

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕМАТИКЕ ШАГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДРОССЕЛЬНОЙ ЗАСЛОНКИ.....	3
1.1. Практические и научные достижения в области моделирования и исследования динамических режимов работы шагового электропривода.	3
1.2. Шаговый электропривод.....	4
1.2.1. Конструкция и применение шаговых двигателей.	5
1.2.2. Основные типы шаговых электродвигателей.Ошибка! Закладка не определена.	
1.3. Режимы работы и характеристики шаговых двигателейОшибка! Закладка не определена.	
1.4. Электропривод дроссельной заслонки.	8
Вывод по главе 1	10
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	11
2.1. Допущения, принимаемые при моделировании шаговых электродвигателей.....	11
2.2. Математическая модель шагового электропривода в динамических режимах работы.....	12
Вывод по главе 2	17
ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДРОССЕЛЬНОЙ ЗАСЛОНКИ	19
3.1. Функциональная схема шагового электропривода.....	19
3.2. Имитационная модель шагового электропривода дроссельной заслонки. 21	
3.2. Результаты моделирования переходных режимов электропривода дроссельной заслонки.....	28
Вывод по главе 3	35
Глава 4. Экономическая часть	Ошибка! Закладка не определена.
Глава 5. Безопасность жизнедеятельности.....	Ошибка! Закладка не определена.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	36

ВВЕДЕНИЕ

Современные электронные дроссельные заслонки различных типовых систем в большинстве своем реализуются на шаговых электродвигателях. Дроссельные заслонки трубопроводов карбюраторов и газораспределительных систем. Вследствие чего остро встает вопрос о необходимости корректных математических и компьютерных моделей, для исследования динамических режимов работы шаговых электроприводов с исполнительными маломощными быстроходными двигателями магнитоэлектрического типа и тихоходными двигателями с электромеханической редукцией скорости. Это является крайне актуальной научно-технической проблемой, решение которой будет способствовать совершенствованию и повышению эффективности проектирования рассматриваемых систем.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕМАТИКЕ ШАГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДРОССЕЛЬНОЙ ЗАСЛОНКИ

1.1. Практические и научные достижения в области моделирования и исследования динамических режимов работы шагового электропривода.

Значительный вклад в исследование переходных процессов в электроприводах внесли различные отечественные авторы, такие как: Алябьев М.И, Аракелян А.К, Афанасьев А.А., Беспалов В.Я, Важнов А.И., Веников В.А., Грузов В.Л, Исмаилов Ш.Ю., Копылов И.П., Кривицкий С.О., Лутидзе Ш.И., Овчиников И.Е., Постников И.М., Сипайлов Г.А., Хасаев О.И., Шубенко В.А и др [1-7].

Вклад в систематическое описание шагового привода внесли Чиликин М.Г., Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А., Цаценкин В.К. В их работе [5] сформулированы принципы математического описания шагового электропривода. Обоснована его полная модель. Даны методы вычисления параметров и составления уравнений. Получены и проанализированы уравнения типовых систем привода с выпускаемыми промышленностью шаговыми двигателями. Изложены различные методы решения полученных уравнений и подробные исследования на основе динамических и установившихся режимов работы шагового электропривода. Разработаны методы проектирования и расчета двух основных типов шаговых электродвигателей: с постоянными магнитами на роторе и индукторных.

Исследованию шаговых двигателей с электромеханической редукцией скорости посвящены кандидатские диссертации Воробьева А.В., Шашуриной И.М., Габова А.П., Однокопылова Г.И., Любарской Т.А., Столярова А.Н., Постникова В.А и др. Вопросы исследования статических и динамических характеристик шаговых двигателей с электромеханической редукцией скорости, доведенные до универсальных характеристик и практических

рекомендаций, касаются лишь частных случаев отдельных типов двигателей, в основном четырехфазных с парной коммутацией и питанием однополярными импульсами напряжения. В настоящее время отсутствуют отечественные серийные разработки индукторных шаговых двигателей с электромеханической редукцией скорости с возбуждением от постоянных магнитов, имеющих ряд существенных достоинств по сравнению с шаговыми двигателями реактивного и индукторного с самовозбуждением типов [6].

Семисалов В.В. провел детальное исследование математического моделирования шагового электропривода в динамических режимах. В литературе встречается множество литературы по математическому моделированию ШД в зависимости от представленных требований по конструкции электропривода [1].

1.2. Шаговый электропривод.

Электропривод, обеспечивающий преобразование числовой информации в дискретные механические положения называется шаговым. Электродвигатель с таким приводом работает от импульсных команд. Информационный сигнал управления шаговым электродвигателем поступает в распределитель импульсов в виде унитарного кода. Маломощное напряжение U_1 поступает в усилитель мощности, где преобразуется в силовой импульс тока I_1 , возбуждающий фазу электродвигателя. Очередной сигнал вызывает появление напряжения U_2 и тока I_2 , который вызывает сдвиг магнитного поля и соответствующий ему шаг ротора. То же происходит после очередного входного импульса. Далее цикл повторяется. Принцип действия самого шагового электродвигателя можно рассмотреть на его упрощенной модели. Кольцевая обмотка статора электродвигателя, поворотные щетки, связывающие отпайки обмотки с источником питания. Роль щеток могут выполнять контактные или электронные ключи. Ось щеток и ось двухполюсного ротора в исходном положении совпадают. Сдвиг щеток характеризуется определенным углом, что вызывает поворот вектора магнитного поля на этот же угол. Ротор

стремится догнать поле так, чтобы его ось совпала с осью щеток, то есть исключить динамическую ошибку. Непрерывное вращение щеток приводит к вращению ротора [8].

1.2.1. Конструкция и применение шаговых двигателей.

Шаговые электродвигатели относятся к синхронным машинам. Их можно разделить на вращающиеся, линейные и комбинированные. Во вращающихся шаговых электродвигателях катушки обмоток укладываются в пазах железа статора с угловым смещением, зависящим от числа фаз.

В соответствие с назначением электродвигателя пазы имеют различную конфигурацию. Ротор магнитоэлектрического двигателя имеет несколько пар полюсов магнитов, а индукторного большое число зубцов. Принцип работы электродвигателя: по катушке протекает ток, создавая электромагнитный поток, фиксирующий ротор по зубцам полюсного выступа. При выключении первой фазы и включении второй фазы вызывается сдвиг потока на определенный электрический угол, равный 360 градусам, деленным на имеющееся число фаз. Ротор по закону Лоренца ориентируется в пространстве магнитного поля в положение с наибольшей магнитной проводимостью по отношению ко второму полюсу, на механический шаг равный 360 градусам, деленный на число фаз и на число зубцов пассивного ротора (или в случае активного ротора на число пар полюсов). Движение ротора происходит под воздействием синхронизирующего момента, который аппроксимируется в синусоиду. То есть положению, когда зубец ротора находится под зубцом статора соответствует устойчивое положение (точка O). Точки A и B , характеризующие неустойчивое положение ротора находятся напротив паза статора. Угловые расстояния OA и OB соответствуют максимальной динамической ошибке, равной 180 электрическим градусам. А расстояние между амплитудами синхронизирующего момента равно максимальной статической ошибке 90 электрических градусов. Амплитуда синхронизирующего момента зависит от результирующего тока включенных

фаз. За счет именно динамических ошибок шаговый двигатель втягивается в синхронизм при скачках управляющих частот. Предельный скачок частоты при пуске называется частотой приемистости. При повышении частоты входных команд скорость вращения увеличивается. Дальнейший скачок частоты не обеспечивает пуск двигателя. Частота надежного запуска и есть частота приемистости. Область динамических частот шаговых электроприводов простирается от сотен герц до 2 килогерц. С уменьшением габаритов двигателей и снижением величины шага, динамические частоты увеличиваются. Сочетание малогабаритного шагового двигателя с гидроусилителем момента, позволяет одновременно расширить диапазон рабочих частот и момента. Именно поэтому в станках ЧПУ, в роботах, в нажимных винтах прокатных станов и других механизмах, где требуется сочетание высокой точности и динамических показателей применяется электрогидравлический шаговый электропривод или электропривод с силовыми шаговыми электродвигателями [8].

Блоки управления промышленным шаговым приводом со сложными алгоритмами выполняются на компактных микросхемах. Создание схем со свойствами управляемого источника тока - инвертора тока, расширило рабочие частоты до 10-20кГц, что обеспечило ускоренное вспомогательное рабочее движение на станках ЧПУ. Во многих промышленных механизмах с дискретным движением требуется исключить колебания даже на холостом ходу. Для этого созданы схемы управления, обеспечивающие старт-стопное движение. Они вырабатывают дополнительные импульсы на торможение перед подходом ротора к очередной точке устойчивости. Такое управление позволило создать печатные автоматы, графопостроители и координатографы, специальную киноаппаратуру и другие устройства без сложной быстроизнашивающейся механики [8-9].

В некоторых устройствах необходимо использовать величину шага в несколько микрон, например, в электронной технологии. Получение малых шагов за счет роста числа фаз или зубцов ограничено. Сделать это позволяет

электронное дробление самого шага. На специальной экспериментальной установке можно проследить за этим процессом. Токи в фазах меняются до установленного значения не сразу, а мелкими ступеньками или плавно по определенному закону. Соответственно происходит и плавный поворот результирующего вектора потока и угловой характеристики даже при низких частотах. На экране осциллографа можно отследить положение годографа тока. Кроме рассмотренных нами сложных шаговых электродвигателей, применяемых в устройствах ЧПУ, существуют простейшие однофазные. Их основные преимущества - простота конструкции и малые габариты, один канал связи и минимальное потребление электроэнергии. Эти электродвигатели нашли широкое применение в электронных часах, приборах времени и других системах. Пуск и однонаправленное вращение этих двигателей обеспечивают несимметричные магнитопроводы и возбуждение от постоянных магнитов. Конструкция однофазных шаговых электродвигателей проста, но разработки новых образцов осложнены наличием постоянных магнитов и малыми габаритами.

