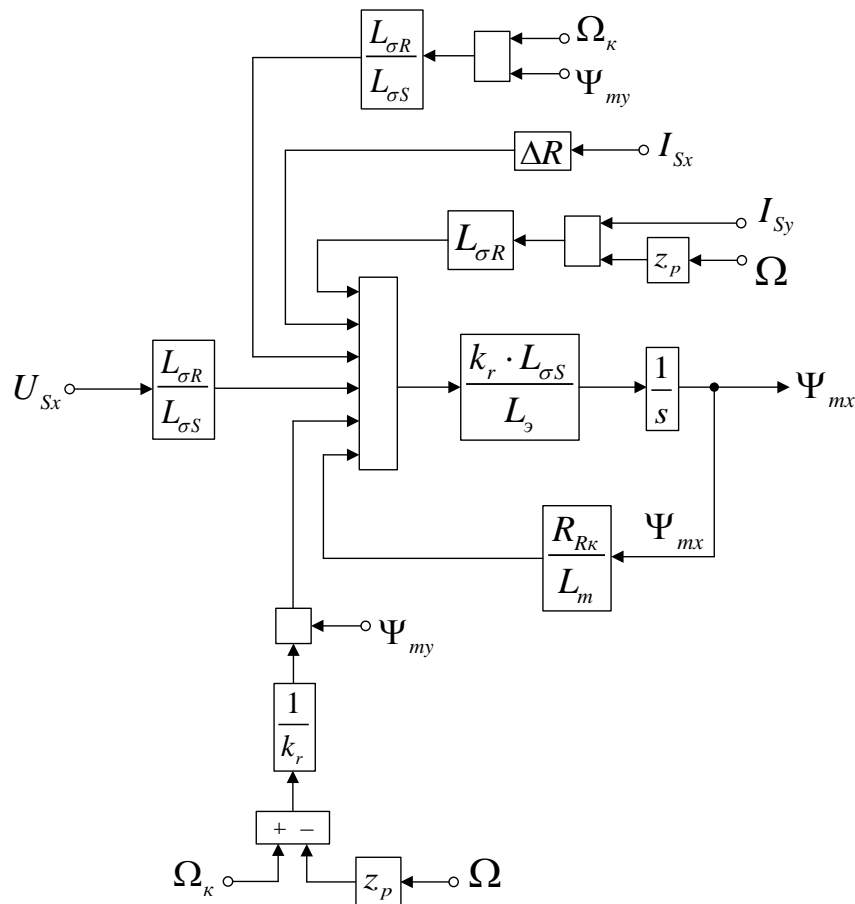


Рисунок 25 – Структурная схема определения Ψ_{mx} в Script-Simulink

$$\left(\frac{1}{k_r} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \right) \cdot \Psi_{my} \cdot s = - \frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{my} + \left(R_{R\kappa} - \frac{R_S \cdot L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \right) \cdot I_{Sy} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) -$$

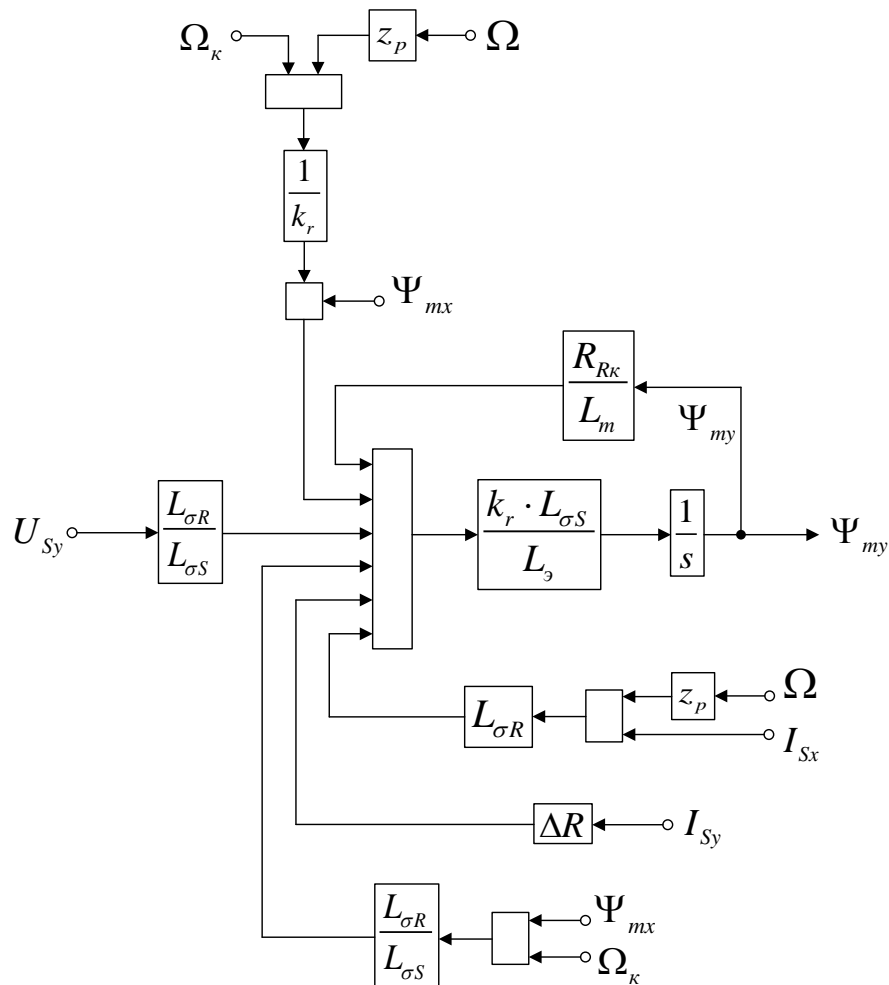
$$L_{\sigma} / (k_r \cdot L_{\sigma S}) \cdot \Psi_{mx} - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}).$$

Тогда потокосцепление Ψ_{my} определится следующим образом:

$$\Psi_{my} = \left[- \frac{R_{R\kappa}}{L_m} \cdot \Psi_{my} + \frac{\Delta R \cdot I_{Sy}}{L_m} + \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot U_{Sy} - \frac{L_{\sigma R}}{L_{\sigma S}} \cdot (\Omega_{\kappa} \cdot \Psi_{mx}) - \frac{1}{k_r} \cdot (\Omega_{\kappa} - \Omega \cdot z_p) \cdot \Psi_{mx} - \right.$$

$$\left. - L_{\sigma R} \cdot z_p \cdot (\Omega \cdot I_{Sx}) \right] \cdot \frac{k_r \cdot L_{\sigma S}}{L_{\sigma} \cdot s} \cdot \frac{1}{s}.$$

Структурная схема для определения потокосцепления Ψ_{my} приведена на рисунке 27.



Рисунке 27 – Структурная схема для определения Ψ_{my} в Script-Simulink

Схема для расчета Ψ_{my} в Simulink представлена на рисунке 28.

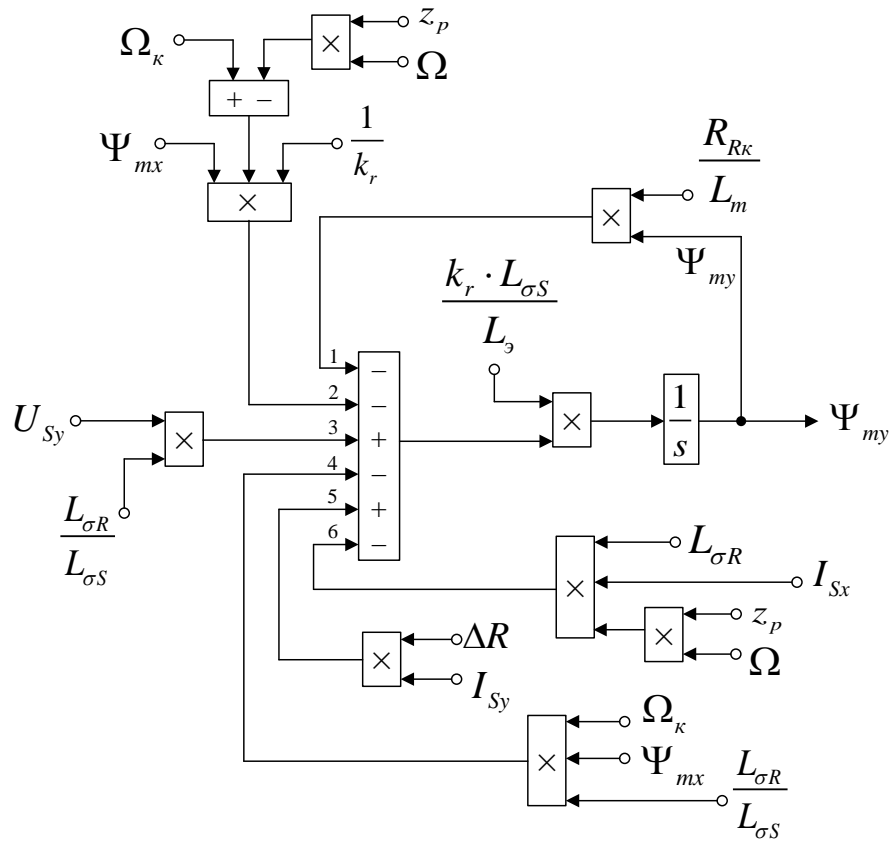


Рисунок 28 – Структурная схема для определения Ψ_{my} в Simulink

На рисунке 29 представлена структурная схема для реализации уравнения электромагнитного момента в Simulink:

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

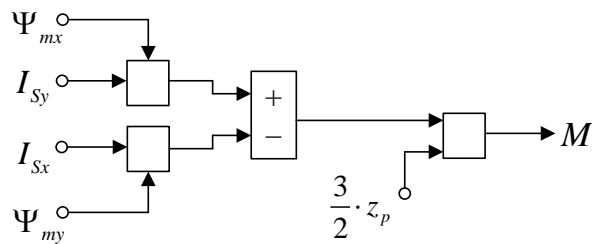


Рисунок 29 – Математическая модель определения электромагнитного момента M в Simulink

Механическая угловая скорость вращения вала двигателя:

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

Структурная схема приведена на рисунке 30.