Так устроены и работают вращающиеся шаговые электродвигатели. Стремление исключить быстроизнашивающиеся дорогостоящие механические передачи вращающихся шаговых электродвигателей привело к созданию разнообразных конструкций линейных шаговых электродвигателей. Если вращающийся шаговый электродвигатель разрезать по образующей, то можно получить одностороннюю конструкцию плоского типа. Плоский, линейный шаговый электродвигатель, реализующий взаимопоступающее движение. Эту конструкцию можно преобразовать в цилиндрическую. Цилиндрические шаговые электродвигатели относятся к четырехфазным двигателям индукторного типа. Их принцип действия аналогичен вращающемуся электродвигателю, но зубцы на пористых выступах статора размещены вдоль продольной оси, а не по окружности. Это позволяет получить линейные шаги ротора индуктора. Цилиндрический шаговый электродвигатель выполнен из магнитной мягкой стали и имеет зубцы расположенные перпендикулярно его

оси. Малую величину шага в этих двигателях можно получить за счет многофазных катушечных обмоток. Гладкие концы вала индуктора укреплены в опорах скольжения или качения, что ограничивает длину хода

Принято различать шаговые двигатели и серводвигатели. Их принцип действия схож, и многие управляющие контроллеры будут работать с обоими типами двигателей. Основное отличие заключается в шаговом (дискретном) режиме работы шагового двигателя (n шагов на один оборот ротора) и плавности вращения синхронного двигателя. Серводвигатели требуют наличия в системе управления датчика обратной связи по скорости и/или положению, в качестве которого обычно используется резольвер или $\sin/\cos$ энкодер. Шаговые двигатели преимущественно используются в системах без обратных связей, требующих небольших ускорений при движении. В то время как синхронные сервомоторы обычно используются в скоростных высоко динамичных системах [8-9].

1.2. Электропривод дроссельной заслонки.

В первую очередь необходимо определиться что же такое дроссельная заслонка. В литературе чаще всего дается следующее определение, что это механический регулятор проходного сечения какого-то канала, отвечающий за изменение количества протекающей в канале среды будь то жидкость или газ. Наиболее популярным типом заслонки является дроссельный клапан, который изменяет общее количество протекающей через него среды за счет соотношения времен полного открытия и полного закрытия клапана в определенных долях. Часто это устройство называют актуатором которые имеют чрезвычайно широкое распространение как исполняющие элементы в различных дозирующих устройствах с электронным широтно-импульсным управлением [10].

Рассмотрим пример работы дроссельной заслонки на принципе работы заслонки автомобильного карбюратора.

Дроссельная заслонка карбюратора напрямую регулирует количество горючей смеси которая образуется в карбюраторе и поступает непосредственно в цилиндры двигателя внутреннего сгорания двигателя. Собственно, сама дроссельная заслонка у карбюратора с падающим потоком представляет из себя жесткую пластину которая закреплена на вращающейся оси, которая помещена в нижней части смесительной камеры. В горизонтальных карбюраторах дросселем зачастую является вертикальный шибер, который расположен в зоне малого диффузора и этот шибер регулирует его проходное сечение. Поднимаясь, он увеличивает сечение диффузора доступное для прохождения среды. Зачастую случаев он же регулирует проходное сечение главного топливного жиклера, перемещая в нём специальную регулирующую иглу переменного профиля.

В системе впрыска топлива дроссельная заслонка представляет из себя отдельный узел, стоящий в воздушном тракте последовательно отвечающий за дозирование количества воздуха на входе в коллектор двигателя. Соотношение «бензин — воздух» в цилиндре впрыскowego двигателя всегда должно поддерживаться стехиометрическим, а именно, система управления должна реагировать при работе двигателя на режимах с малой нагрузкой ограничивать не только подачу топлива, но и также отвечать за подачу воздуха.

Привод дроссельной заслонки может быть механическим и электромеханическим.

В первом случае ось дросселя поворачивается при помощи усилия ноги, прикладываемого при нажатии педали. Поворот осуществляется посредством рычажно-шарнирного устройства или тросика Боудена. Во втором случае, при использовании системы электронного управления — поворот оси дросселя осуществляется посредством шагового электродвигателя. Педаль в этом случае механически связана со специальным следящим устройством, чаще всего представленным резистором с изменяющимся сопротивлением или магнитометрическим датчиком. Эти устройства позволяют задать системе управления двигателем требуемый параметр «желаемая мощность на валу».

Заводские настройки практически любой электронной системы управления дроссельной заслонкой зачастую имеют довольно ненужные задержки по времени. Эту проблему можно решить установкой контроллера дроссельной заслонки, который посредством информации от датчика положения педали акселератора напрямую позволяет нивелировать задержку. Контроллер способен скомпилировать сигнал с гораздо большей скоростью. Время отклика дроссельной заслонки значительно уменьшается, тем самым приемистость автомобиля увеличивается [10-11].

Дроссельная заслонка также повсеместно применяется на дизельных двигателях с целью осуществления экстренной остановки двигателя. При необходимости, или в аварийной ситуации заслонка при повороте полностью перекрывает подачу воздуха в цилиндры тем самым приводя к остановке двигателя.

Дроссельные заслонки также повсеместно применяются в нефтегазовом деле, в системах подачи жидкостей и во многих других системах, где необходимо регулировать уровень подачи определенной среды.

Вывод по главе 1

В рассмотренной главе произведен анализ имеющихся исследований по тематике режимов работы шагового электропривода. Приведен список основных авторов, производящих научные исследования по тематике. Приведены теоретические выкладки по типам шаговых электродвигателей, допустимых режимах работы, конструкции. Рассматривается принцип работы дроссельных заслонок.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Допущения, принимаемые при моделировании шаговых электродвигателей.

При математическом описании моделей шаговых электроприводов все время принимается ряд общепринятых по теории электрических машин допущений. Эти допущения позволяют вместо реальной машины с достаточной требуемой в рамках рассматриваемых условий точностью исследовать идеализированную [1, 6, 9].

1. Магнитную проницаемость сердечников статора и ротора принимает равной бесконечности, это позволяет действительно однозначно определять картину поля от тока каждой обмотки и использовать принцип наложения для определения результирующего поля в зазорах при одновременном действии токов всех обмотках электрической машины. Это подразумевает, что идеализированная машина при этом принимается насыщенной, а зависимость между током электрических контуров и потокоцеплением принимается линейной. Насыщение здесь учитывается только косвенно в зависимости от выбора индуктивных параметров.
2. Следует принимать распределение полей взаимоиндукций обмоток статора и ротора, и полей самоиндукции трехфазных обмоток вдоль окружности электрической машины синусоидальным, с пространственным полупериодом, который равен полюсному делению. Получается, что в расчет идет лишь первая гармоника в указанных полях и влияние зубцовых полей в зазоре не учитывается. Эти поля обуславливаются зубчатостью статора и ротора, и наличием высших субгармоник поля, вызываемых соответствующими гармониками магнитодвижущей силой обмоток. Основанием для этого допущения

является способность трехфазной обмотки «отфильтровывать» высшие гармоники поля в зазорах. В нормально спроектированной машине удастся получить высшие гармоники ЭДС, обусловленные рядом высших гармоник поля, весьма и весьма малой амплитуды. Магнитные поля тех высших гармоник трехфазных обмоток, которые индуцируют ЭДС основной частоты, относят к полям рассеяния этих обмоток. Тем самым подразумевается также пренебрежения участия высших гармоник в формировании электромагнитного момента.

3. Магнитопровод и обмотки принимаются симметричными, т.е. магнитопровод имеет одинаковые очертания на всех полюсных делениях, а в пределах полюсного деления симметричен относительно продольных и поперечных осей. Это значит, что все фазные обмотки имеют одинаковое число витков, активные сопротивления и взаимный сдвиг магнитных осей, а распределенные вдоль окружности ротора демпферные обмотки могут быть представлены сосредоточенными короткозамкнутыми контурами в продольной и поперечных осях ротора. Отсюда следует, что достаточно рассмотреть процессы в двухполюсной машине, т.к. физические процессы, протекающие в ней и в многополюсной машине, оказываются полностью эквивалентными. Поэтому идеализированная машина принимается двухполюсной [1]
4. Для правильного и однозначного математического описания процессов, происходящих в шаговых электроприводах, необходимо задаться системой координат, а также положительными направлениями токов, вращения ротора и векторов МДС [1].

2.2. Математическая модель шагового электропривода в динамических режимах работы.

Исследования динамических режимов работы шагового электропривода дроссельной заслонки целесообразно проводить на основе математического

моделирования работы данного электропривода. Поэтому ставится задача рассмотрения математической модели шагового электродвигателя позволяющей рассматривать его функционирование в динамике. Рассмотрим структурную схему шагового электропривода заслонки, приведенную на рисунке 2.1.

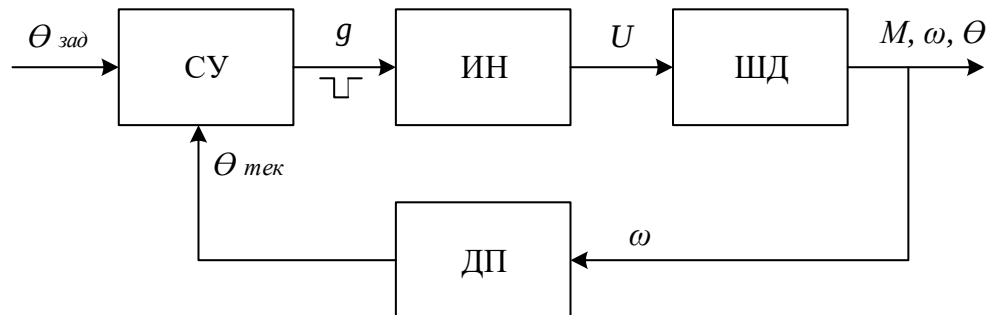


Рисунок 2.1. Структурная схема шагового электропривода заслонки

Электропривод состоит из системы управления (СУ), инвертора напряжения (ИН), шагового двигателя (ШД), датчика положения/скорости (ДП/ДС). Работа ЭП осуществляется за счет сигналов, поступающих с датчика положения в систему управления ($\theta_{тек}$), в которой СУ на основании заданного положения заслонки ($\theta_{зад}$) формирует текущее задание на управление инвертором напряжения (g). Который осуществляет коммутацию транзисторов, обеспечивая поочередное питание фаз вплоть до достижения необходимого положения заслонки [6,12].

Перейдем непосредственно к моделированию электродвигателя. Обмотку шагового двигателя представляют на схеме замещения последовательным соединением индуктивности и резистора. Кроме того, при вращении ротора в обмотках возникает ЭДС [9]. Следовательно, эквивалентная схема замещения ШД выглядит, как показано на рисунке 2.2.

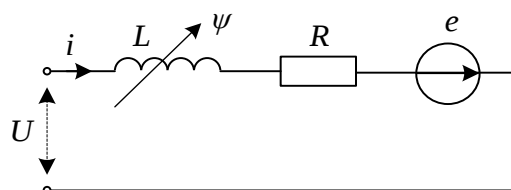


Рисунок 2.2. Эквивалентная схема замещения обмотки ШД.

Для описания динамических режимов работы шагового двигателя необходимо составить уравнения электрического равновесия для напряжений контуров тока, уравнения моментов, действующих на ротор, а также уравнение электромеханического преобразования энергии (основное уравнение движения ЭП) для данного типа привода.

Тогда исходя из законов Кирхгофа имея схему замещения (рисунок 2.2), запишем уравнения электрического равновесия напряжений и Э.Д.С. обмоток статора ШД:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_s \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + W \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{d\Psi_{M1}}{dt}; \\ u_2 &= R_s \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + W \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{d\Psi_{M2}}{dt}; \end{aligned} \quad (2.1)$$

где: u_1, u_2 – напряжения приложенные к обмоткам фаз; i_1, i_2 – токи фаз протекающие по обмоткам статора; R_s – активное сопротивление обмотки статора; $\Psi_{M1} = \Psi_M \cdot (\sin p\theta)$, $\Psi_{M2} = \Psi_M \cdot (\sin p(\theta - \lambda))$ – потокосцепления фаз; Ψ_M – максимальное значение потокосцепления создаваемое постоянным магнитом; λ – угол шага полюсов p ; θ – угол положения ротора.

$L_1 = L_0 + L \cdot \cos 2p\theta$ – индуктивность 1 фазы; $L_2 = L_0 + L \cdot \cos 2p(\theta - \lambda)$ – индуктивность 2 фазы; Для случая вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора записывается как [9]:

$$W = M \cdot \Delta\theta = M \cdot \cos 2p(\theta - \lambda)$$

Где: M – электромеханический момент двигателя формируемый фазой; W – механическая энергия, формируемая фазой на интервале $\Delta\theta$ угла поворота ротора, где: θ – угол положения ротора в радианах.

Преобразуем уравнения (2.1), перепишем слагаемое $\frac{d\Psi}{dt}$ электрического равновесия для обмотки:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi(i, \theta)}{dt} = \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial \alpha} \frac{d\theta}{dt} = L(i, \theta) \frac{di}{dt} + W(i, \theta) \cdot \frac{d\theta}{dt} = L(i, \theta) \frac{di}{dt} + K_\omega \cdot \omega,$$

где: $L(i, \theta) = \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i}$ – дифференциальная индуктивность фазы; $K_\omega = \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial \alpha}$ – коэффициент ЭДС; $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ – угловая частота вращения ротора.

Уравнение электрического равновесия фаз (2.1) в матричной форме примет вид:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_1 + \Psi_{M1} \\ \Psi_2 + \Psi_{M2} \end{bmatrix}.$$

Потокосцепления трех фаз первой секции в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1(i_1, \theta) & 0 \\ 0 & L_2(i_2, \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} K_\omega(i_2, \theta) & 0 \\ 0 & K_\omega(i_1, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{M1} \\ \Psi_{M2} \end{bmatrix}$$

Уравнения равновесия напряжений в матричной форме с учетом потокосцеплений:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1(i_1, \theta) & 0 \\ 0 & L_2(i_2, \theta) \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} K_\omega(i_2, \theta) & 0 \\ 0 & K_\omega(i_1, \theta) \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{M1} \\ \Psi_{M2} \end{bmatrix}$$

Матричные уравнения равновесия напряжений в фазах ШД в нормальной форме Коши имеют вид (2.2):

$$\begin{aligned} \frac{d[i_1]}{dt} &= [L_1]^{-1} \{ [u_1] - [R_s][i_1] - \omega[K_{\omega 2}] - [\Psi_{M1}] \}, \\ \frac{d[i_2]}{dt} &= [L_2]^{-1} \{ [u_2] - [R_s][i_2] - \omega[K_{\omega 1}] - [\Psi_{M2}] \}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

Где: $[i_1], [i_2]$ – матрицы неизвестных (токи статора); $[u_1], [u_2]$ – матрицы напряжений; $[R_s]$ – матрица активных сопротивлений; $[L_1], [L_2]$ – прямые матрицы дифференциальных индуктивностей в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[K_{\omega 1}], [K_{\omega 2}]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС в функции фазных токов и текущего положения ротора; ω – частота вращения ротора, $[\Psi_{M1}], [\Psi_{M2}]$ – максимальное значение потокосцепления создаваемое постоянным магнитом [12]:.

Электромагнитный момент, создаваемый обмотками фаз статора:

$$M_{\text{э}} = -\Psi_M \cdot i_1 \cdot \sin p\theta - \Psi_M \cdot i_2 \cdot \sin p(\theta - \lambda)$$

Уравнение движения электропривода с учетом моментов действующих на ротор:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_{\Sigma}} (M_{\text{э}} - M_c), \quad (2.3)$$

где: $J_{\Sigma} = J_p + J_n$ – суммарный момент инерции электропривода приведенный к валу ротора; p – число пар полюсов; $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ – частота вращения; $M_c = M_n + M_t + M_{\text{п}}$ – суммарный момент сопротивления двигателя; M_n – момент сопротивления нагрузки, $M_t = D \cdot \frac{d\theta}{dt}$ – момент сопротивления вязкого трения (где D – коэффициент вязкого трения), $M_{\text{п}}$ – момент трения скольжения в подшипниках.

Тогда система уравнений математической модели шагового электропривода в динамическом режиме (2.4) может быть записана на основе выражений (2.1), (2.2), (2.3):

$$\begin{cases} \frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \{ [u_1] - [R_s][i_1] - \omega[K_{\omega 2}] - [\Psi_{M1}] \}, \\ \frac{d[i_2]}{dt} = [L_2]^{-1} \{ [u_2] - [R_s][i_2] - \omega[K_{\omega 1}] - [\Psi_{M2}] \}, \\ M_{\text{э}} = -\Psi_M \cdot i_1 \cdot \sin p\theta - \Psi_M \cdot i_2 \cdot \sin p(\theta - \lambda), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_{\Sigma}} (M_{\text{э}} - M_c), \\ \theta = p \int_0^t \omega dt = p\lambda; \end{cases} \quad (2.4)$$

Где: $[i_1], [i_2]$ – матрицы неизвестных (токи статора); $[u_1], [u_2]$ – матрицы напряжений; $[R_s]$ – матрица активных сопротивлений; $[L_1], [L_2]$ – прямые матрицы дифференциальных индуктивностей в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[K_{\omega 1}], [K_{\omega 2}]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС в функции фазных токов и текущего положения ротора; ω – частота вращения ротора, $[\Psi_{M1}], [\Psi_{M2}]$ – максимальное значение потокосцепления создаваемое постоянным магнитом, $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент,

создаваемый обмотками фаз статора; M_c – момент сопротивления двигателя; J_Σ – суммарный момент инерции ЭП; ω – частота вращения ротора; θ , λ – механический и электрический углы ДПР; p – число пар полюсов [6,9]:.

На рисунке 2.3 Структурная схема математической модели шагового электропривода.

Вывод по главе 2

В рассмотренной главе приведена математическая модель шагового электропривода для исследования динамических режимов работы. Приведены наиболее часто используемые допущения при математическом моделировании шаговых электроприводов. При моделировании были использованы требуемые допущения и взяты параметры, позволяющие производить на данной модели все необходимые по техническому заданию исследования. Приведена структурная схема математической модели шагового электропривода дроссельной заслонки.



Рисунок 2.3. Структурная схема математической модели шагового электропривода.

ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДРОССЕЛЬНОЙ ЗАСЛОНКИ

3.1. Функциональная схема шагового электропривода.

В связи с тенденциями к развитию цифровой вычислительной техники разрабатываются и совершенствуются исполнительные элементы дискретного действия и, а именно, электрические шаговые двигатели. Шаговыми называют синхронные двигатели, преобразующие управляющее воздействие, заданное в виде импульсов, в фиксированный угол поворота вала или фиксированное перемещение как без датчиков обратной связи, так и с ними. Шаговые двигатели выпускаются мощностью от единиц микроватт до киловатта, т.е. в основном, это микродвигатели малой мощности [8].

В настоящее время наиболее перспективным для управления электрическими машинами является применение транзисторных преобразователей. Электропривод с транзисторным ШИП имеет по сравнению с тиристорным большие преимущества по статическим и динамическим свойствам, а поэтому приобретает все большее распространение. Этому способствует и непрерывное увеличение мощностных характеристик транзисторных ключей.

Для управления трехфазным ШД малой мощности применяются инверторы напряжения, содержащие шесть транзисторных ключей, в качестве которых используют, например, полевые транзисторы с изолированным затвором типа MOSFET. Функциональная схема шагового электропривода приведена на рисунке 3.1.

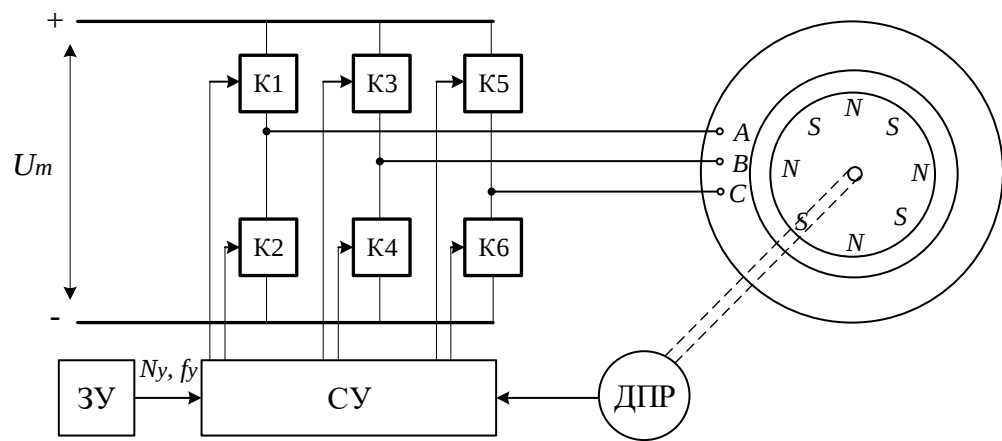


Рисунок 3.1. Функциональная схема ШЭП.

На вход преобразователя подается напряжение питания U_m каждый из силовых ключей K1-K6 представляет собой интеллектуальный ключ с драйвером и защитным диодом обратного тока (рисунок 3.2). Такие ключи позволяют реализовать с помощью системы управления инвертором (СУ) различные алгоритмы коммутации, не опасаясь появления сквозных токов в силовых стойках трехфазного инвертора.