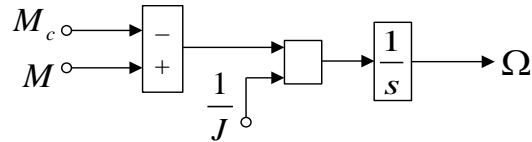


Рисунок 30 – Математическая модель уравнения движения в Simulink

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink приведена на рисунке 31.

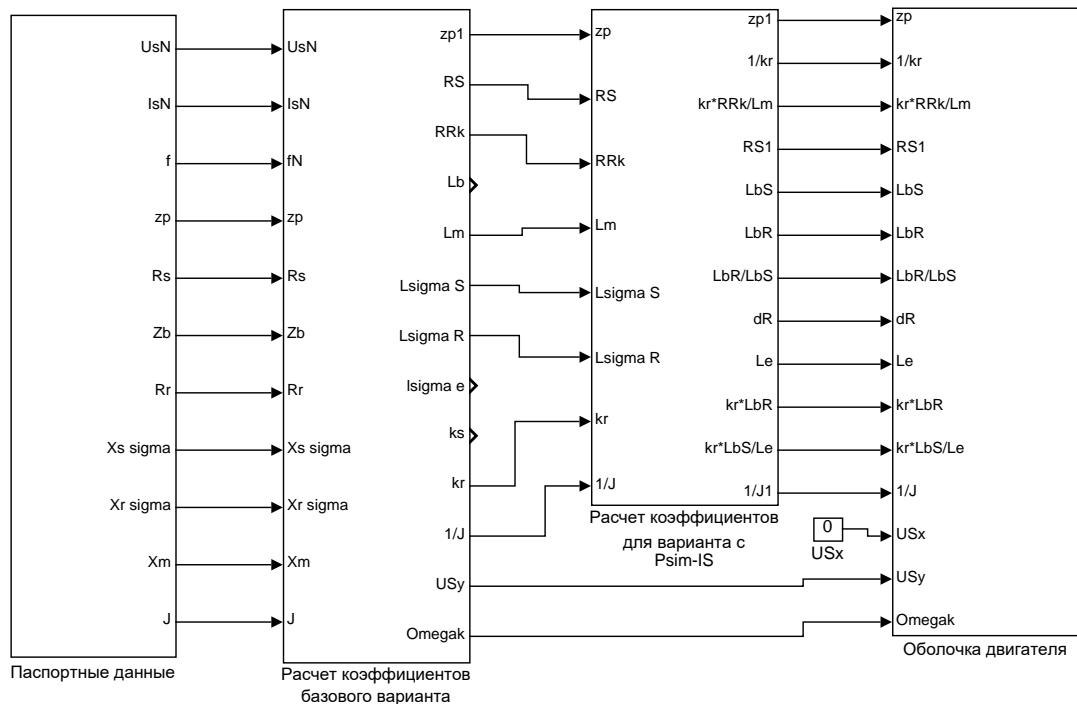


Рисунок 31 – Общая схема математической модели асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink

Опираясь на вышеизложенный материал и обладая теоретическими данными, воспользуемся рисунками, с паспортными данными и рассчитаем коэффициент базового варианта, а так же рассчитаем коэффициент для варианта с переменными $\Psi_m - I_S$ после всех манипуляций изобразим оболочку модели асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink, на рисунках 32 - 35.