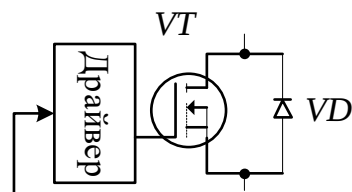


Рисунок 3.2. Схема исполнения ключа на полевом транзисторе

Система управления выполняется на элементах программируемой логики и обеспечивает работу силовых ключей по заданному закону управления. В разомкнутом ШП сигналы в СУ поступают с внешнего задающего устройства (ЗУ), импульсные сигналы, имеющие заданное число импульсов N_y , и частоту f_y изменяющуюся в соответствии с законом управления. В замкнутом шаговом электроприводе с позиционной обратной связью управляющие сигналы в СУ поступают с датчика положения ротора ДПР, в этом случае шаговый двигатель работает в режиме самокоммутации как синхронная машина (вентильный двигатель). В качестве таких датчиков чаще всего используются оптические

или же датчики Холла. Или же бездатчиковые системы по наводимой ЭДС в обмотках. Таким образом разомкнутые и замкнутые шаговые электроприводы, с точки зрения управления, отличаются соответственно независимой или зависимой от положения ротора коммутацией силовых ключей и обмоток двигателя. Рассматриваемый ШЭП относится к классу гибридных динамических систем, известных также как непрерывно-дискретные или системы с переменной структурой.

3.2. Имитационная модель шагового электропривода дроссельной заслонки.

Для исследования динамических и стационарных режимов работы шагового электропривода дроссельной заслонки воспользуемся элементами стандартной библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab Simulink. Данная модель позволит симитировать работу дроссельной заслонки при помощи гибридного шагового двигателя с управлением по задающему сигналу при помощи инвертора напряжения. В полном виде имитационная модель шагового электропривода дроссельной заслонки представлена на рисунке 3.3.

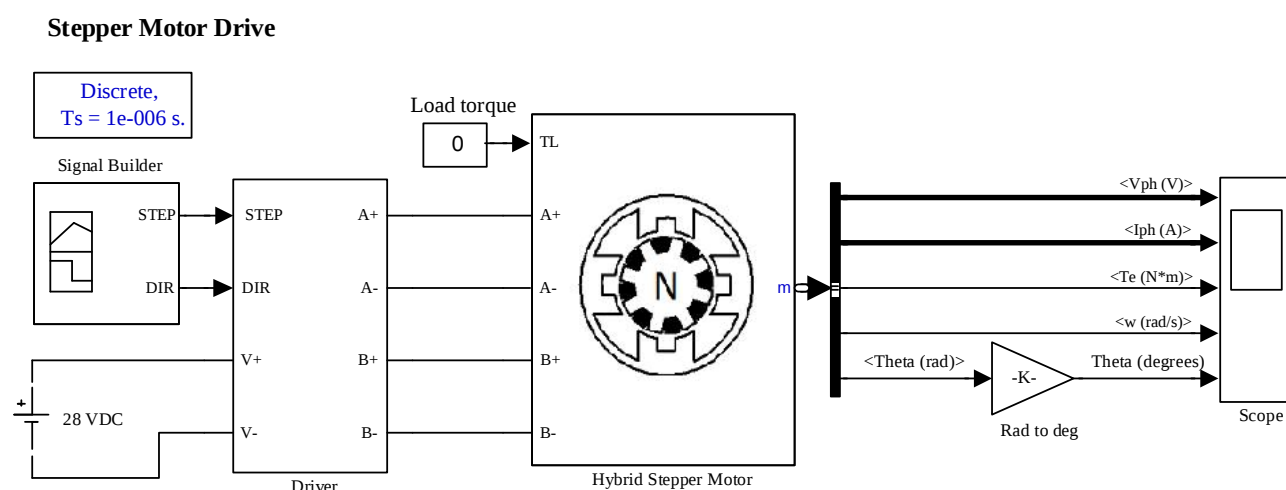


Рисунок 3.3. Имитационная модель шагового электропривода дроссельной заслонки.

При моделировании воспользуемся явным методом Рунге-Кутты высшего порядка, а именно методом Дормана-Принса 8-го порядка. В MatLab Simulink

это функция ode45. Функция ode45 предназначена для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Она применима как для решения простых дифференциальных уравнений, так и для моделирования сложных динамических систем. Шаг моделирования при таком методе стандартно взят равным $t = 10^{-6}$. Подробнее об этом можно посмотреть в блоке Discrete Powergui, являющийся блоком библиотеки SimPowerSystems.

При моделировании будет использован шаговый гибридный двухфазный двигатель из библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab Simulink. Так как дроссельные заслонки в большинстве своем (в зависимости от технического задания) используют в своем составе маломощные электродвигатели, то для моделирования будет взят шаговый электродвигатель с напряжением питания 28 В постоянного напряжения. С шагом 500 шагов на секунду с максимально допустимым током 2А. Подробнее все параметры двигателя приведены на рисунке 3.4.

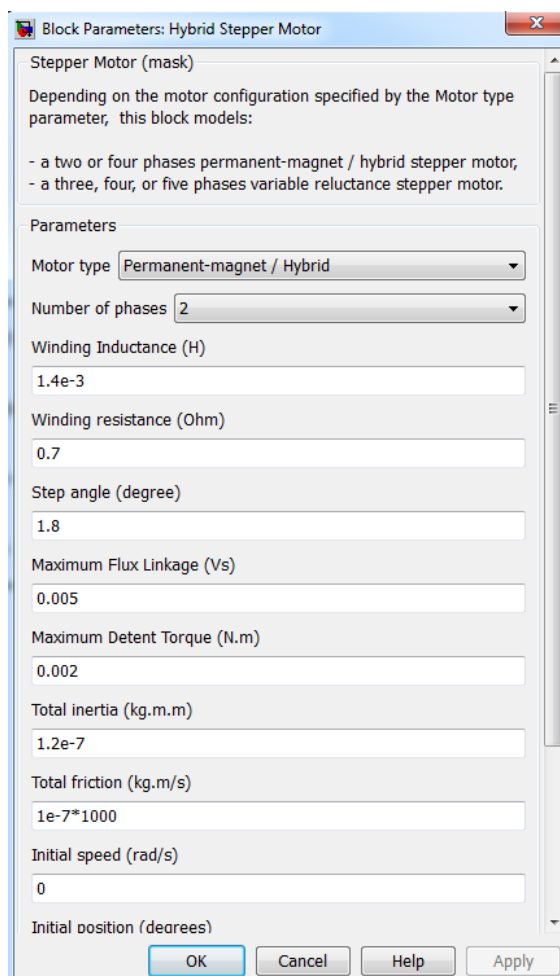


Рисунок 3.4. Параметры шагового электродвигателя.

Рассчитаем постоянные времени электропривода по имеющимся данным:

Электромагнитная постоянная времени (3.1):

$$T_{эм} = \frac{L}{R_L} = \frac{0.0014}{0.7} = \frac{[Гн]}{[Ом]} = 0.002 [с] \quad (3.1)$$

Электромеханическая постоянная времени (3.2):

$$\begin{aligned} T_{мех} &= \frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot s_H = \frac{0.12 \cdot 10^{-6} \cdot 200}{0.002} \cdot 10^{-6} = \frac{[кг \cdot м^2] \cdot [рад]}{[с] \cdot [Н \cdot м]} \\ &= 0.12 \cdot 10^{-6} [с] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Подробнее остановимся на устройстве блока Hybrid Stepper motor рисунок 3.5.

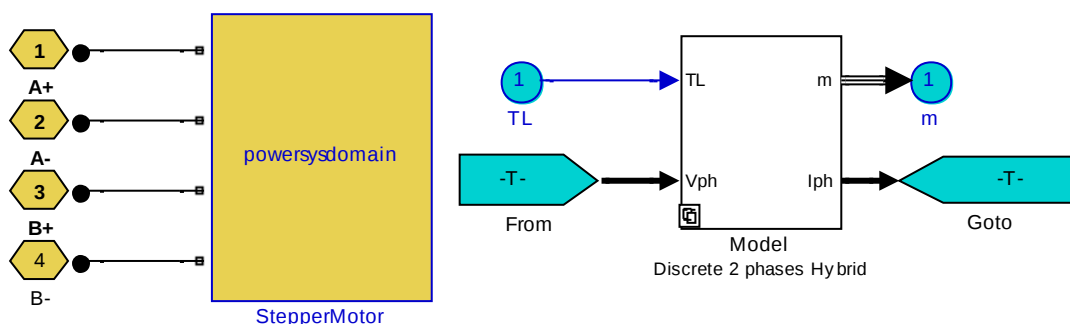


Рисунок 3.5. устройство блока Hybrid Stepper motor

Здесь имеется стандартный блок библиотек powersysdomain который позволяет имитировать коммутацию каждой фазы к инвертору напряжения, и позволяет экономить ресурсы вычислительной техники за счет того, что достаточно привести модель отдельной одной фазы, а для прочих фаз этот блок произведет моделирование по аналогии с учетом всех требуемых законов. На рисунке 3.3 приведена модель фаз электродвигателя показано подключение всех входных воздействий как это показано на общем виде модели, а именно напряжение питания, нагрузка, показано что в блоке формируются фазные токи и имеется выходная переменная m в которой собраны все полученные

характеристики для основных выходных параметров двигателя. Подробнее устройство блока Model Discrete 2 phase Hybrid показано на рисунке 3.6.

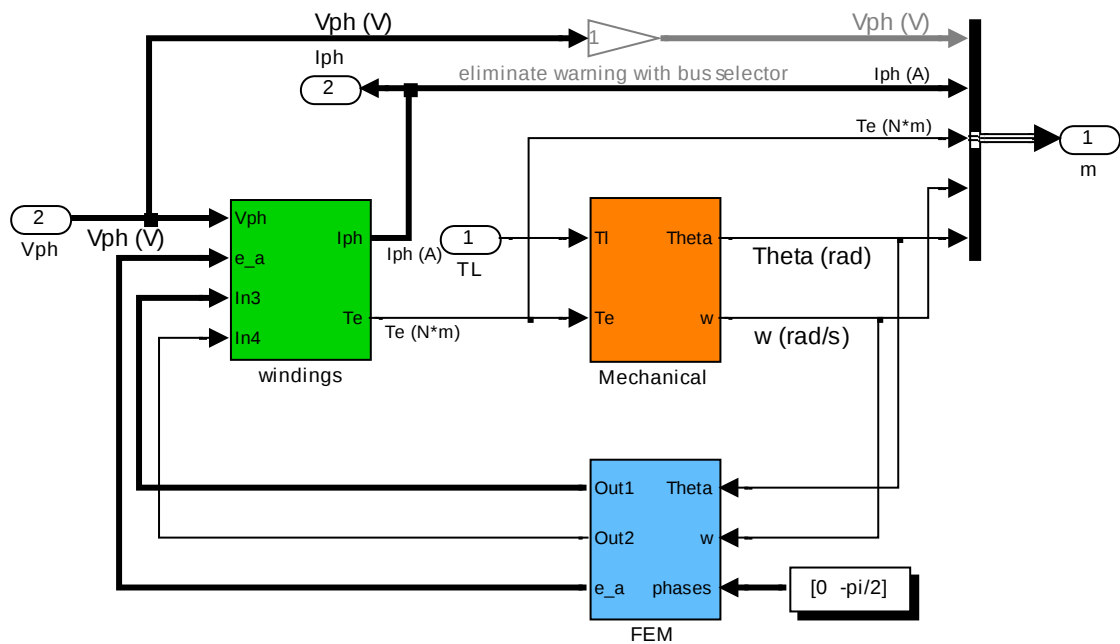


Рисунок 3.6. Устройство блока Model Discrete 2 phase Hybrid

Данный блок состоит из трех основных частей. Здесь блок, имитирующий обмотки электродвигателя, блок имитирующий механическое преобразование в двигателе, блок формирования противо-ЭДС в зависимости от текущего положения ротора. Из блока FEM в блок Windings приходят значения текущего противо-ЭДС, потокосцепления формируемого зубцами статора и угла. А также в этот блок приходит напряжение питания. На выходе блока Windings имеем значения фазного тока и текущего электромагнитного момента. Далее значение момента приходит на блок Mechanical где он с учетом момента нагрузки TL преобразуется в положение и частоту вращения. Далее значения положения и частоты вращения попадают в блок FEM где на основании заданных углов фаз над ними производятся математические операции по формированию управляющих воздействий для блока Windings. Подробнее строение блока Windings показано на рисунке 3.7.

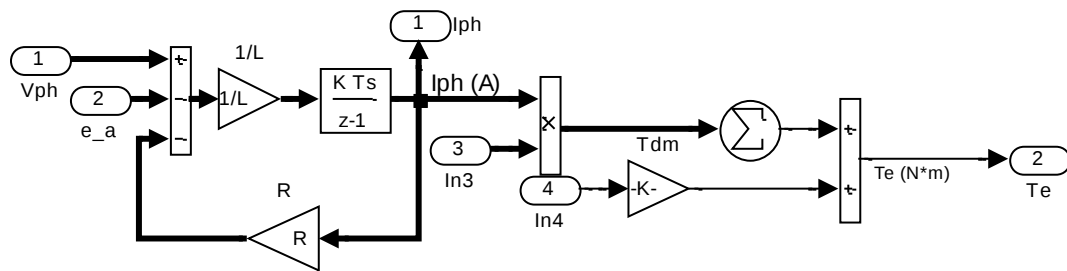


Рисунок 3.7. Устройство блока Windings

Здесь мы видим поэтапное преобразование напряжения в скупе с ЭДС в фазный ток и его дальнейший переход в электромагнитный момент при помощи данных с блока FEM, а именно потокосцепления и значений текущего угла. Далее подробнее рассмотрим блок Mechanical (рисунок 3.8).

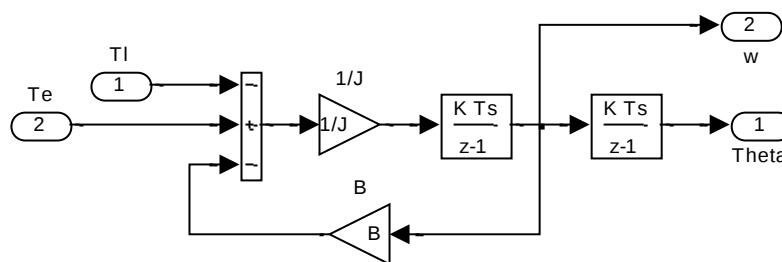


Рисунок 3.8. Устройство блока Mechanical

Здесь видим реализацию основного уравнения движения электропривода. На основании значений текущего электромагнитного момента в скупе с моментом инерции и коэффициентом трения и моментом нагрузки при помощи интегрирования и двойного интегрирования соответственно происходит переход к частоте вращения и положению. Далее подробнее рассмотрим блок FEM (рисунок 3.9).

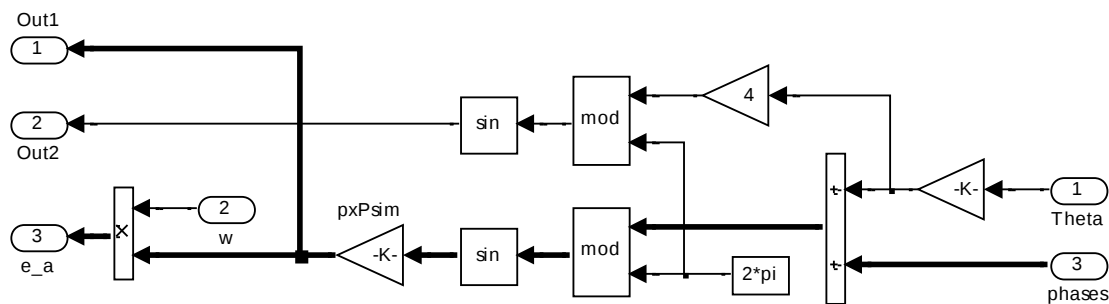


Рисунок 3.9. Устройство блока FEM

В данном блоке происходит формирование распределение управления по фазам, формируется ЭДС и считается значение по шагам электродвигателя на основании углов, положения и частоты вращения.

Далее рассмотрим блок Driver, имитирующий инвертор напряжение и драйвера управления ключами для него. Внешний вид внутреннего устройства блока Driver с рисунка 3.2, приведено на рисунке 3.10.

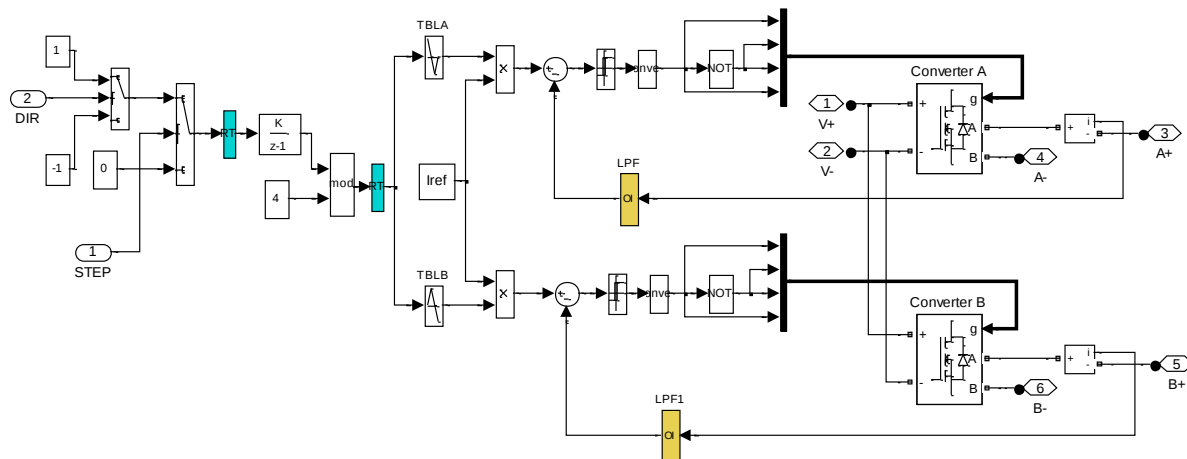


Рисунок 3.10. Внешний вид внутреннего устройства блока Driver

Здесь два полевых транзистора по схеме, как показано на рисунке 3.1, и система логического управления ими. На основании задающих управляющих сигналов, система логического управления осуществляет коммутацию ключей инвертора с нужной частотой и в нужные моменты. Подробнее о работе таких блоков можно почитать в справочной литературе или в описании библиотеки компонентов пакета MatLab Simulink [15-18]. В блоке Signal Builder (рисунок 3.1) задаются оператором управляющие сигналы как показано на рис 3.11.

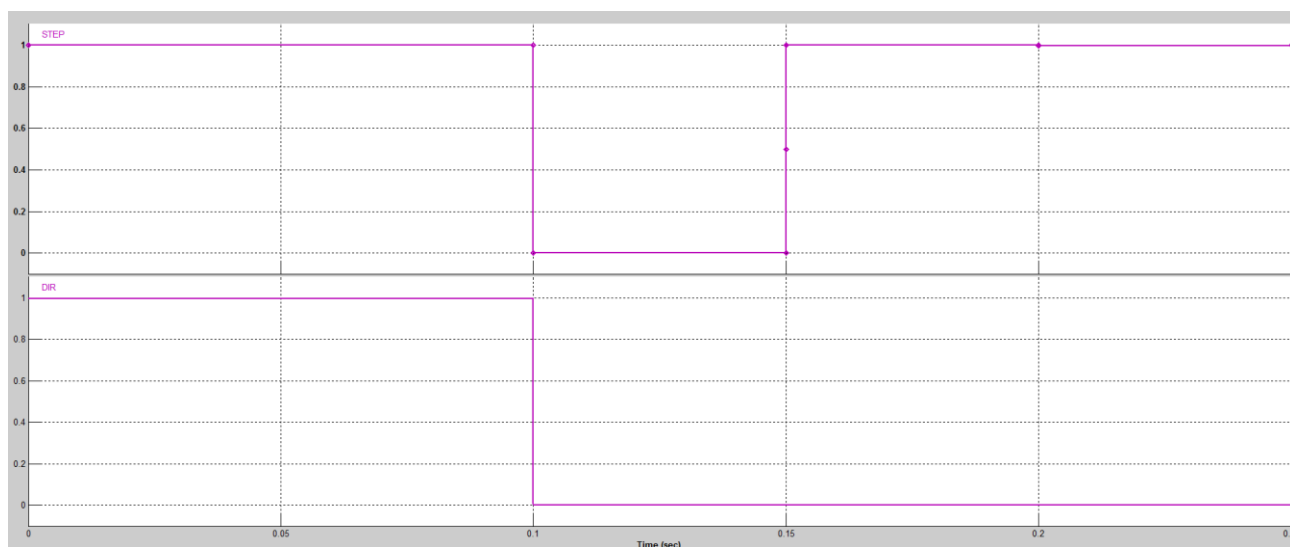


Рисунок 3.11. Сигналы задания в блоке Signal Builder

Для дроссельной заслонки характерны три основных переходных режима работы электродвигателя, а именно открытие заслонки, закрытие заслонки, изменение уровня открытия заслонки с одного на другой. В последующей главе рассмотрены все эти режимы и приведены примеры их имитационного моделирования.