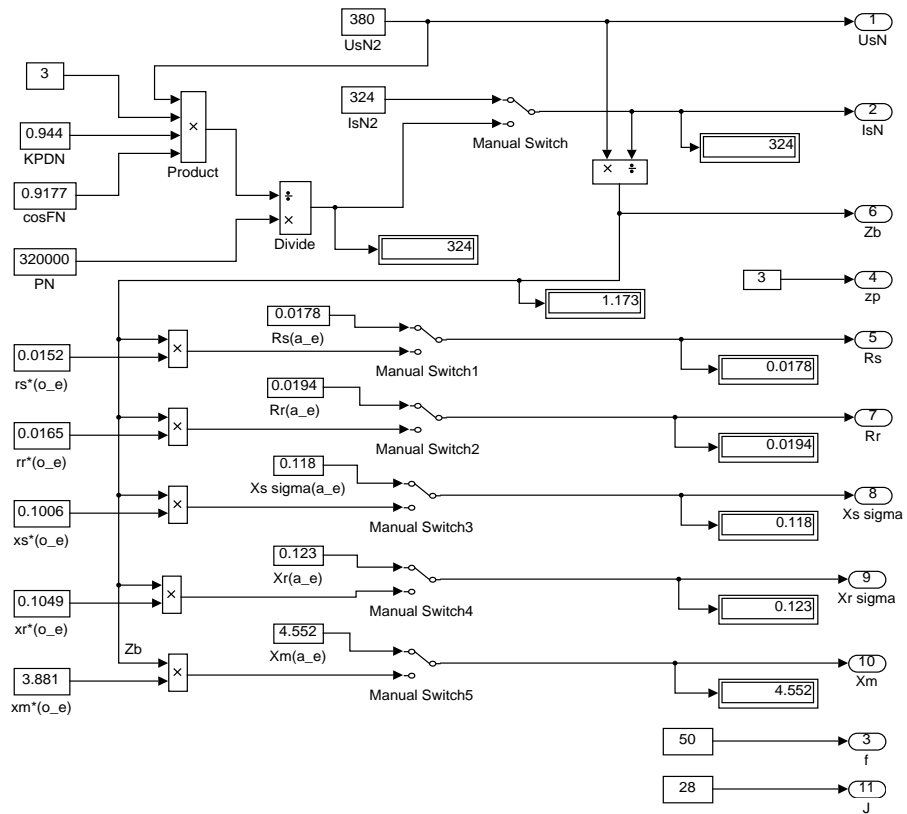


Рисунок 32 – Паспортные данные асинхронного двигателя

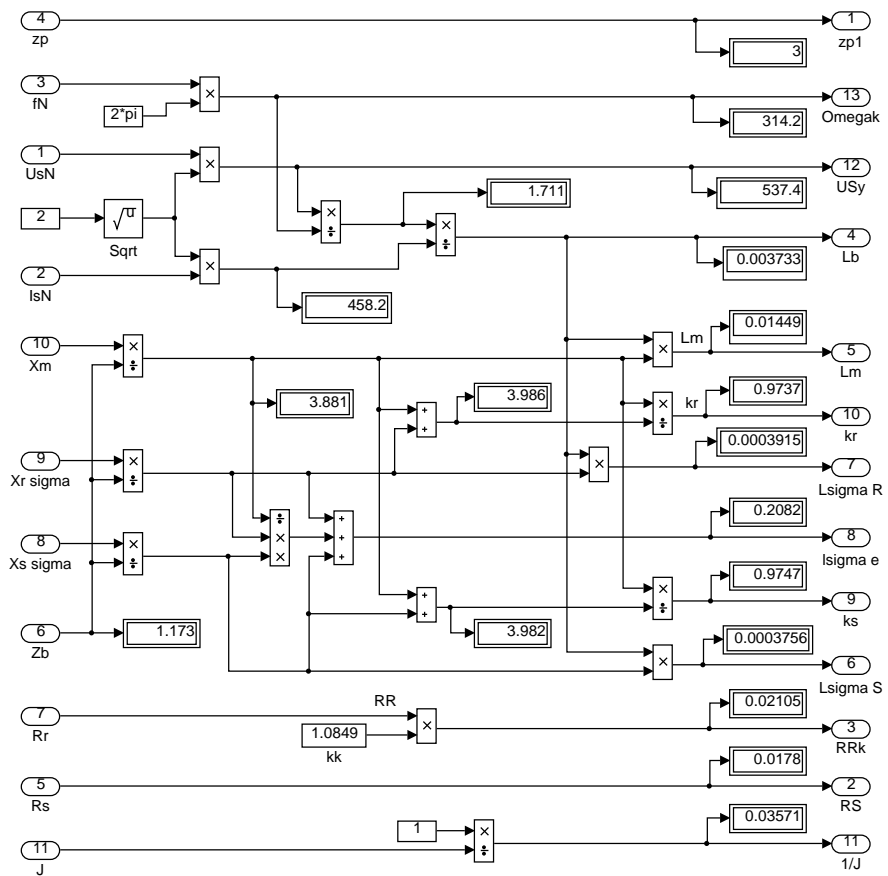


Рисунок 33 – Расчет коэффициентов базового варианта

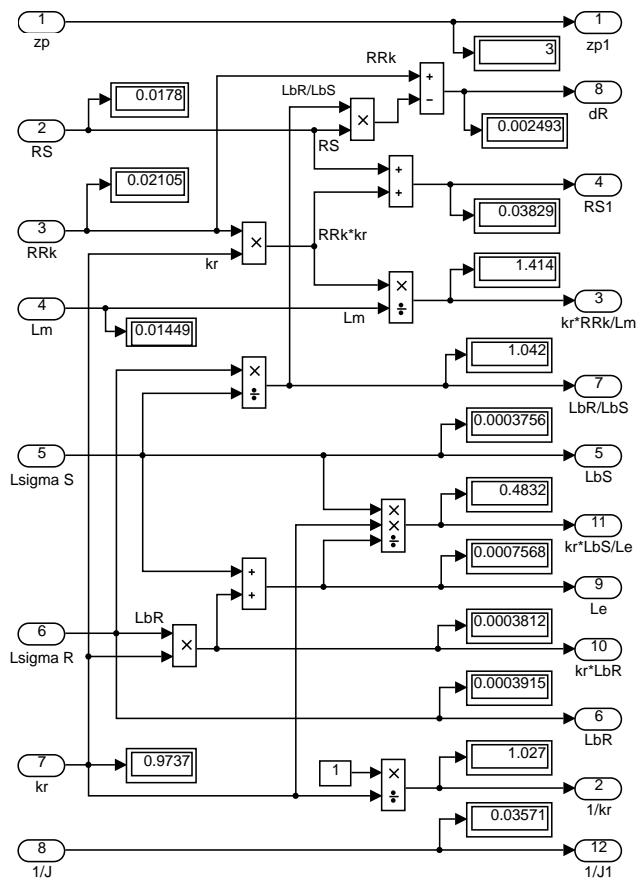


Рисунок 34 – Расчет коэффициентов для варианта с переменными $\Psi_m - I_S$

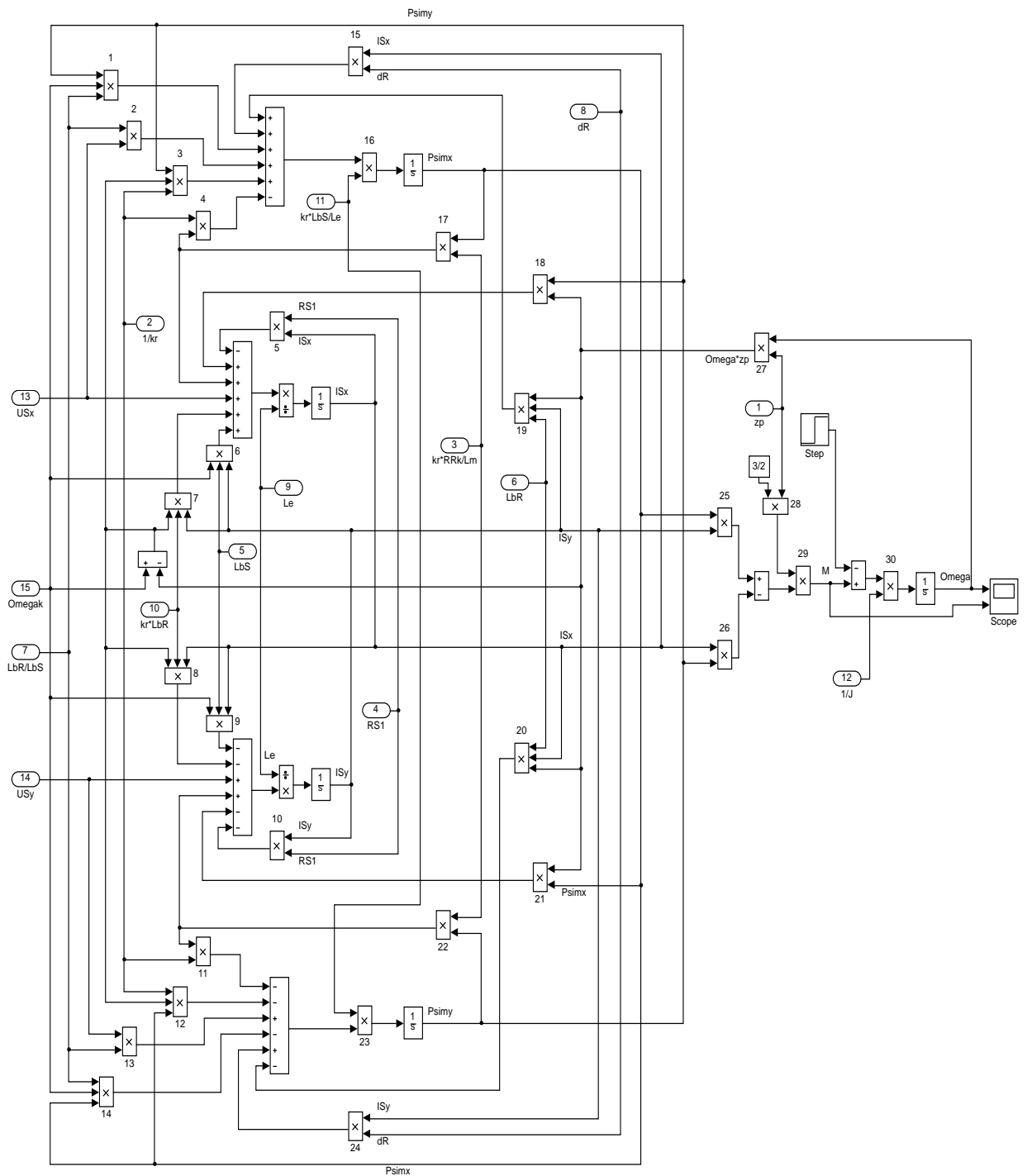


Рисунок 35 - Оболочка модели асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в системе абсолютных единиц в Simulink

Эту же схему можно представить в более компактной форме с использованием блоков Goto и From (рисунок 36) и отдельных субблоков с расчетами токов и потокосцеплений, приведенных на рисунке 37 и 38.

Результаты моделирования асинхронного двигателя представлены на рисунке 39.

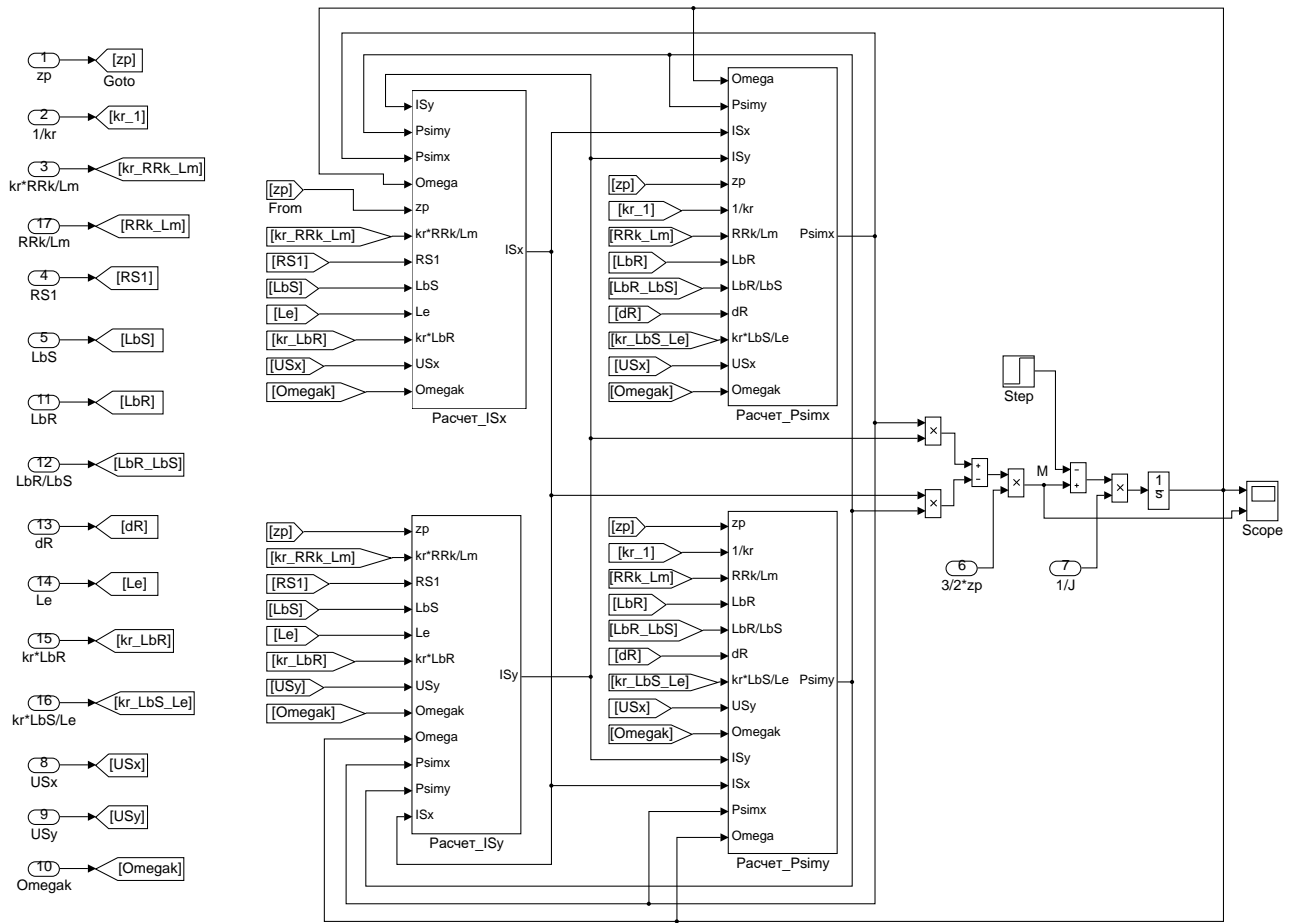


Рисунок 36 - Оболочка модели асинхронного двигателя с применением блоков Goto и From