3.2. Результаты моделирования переходных режимов электропривода дроссельной заслонки

Произведем моделирование режима открытия заслонки. Для этого на в блоке Signal Builder зададим необходимую кривую задания как показано на рисунке 3.12. Как видно из рисунка 3.12, имеется два сигнала. Верхний сигнал отвечает за запуск электродвигателя в требуемый момент времени с необходимой мощностью. Для запуска на номинальной мощности сигнал принимает значение 1, соответственно 0 это не работающий двигатель. Изменяя значения от 0 до 1 можно регулировать мощность и скорость с которой электродвигатель будет обрабатывать заданный сигнал за заданный участок времени. Нижний сигнал задает направление вращения электродвигателя. При единичном сигнале направление прямое (заслонка открывается), при нулевом соответственно наоборот (заслонка закрывается).

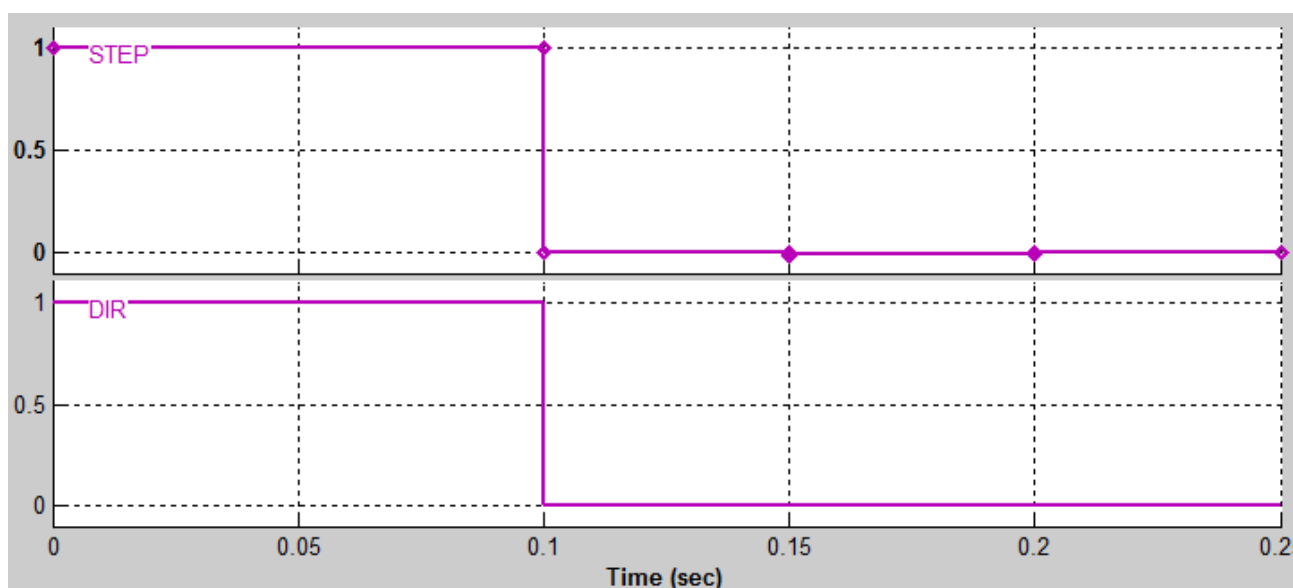


Рисунок 3.12. Задание на открытие заслонки.

Ниже приведены характеристики на выходе электропривода при открытии заслонки. А именно кривые фазных токов (рисунок 3.13), кривая электромагнитного момента (рисунок 3.14), характеристика частоты вращения ШД (рисунок 3.15), и кривая показывающая отработку сигнала задания, а именно положение заслонки (рисунок 3.16).

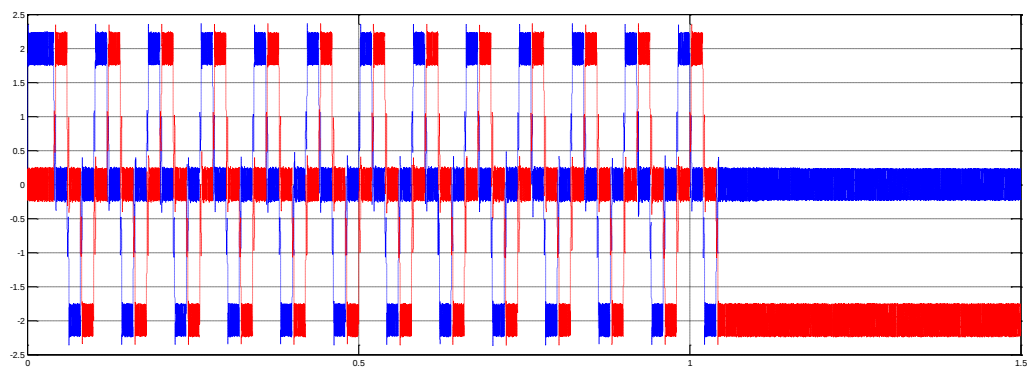


Рисунок 3.13. Кривая фазных токов шагового электропривода для первого случая.

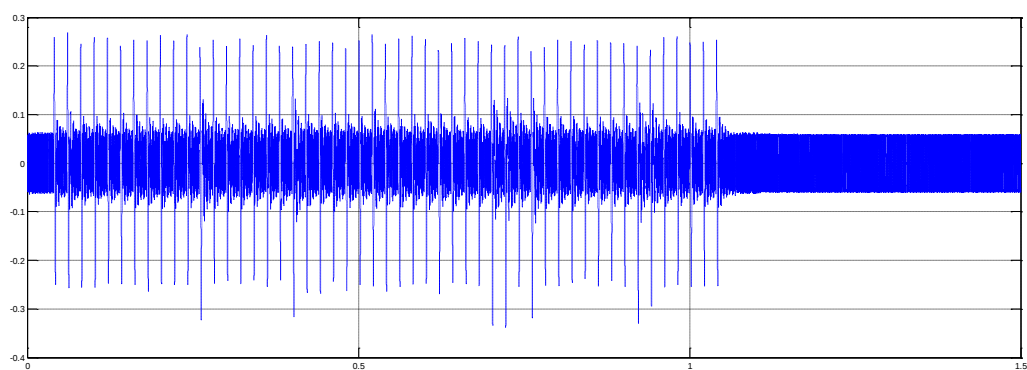


Рисунок 3.14. Кривая электромагнитного момента шагового электропривода для первого случая.

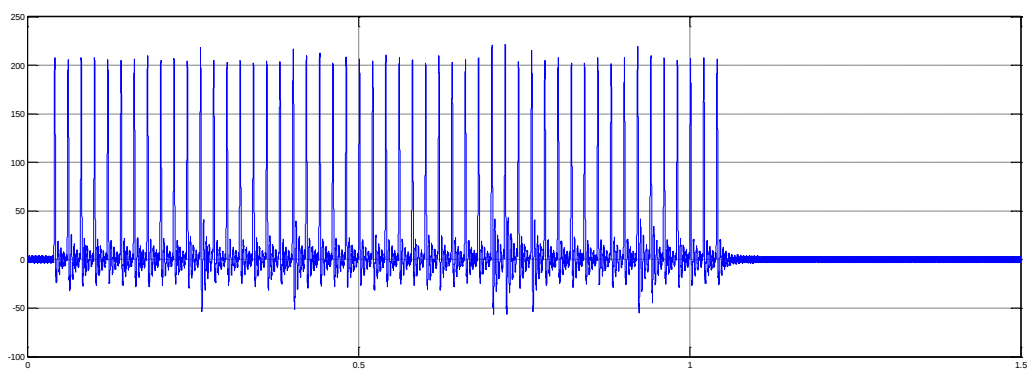


Рисунок 3.15. Кривая частоты вращения шагового электропривода для первого случая.

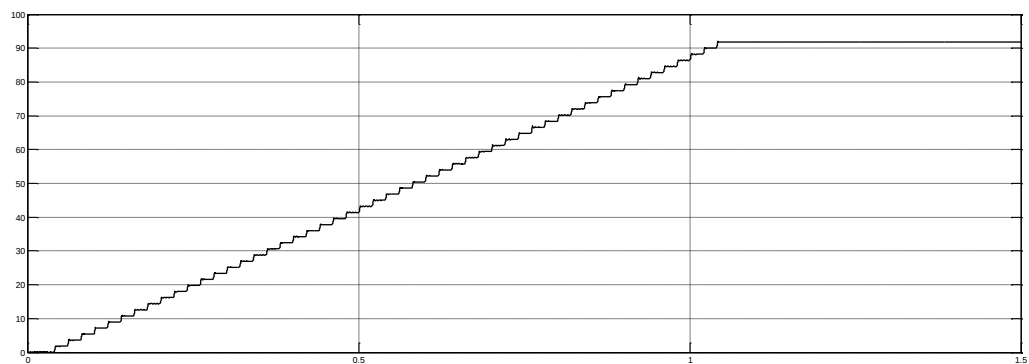


Рисунок 3.16. Обработка задания на открытие заслонки для первого случая.

Как видно из приведенных выше графиков (3.12 - 3.16) в момент времени 0 происходит запуск электродвигателя, и задание на работу в прямом направлении формируется до момента времени 0,1 затем двигатель останавливают, и заслонка остается в текущем, открытом, состоянии.