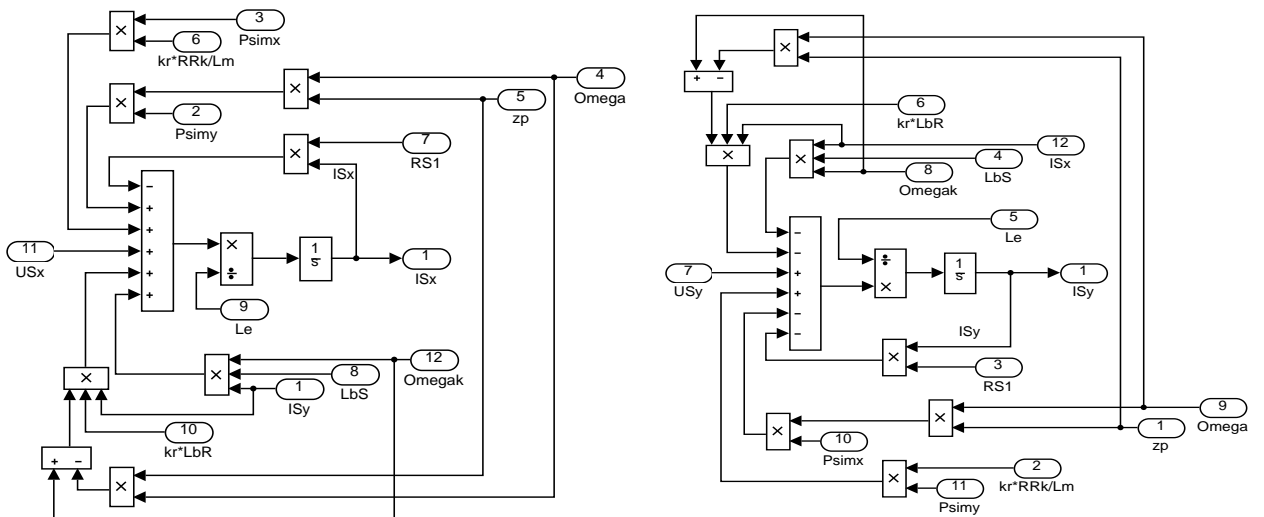


Рисунок 37 - Схемы для расчета I_{Sx} и I_{Sy}

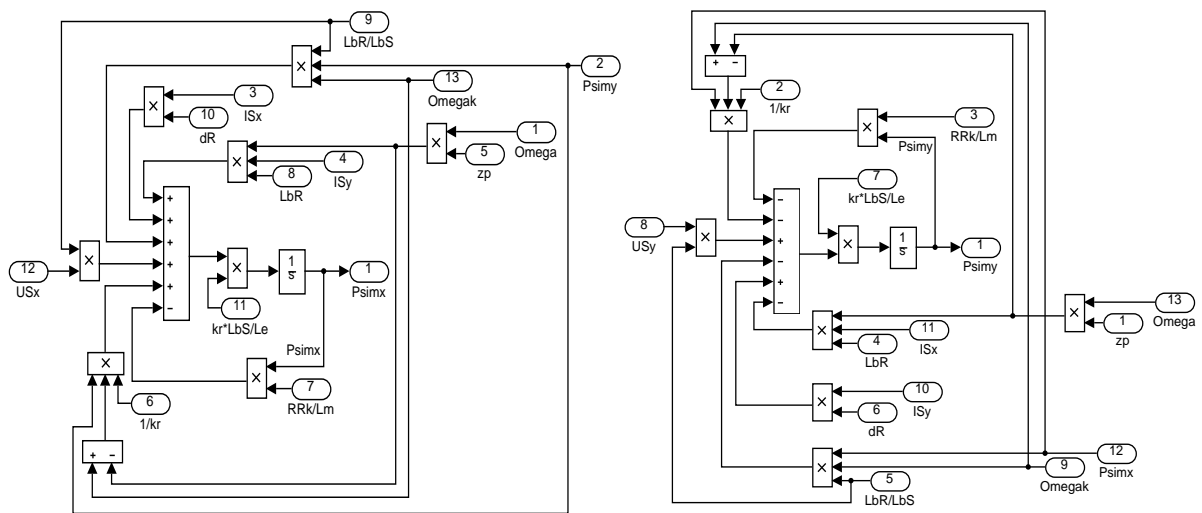


Рисунок 38 - Схемы для расчета Ψ_{mx} и Ψ_{my}

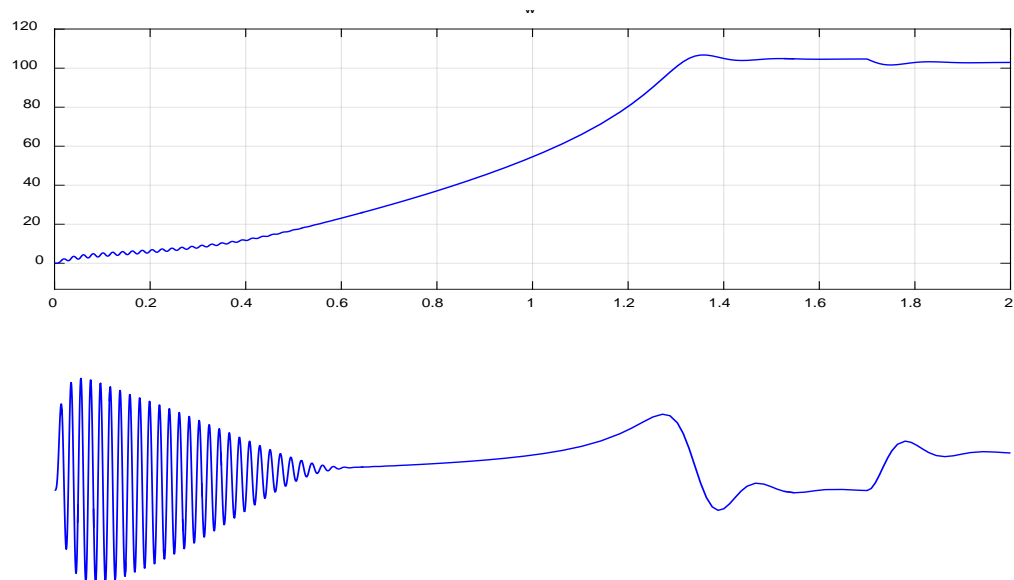


Рисунок 39 – график скорости и момента

3. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

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

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 40.

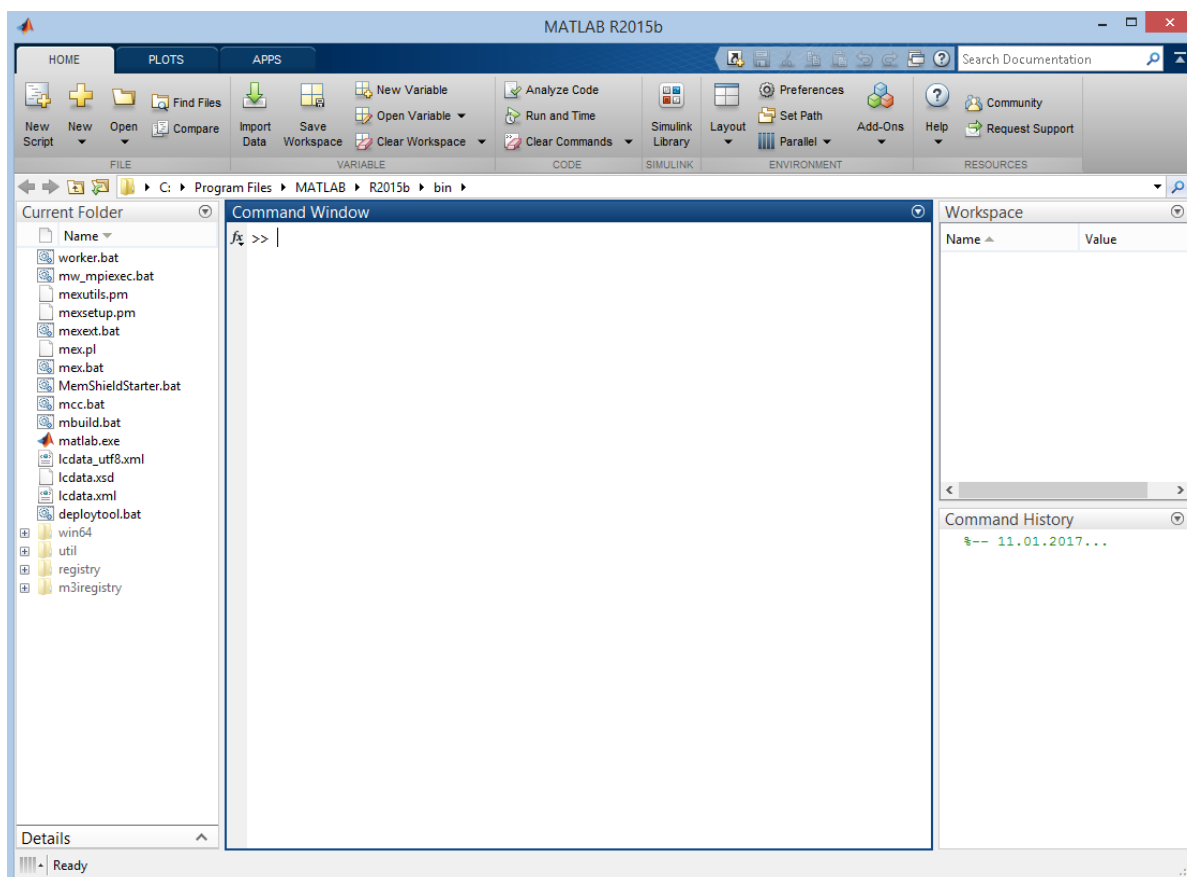


Рисунок 40 – Рабочее окно приложения MATLAB

2. Создать новый файл модели Simulink. Для этого во вкладке HOME нажать кнопку New и в открывшемся меню выбрать Simulink Model на рисунке 41.

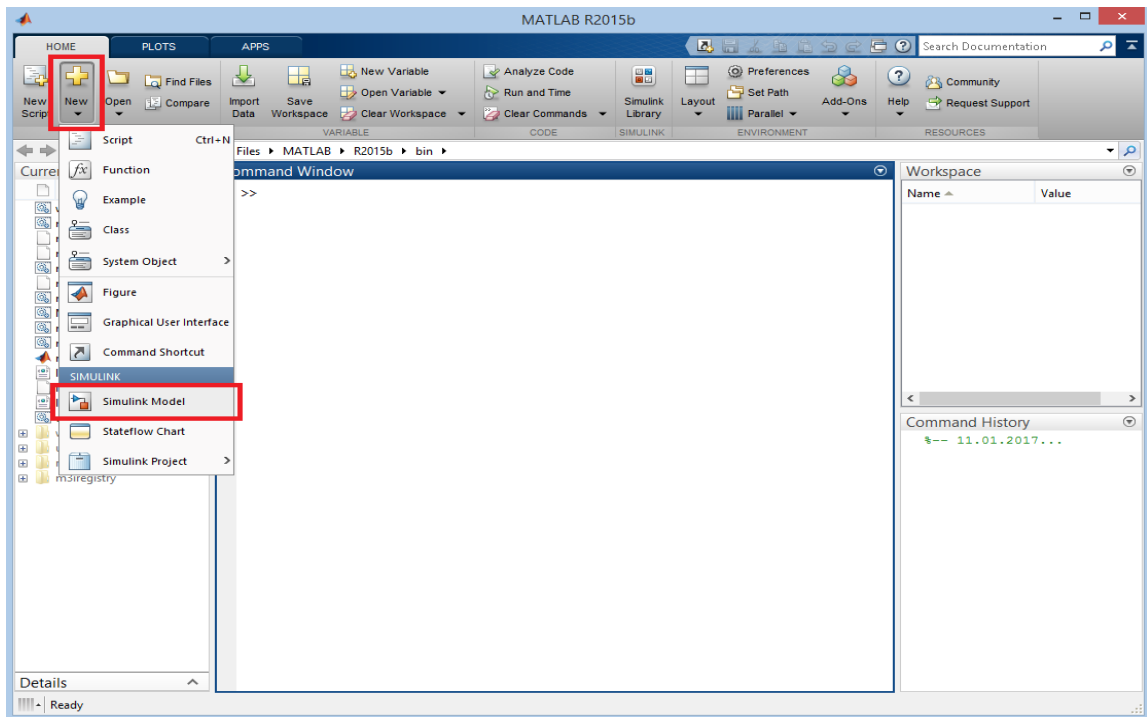


Рисунок 41 – Создание нового файла модели Simulink

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 42.

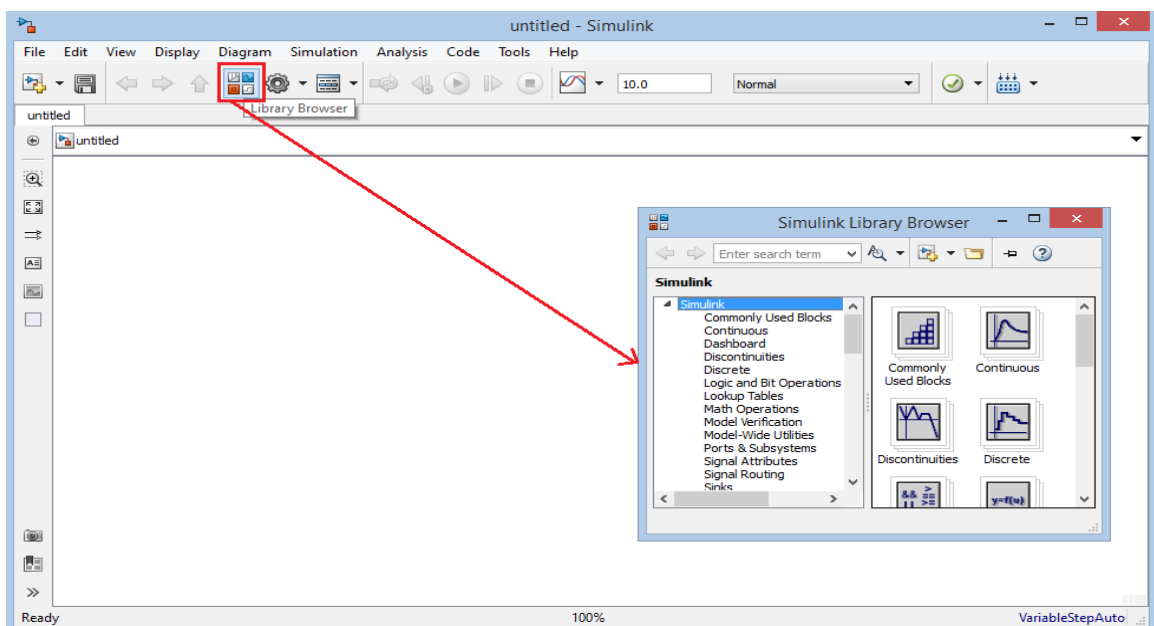


Рисунок 42 – Открытие обозревателя библиотек Simulink

4. Порядок сборки модели.

Математическая модель лабораторной работы в Simulink приведена на рисунках 43 – 47 для базового варианта.

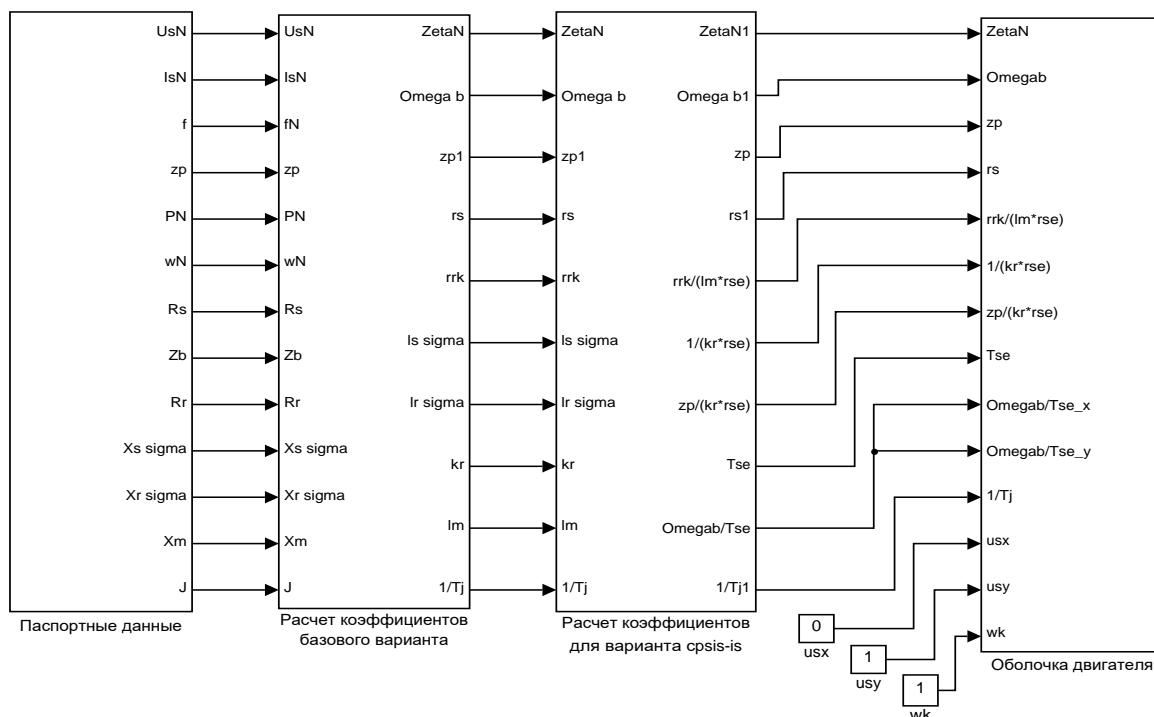


Рисунок 43 – Общая схема математической модели асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink

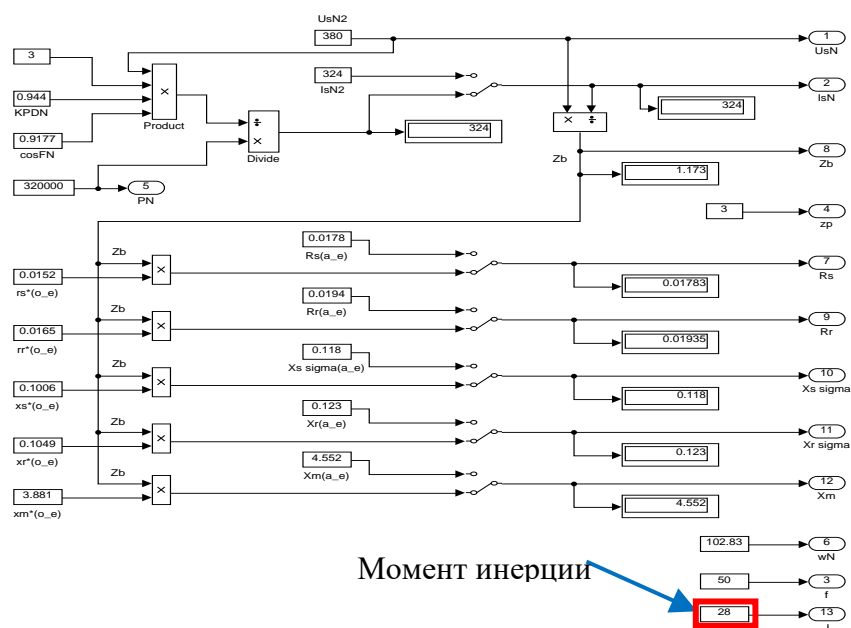


Рисунок 44 – Паспортные данные

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 48.