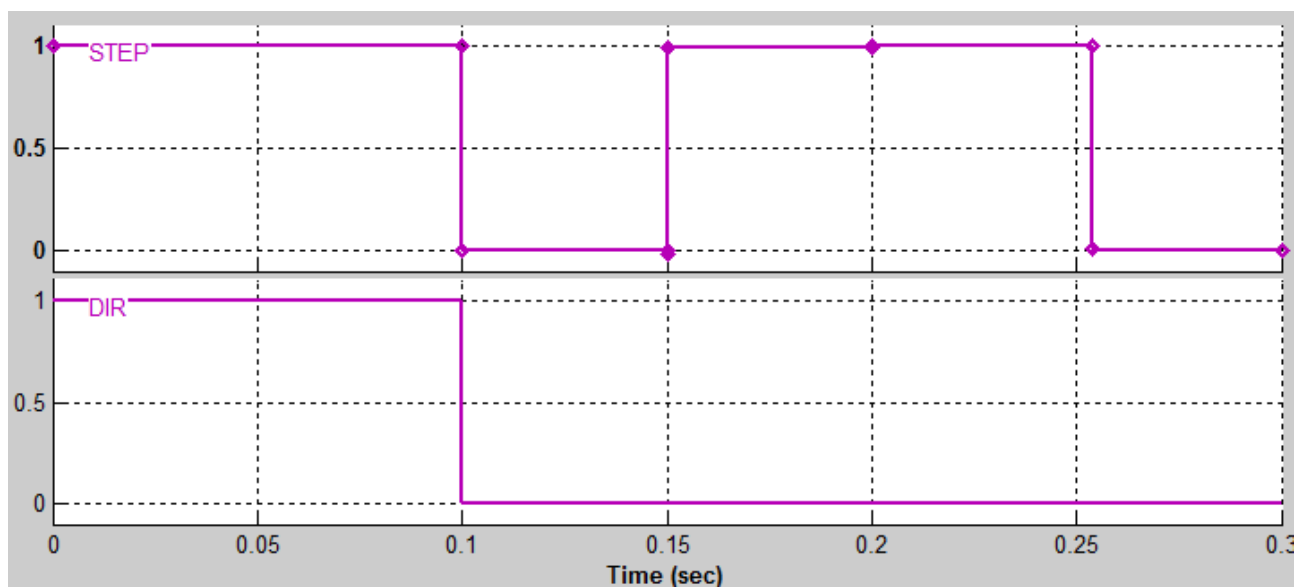


Рисунок 3.17. Задание на открытие и дальнейшее закрытие заслонки.

Далее приведем пример поэтапного открытия и дальнейшего закрытия дроссельной заслонки. С момента времени 0 происходит запуск электродвигателя, и задание на работу в прямом направлении формируется до момента времени 0,1 затем двигатель останавливают, и заслонка остается в текущем, открытом, состоянии. После чего в момент времени 0,15 оператор меняет задание на закрытие заслонки и сохраняет его таким до момента времени 0,255 до полного закрытия заслонки. Ниже приведены характеристики

на выходе электропривода при открытии и дальнейшем закрытии заслонки. А именно кривые фазных токов (рисунок 3.18), кривая электромагнитного момента (рисунок 3.19), характеристика частоты вращения ШД (рисунок 3.20), и кривая показывающая отработку сигнала задания, а именно положение заслонки (рисунок 3.21).

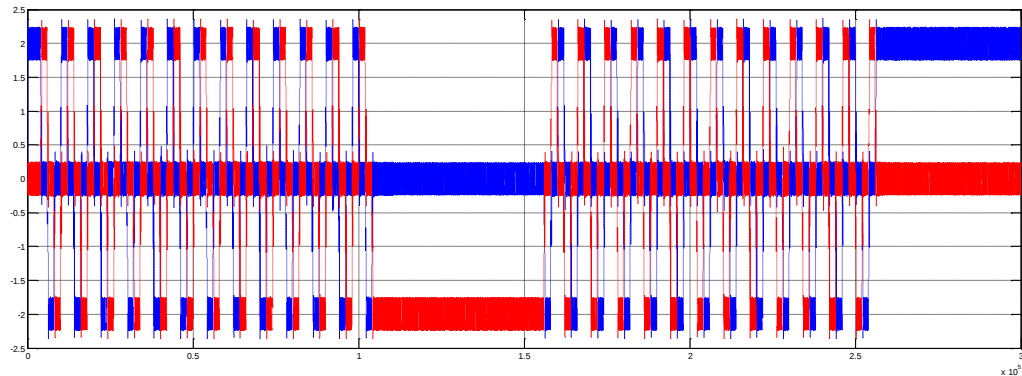


Рисунок 3.18. Кривая фазных токов ШЭП для второго случая.

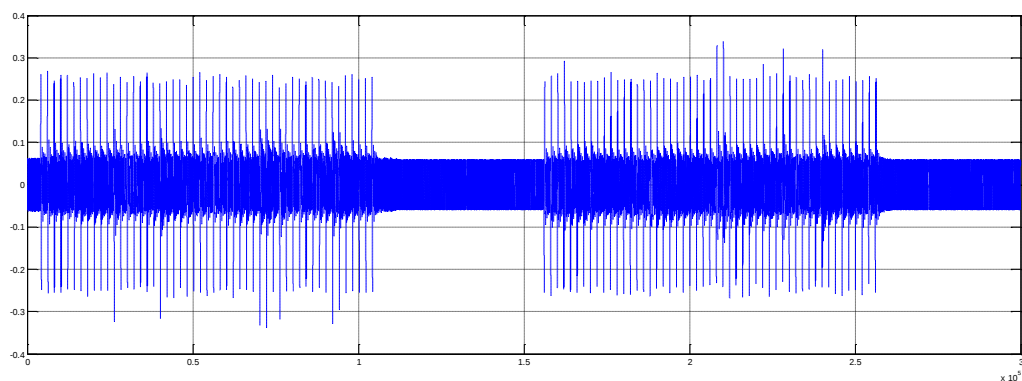


Рисунок 3.19. Кривая электромагнитного момента ШЭП для второго случая.

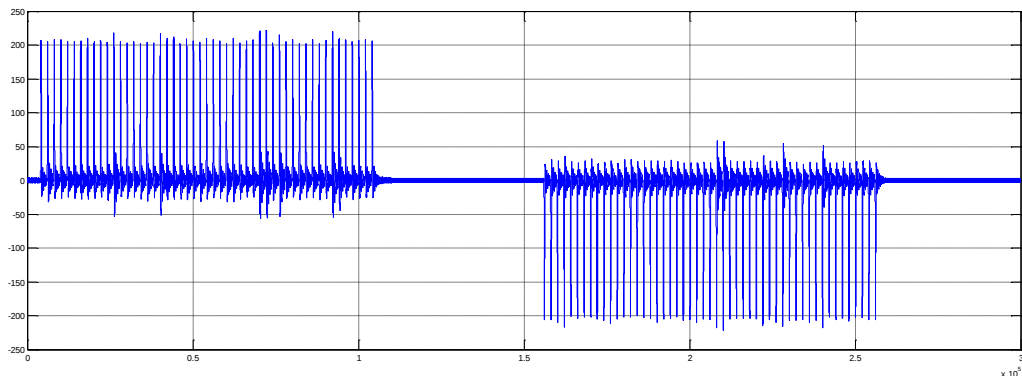


Рисунок 3.20. Кривая частоты вращения ШЭП для второго случая.

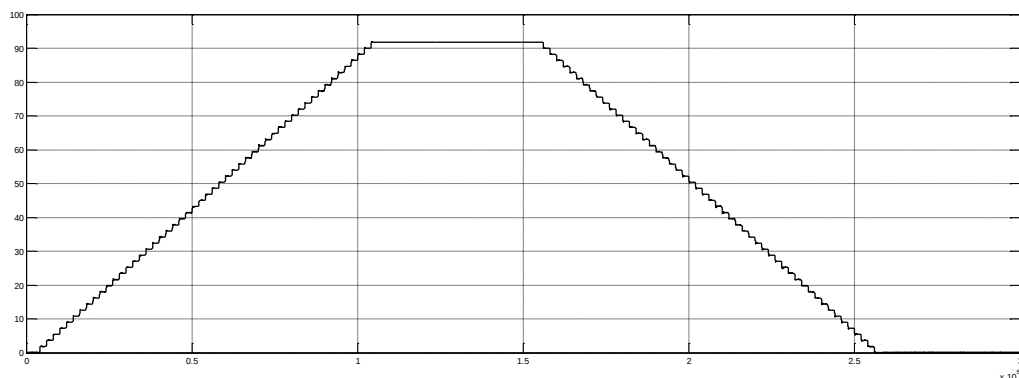


Рисунок 3.21. Обработка задания на открытие и закрытие заслонки для второго рассматриваемого случая.

Далее рассмотрим пример поэтапного произвольного управления дроссельной заслонкой. С момента времени 0 происходит запуск электродвигателя, и задание на работу в прямом направлении формируется до момента времени 0,1 затем двигатель останавливают, и заслонка остается в текущем, открытом, состоянии. После чего в момент времени 0,15 оператор меняет задание на закрытие заслонки и сохраняет его таким до момента времени 0,2 до частичного закрытия заслонки, затем задается управление по постепенному закрытию заслонки до необходимого уровня и в момент времени 0,25 двигатель останавливают тем самым фиксируя положение заслонки (рисунок 3.22). Ниже приведены характеристики на выходе электропривода при текущем управлении заслонки. А именно кривые фазных токов (рисунок 3.23), кривая электромагнитного момента (рисунок 3.24), характеристика частоты вращения ШД (рисунок 3.25), и кривая показывающая отработку сигнала задания, а именно положение заслонки (рисунок 3.26).

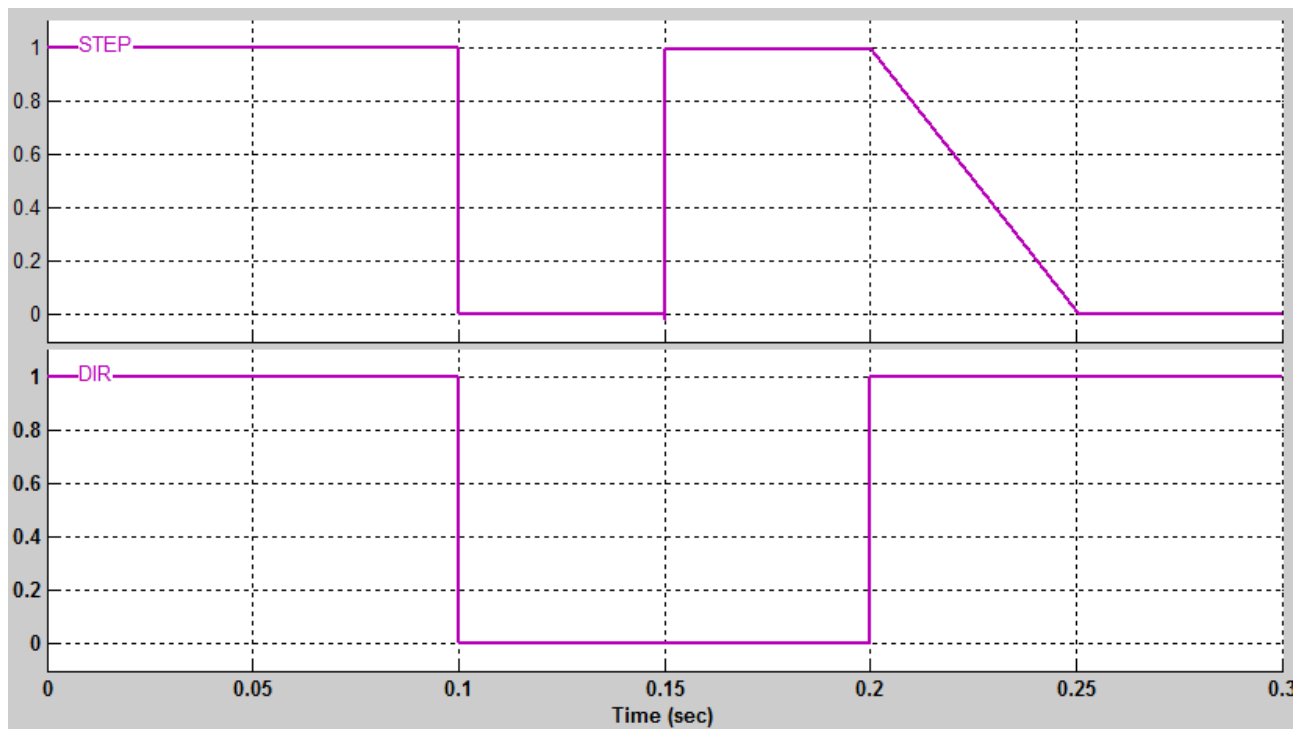


Рисунок 3.22. Задание управления заслонкой по произвольному закону.