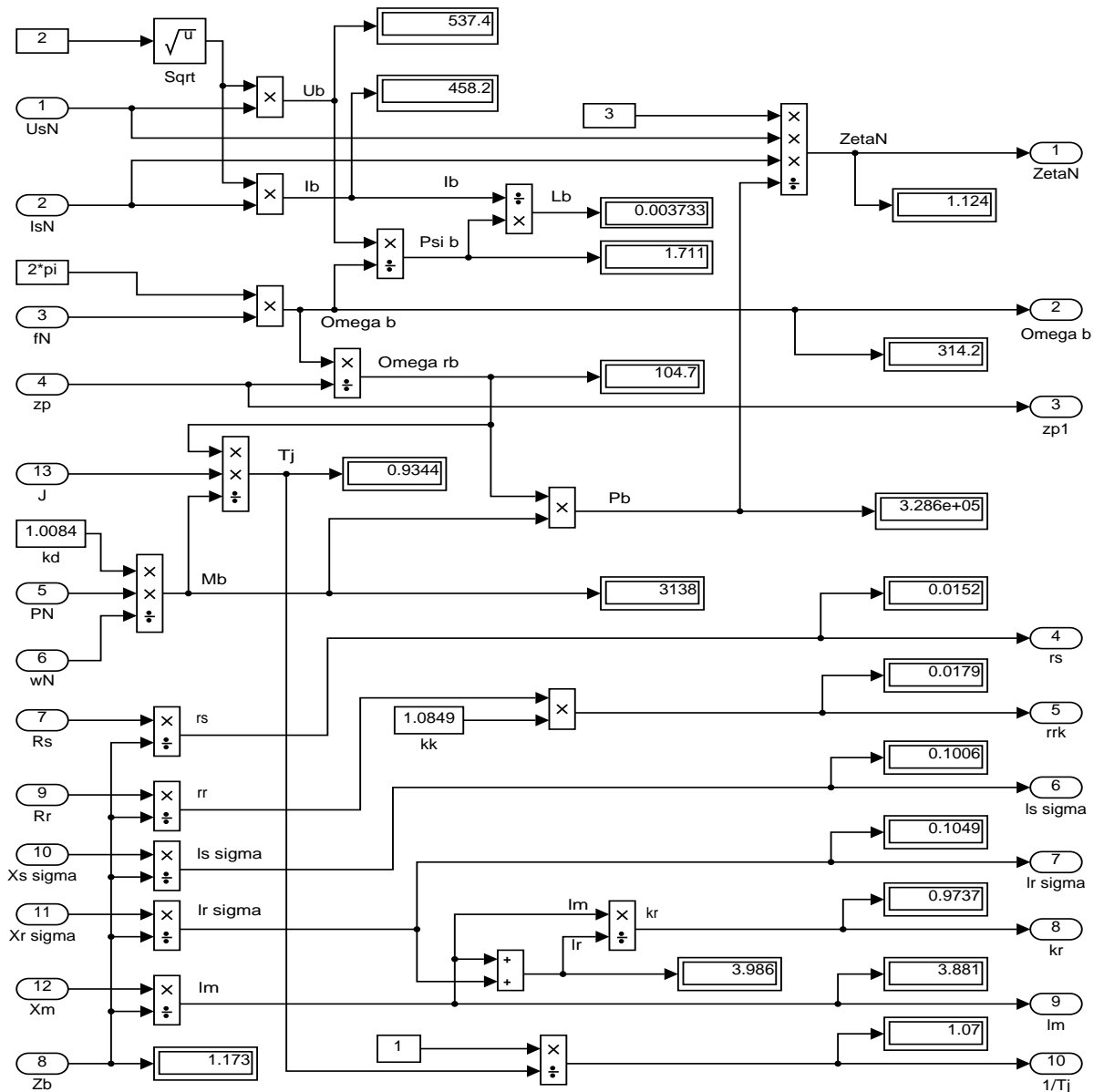


Рисунок 45 – Расчет коэффициентов базового варианта

Расчет коэффициентов для варианта с переменными $\Psi_m - I_s$ на рисунке 49.

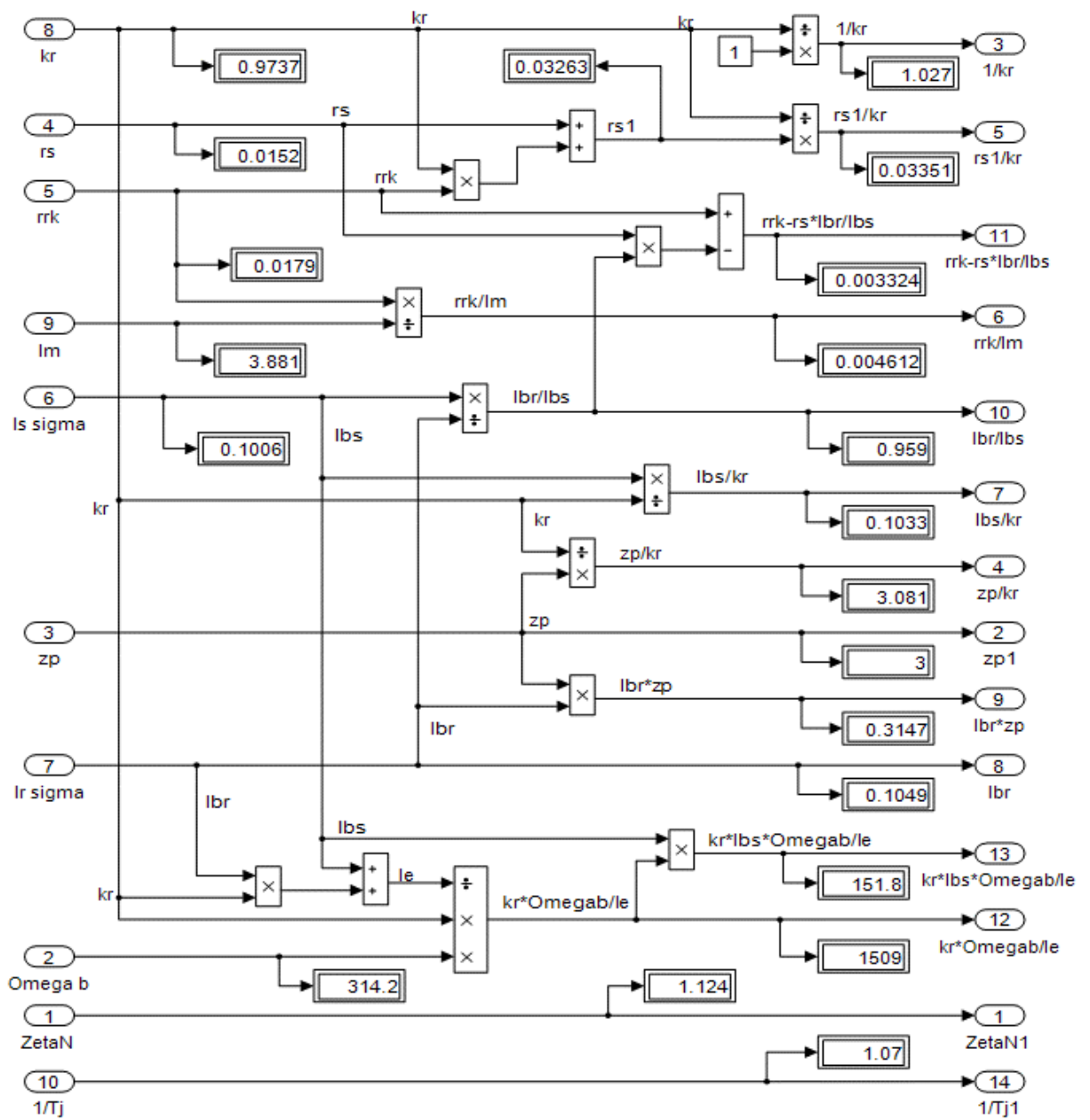


Рисунок 46 – Расчет коэффициентов для варианта с переменными $\Psi_m - I_S$

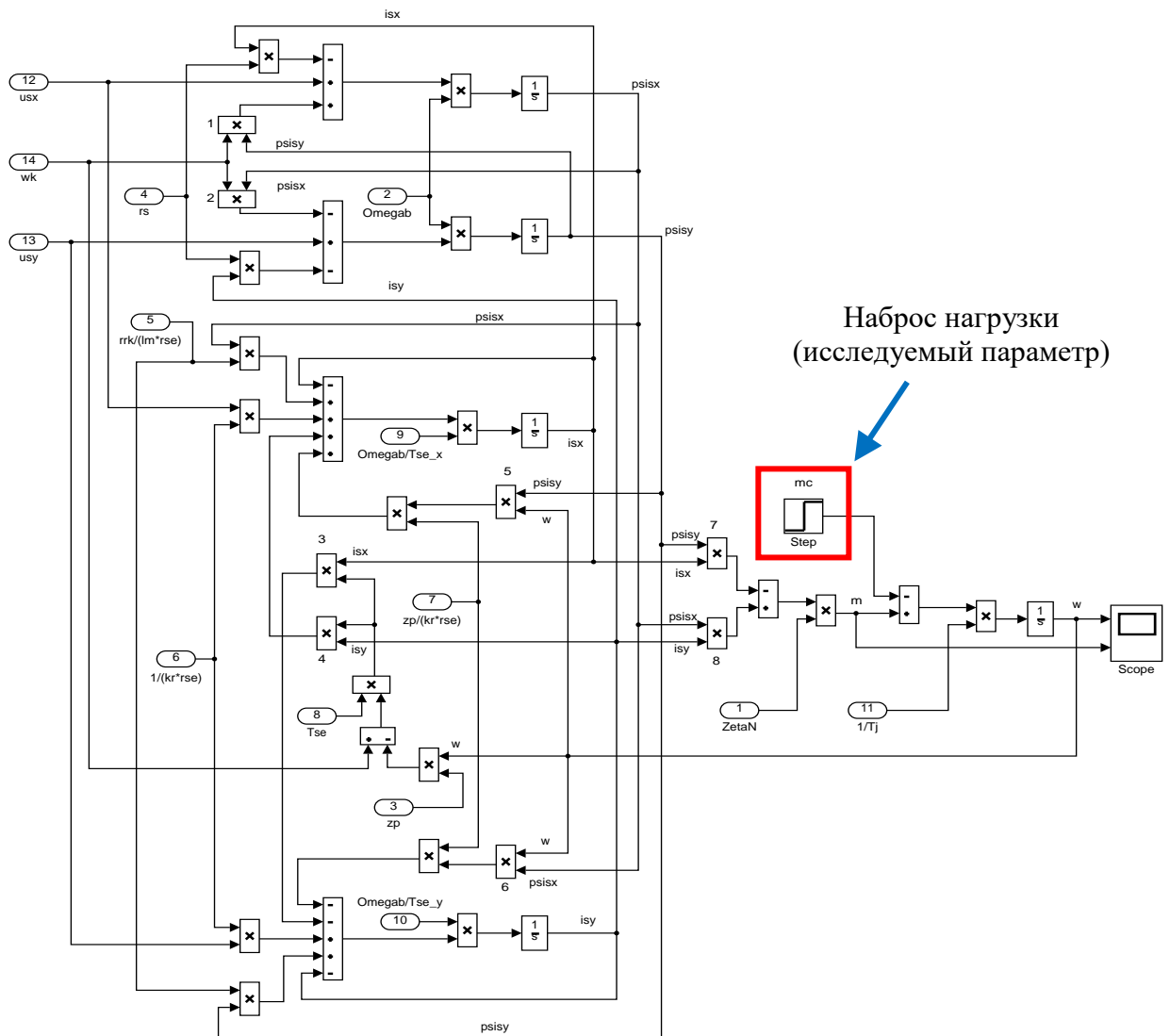


Рисунок 47 – Оболочка модели асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink

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 51.

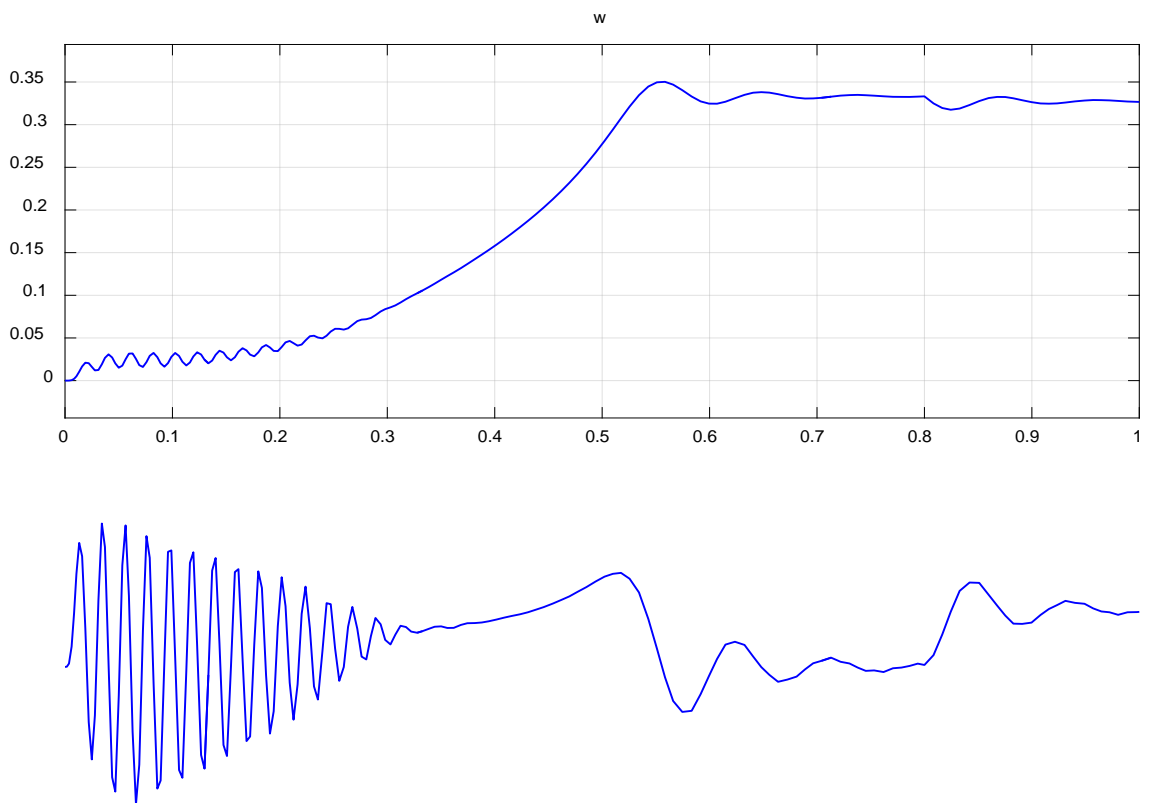


Рисунок 48 – Графики скорости и момента

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 была проанализирована научно-техническая литература по теории асинхронных машин и математическому моделированию электрических машин, а также научные статьи по теме исследования. В анализируемой литературе выделена её актуальность, доступность, структурированность и ориентированность 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 видно, во всех трех главах различные математические модели имеют одинаковые переходные процессы (электромагнитный момент и скорость). Это связано с тем, что математические модели строятся для одного и того же асинхронного двигателя, и характеристики рисунков, полученные на математической модели должны совпадать с картиной 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: СреднеУральское. 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.

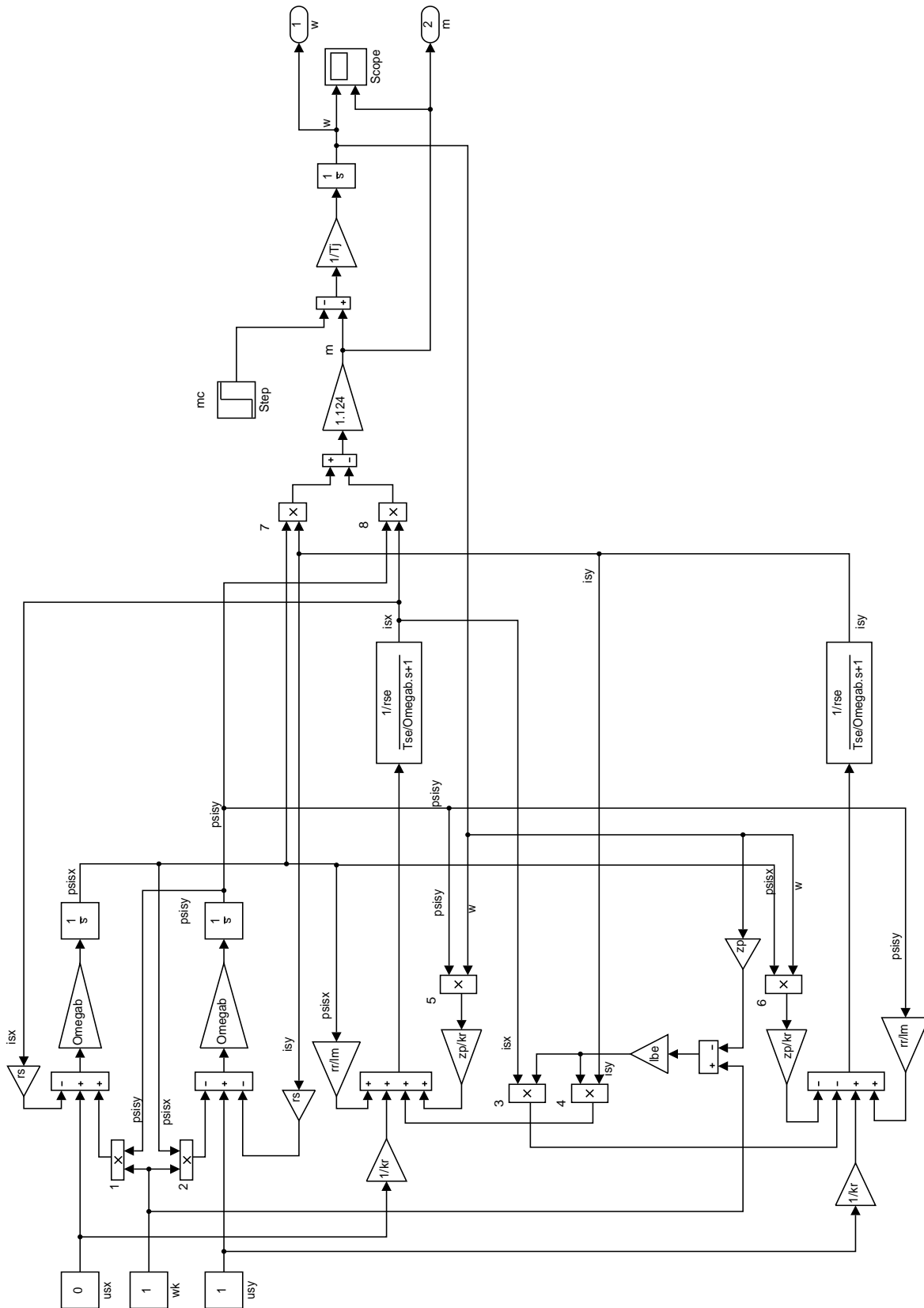
29. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода [Текст]: учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. 6-е издание, Москва: Энергоиздат, 1981. 576 с.