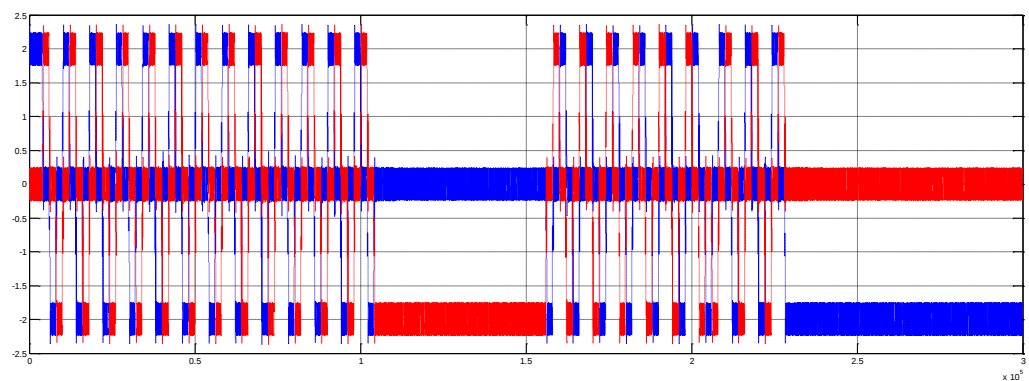


Рисунок 3.23. Кривая фазных токов ШЭП для третьего случая.

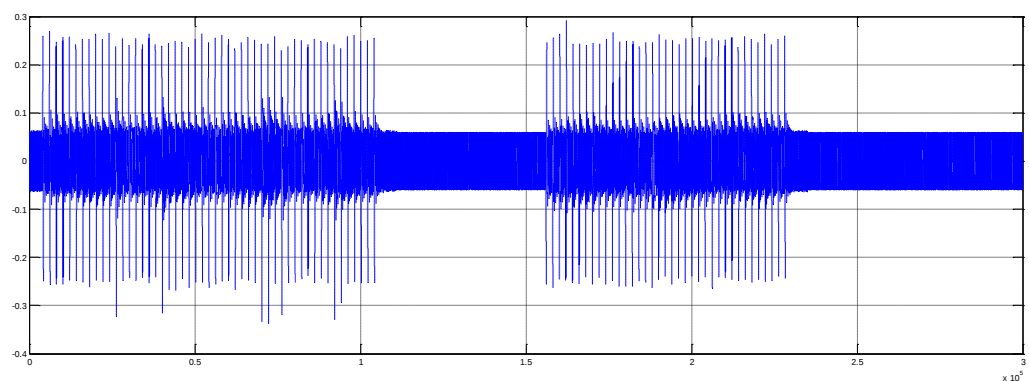


Рисунок 3.24. Кривая электромагнитного момента ШЭП для третьего случая.

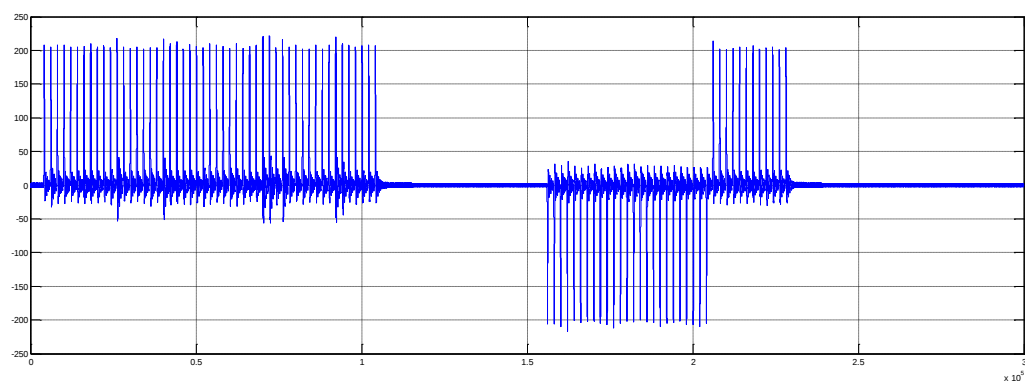


Рисунок 3.25. Кривая частоты вращения ротора ШЭП для третьего случая.

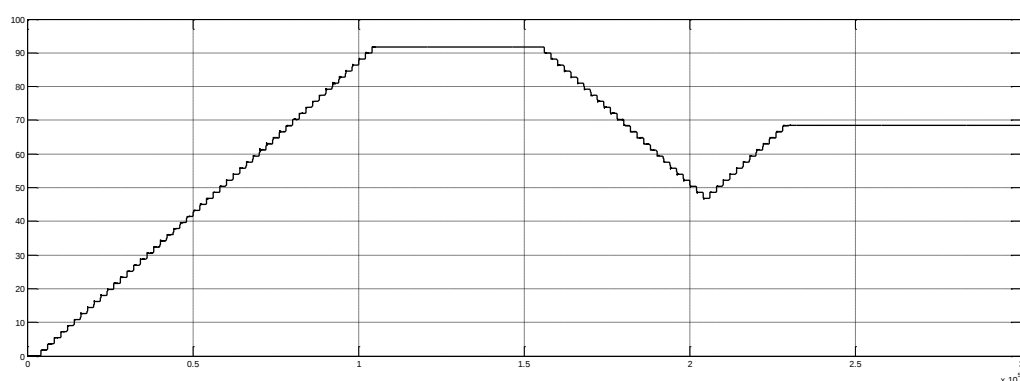


Рисунок 3.26. Кривая отработки задания по управлению дроссельной заслонки для третьего случая.

Тем самым можно отметить, что при помощи приведенной имитационной модели шагового электропривода дроссельной заслонки возможно управлять заслонкой по любому необходимому заданию. Исследовать характеристики переходных процессов в динамических и статических режимах работы.

Вывод по главе 3

В рассмотренной главе приведена функциональная схема исследуемого шагового электропривода дроссельной заслонки. Разработана и рассмотрена имитационная модель шагового электропривода дроссельной заслонки в программной среде MatLab Simulink. Произведено рассмотрение всех блоков, входящих в ее состав и приведен принцип работы данных блоков. Проведено имитационное моделирование нескольких режимов работы дроссельной заслонки, а именно открытие, закрытие и переход с одного устойчивого состояния открытия заслонки на другое. Показано, что данная модель позволяет имитировать работу заслонки в различных режимах и исследовать выходные характеристики тока, электромагнитного момента, частоты вращения и отработки положения вала во всех как устойчивых, так и переходных режимах работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Семисалов В.В. Разработка математической модели для исследования динамических режимов работы шагового электропривода с трехфазным инвертором напряжения: дис. канд. тех. наук. Московский авиационный институт, г. Москва, 2005 г.
2. Адволоткин И.П., Гращенков В.Т., Лебедев Н.И. и др. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Энерготомиздат, 1984. – 160 с.
3. И. Бут Д.А. Основы электромеханики: Учеб. пособ. М.: МАИ, 1996. - 468 с.12
4. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем – Спб.: БХВ-Петербург, 2002, - 464 с.
5. Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А., Цаценкин В.К. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. / Под общ. ред. Чиликина М.Г. –М.: Энергия, 1971. – 624 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. –М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
7. В.Б. Самородов, Н.А. Митцель. Исследование свойств шагового электропривода как системы управления двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссией. Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774. г.Харьков, 2014 г.
8. Колодийчик В.П. Шаговые двигатели. Принцип действия. Различные способы управления. // Электротехнический рынок №12, декабрь 2007 г.
9. Соколов А.В. Динамические модели шаговых электродвигателей. // Южно-Уральский государственный университет. Серия «Энергетика», выпуск 17, г. Челябинск 2012 г.
10. Юрген Казердорф. Карбюраторы зарубежных автомобилей (Vergaser testen und einstellen). — 2-е, испр. и доп. — М.: За рулем, 2000. — 192 с.

11. А. В. Дмитриевский, В. Ф. Каменев. Карбюраторы автомобильных двигателей. — М.: Машиностроение, 1990. — 223 с.
12. Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle/ Acta Polytechnica Hungarica. №1, 2010.
13. И.А. Розаев, Однокопылов Г.И, «Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы» // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 - №. 4. - С. 138-143
14. Денисов В.А., Жуков А.В. «Математическое моделирование работы шагового двигателя в составе мехатронного модуля компенсации износа режущего инструмента. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т 14, №6, 2012 г.
15. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. BocaRaton: CRC Press, 2001.
16. Krishnan R., Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Fellow, Center for Organizational and Technological Advancement (COTA) Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, TK2787 .R35 2001, ISBN 0 - 8493-0838-0
17. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M., Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2011.
18. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLab Simulink. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.
19. Браун М., Раутани Дж., Пэтил Д. Диагностика и поиск неисправностей электрооборудования и цепей управления. — М.: Изд. «Додэка - XXI», 2007. — 328 с.: ил. (Серия «Силовая электроника»).

- 20.Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
- 21.Bruniaux, P. Optimal control of stepper motor with definition of safety factor [Text] / P. Bruniaux, V. Koncar // Motion Control for Intelligent Automation. – 1992. – Vol. 1. – P. 27–29. doi: 10.1016/b978-0-08-042058-5.50065-4
- 22.William, A. Motion Control With Stepper Motors [Text] / A. William // The System Engineers Handbook. – 2002. – Vol. 5. – P. 477–493. doi: 10.1016/b978-0-08-051902-9.50049-2