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 РГППУ, 2012. — 222 с. : ил.

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

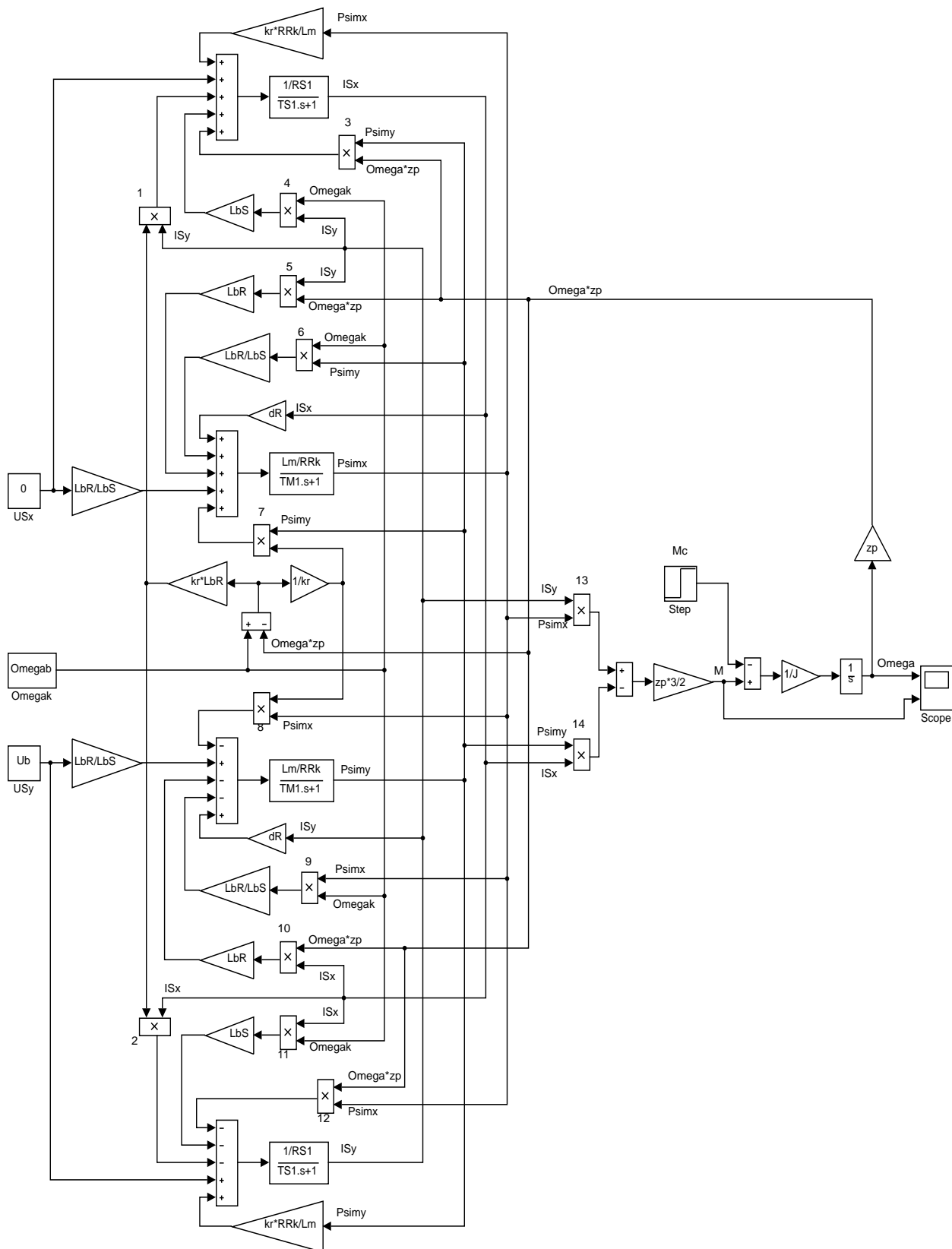
ПРИЛОЖЕНИЕ А

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



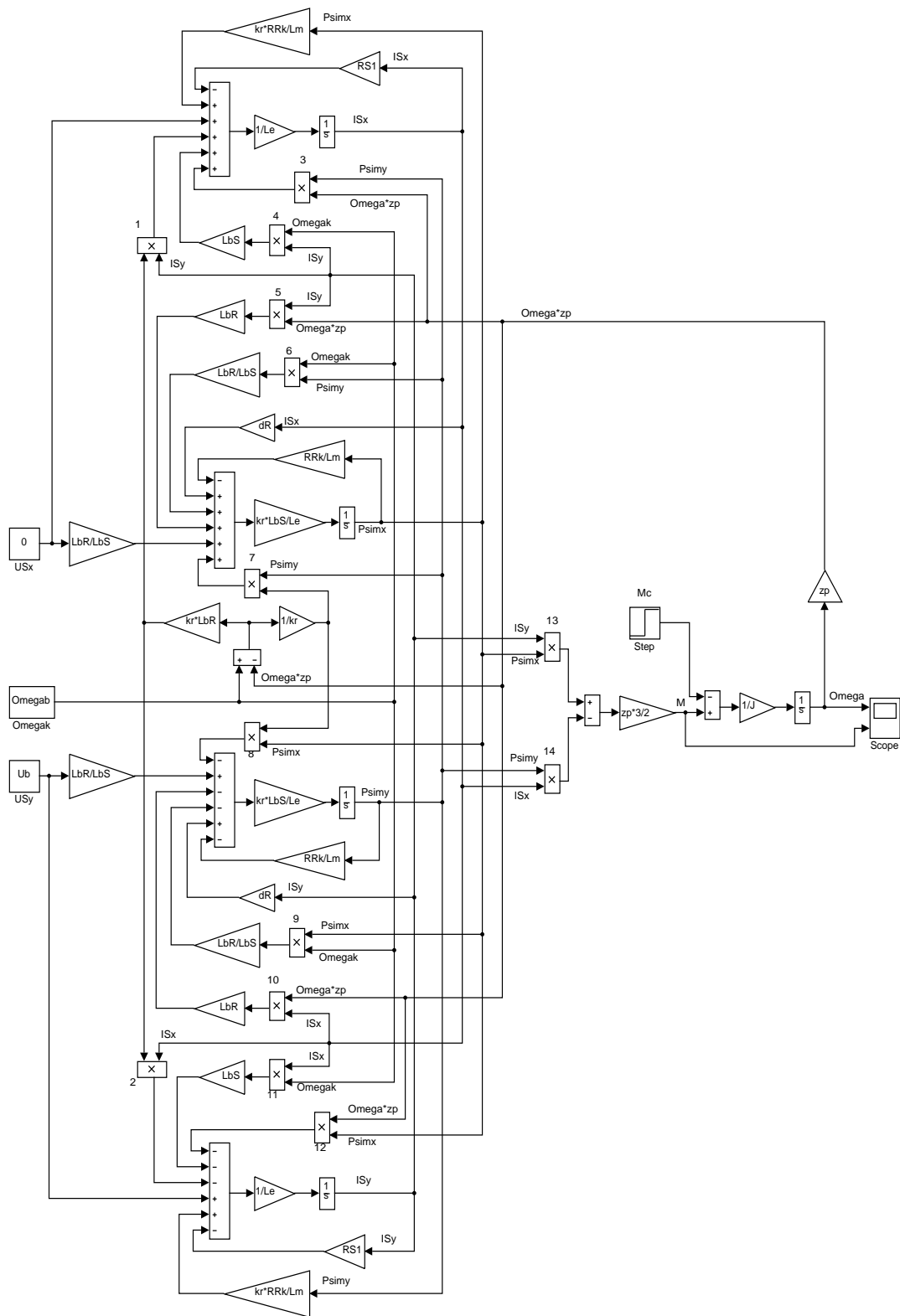
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$
на выходе апериодических звеньев в системе абсолютных единиц



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Математическая модель асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в системе абсолютных единиц



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Оболочка модели асинхронного двигателя с переменными $\Psi_m - I_S$ на выходе интегрирующих звеньев в Simulink

