МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАГИСТРАТУРА

Кафедра «Электроэнергетика»

Магистерская диссертация

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И УСТРОЙСТВА КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

6N0718 «Электроэнергетика»

Исполнитель_____А.Д. Умурзакова (подпись, дата)

Научный руководитель

к.т.н., доцент _____ В.Ю. Мельников (подпись, дата)

Допущен к защите: Зав. кафедрой «Электроэнергетика» д.т.н., профессор _____ Е.В. Иванова (подпись, дата)

Павлодар, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

| Введение 4 | |
|--|----|
| 1 Обзор исследований и разработок в области | |
| асинхронного электропривода | 7 |
| 2 Математическое описание модели асинхронного | |
| электродвигателя для контроля выходных координат | 12 |
| 2.1 Выбор математического описания модели | |
| асинхронного электродвигателя | 12 |
| 2.2 Реализация модели асинхронного электродвигателя | |
| для контроля выходных координат в компьютерной | |
| среде моделирования MATLAB | 17 |
| 3 Разработка алгоритмов и способов косвенного контроля | |
| выходных координат АДКР | 24 |
| 3.1 Разработка алгоритма и способа косвенного | |
| контроля электромагнитного момента АДКР | 24 |
| 3.2 Разработка алгоритма и способа косвенного | |
| контроля угловой скорости АДКР | 33 |
| 4 Системы имитационного моделирования АДКР | 50 |
| 4.1 Описание схемы имитационного моделирования АДКР | 50 |
| 4.2 Моделирование системы косвенного контроля | |
| координат АДКР | 59 |
| Заключение | 64 |
| Список использованных источников | 65 |

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- АДКР асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором
- УКК устройство косвенного контроля
- *W_K* скорость вращения координатной системы;
- *L*_s полная индуктивность обмотки статора;
- *L*[']_r приведенная полная индуктивность обмотки ротора;
- *L_µ* взаимная индуктивность обмотки статора и ротора;
- *L_s* индуктивность обмотки рассеяния обмотки статора;
- $L'_{r\sigma}$ приведенная индуктивность рассеяния обмотки ротора;
- R_{s}, R_{r}' соответственно активные сопротивления обмоток статора и приведенное ротора;
- $\psi_{\alpha s}, \psi_{\beta s}, \psi_{\alpha r}, \psi_{\beta r}$ потокосцепления статора и ротора по осям α и β ;
- $U'_{\alpha s}, U'_{\beta s}, U'_{\alpha r}, U'_{\beta r}$ -напряжения статора и приведенные напряжения ротора по соответствующим осям;
- $I'_{\alpha s}, I'_{\beta s}, I'_{\alpha r}, I'_{\beta r}$ токи статора и приведенные токи ротора по соответствующим осям;
- *p*^{*n*} число пар полюсов;
- М_э электромагнитный момент, развиваемый двигателем;
- *M*_c момент статического сопротивления;
- *J* момент инерции вращающихся частей;
- ω угловая скорость ротора.
- f частота основной гармоники напряжения питания асинхронного электродвигателя, Гц;
- *r*_{*l*(20)} активное сопротивление проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя при температуре 20 ^{*o*}*C*, Ом (паспортные данные);
- α температурный коэффициент, характеризующий свойства проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, 1/°C;
- t температура проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, ${}^{o}C$.

В диссертации использованы традиционные для литературы по электроснабжению единицы измерения: А, В, Ом, кВт, Гн, с.

введение

Асинхронные электродвигатели составляют основу электропривода большинства механизмов, используемых во всех отраслях народного хозяйства, и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую.

Важное значение асинхронные машины завоевали благодаря своей способности автоматически изменять момент вращения в соответствии с изменением момента нагрузки и высокому коэффициенту полезного действия, с одной стороны, и относительной простоте и низкой стоимости в сочетании с высокой эксплуатационной надежностью при минимальном обслуживании – с другой.

В настоящее время важными являются вопросы внедрения управляемых асинхронных электроприводов на промышленных объектах. Во многом это связано с необходимостью обеспечения сложных требований технологического процесса, а также с развиваемой в Казахстане и за рубежом концепцией энергосбережения в промышленной и муниципальной сфере.

Одним из путей повышения эффективности использования промышленных установок является применение регулируемых асинхронных электродвигателей, что позволяет уменьшить энергопотребление, увеличить производительность и повысить надежность асинхронного электродвигателя, электропривода и всей установки в целом.

В регулируемых электроприводах технологических механизмов и комплексов практически в любой отрасли промышленности и транспорта для создания управляемых энергоэффективных систем актуален контроль координат.

Обеспечение требуемых параметров современного технологического процесса достигается с помощью регулирования частоты вращения приводных двигателей с высокой статической и динамической точностью. Управление по заданному алгоритму в функции параметра технологических датчиков требует реализации быстродействующего управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя и широко востребовано в приводах конвейеров, транспортеров, дозаторов, подъемных механизмов И робототехнических комплексов.

Особенное внимание в общемировой практике получает вопрос эффективного управления уже действующими асинхронными электродвигателями. При этом преобразователь должен работать с двигателями различных серий и производителей, обеспечивая устойчивость и качество регулирования при большом разбросе параметров.

Наиболее часто необходим контроль параметров движения рабочих органов, а именно – скорости перемещения и развиваемом усилии. В большинстве случаев для вращательного движения используют известные датчики скорости и момента, реализованные на основе дополнительных, встраиваемых в электродвигатель или механически присоединенных к нему микромашин постоянного или переменного тока, а также других специальных устройств. Но эти устройства имеют высокую стоимость и сложность конструкции: требуется тщательная установка датчиков И ИХ механическое сочленение С вращающимися частями электропривода[6, 8, 10, 33, 35, 56, 63].

В связи с вышеизложенным, разработка алгоритма и устройства косвенного контроля выходных координат асинхронного электродвигателя является своевременной, а тема диссертации – актуальной.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: использованием фундаментальных положений теоретических основ математики, электротехники, электрических машин, методов математического моделирования в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена удовлетворительным совпадением результатов имитационного моделирования.

На защиту выносятся:

- алгоритм и устройство косвенного контроля электромагнитного момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;

- алгоритм и устройство косвенного контроля угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в том, что разработаны:

- алгоритм и способ косвенного контроля электромагнитного момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;

- алгоритм и способ косвенного контроля угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Практическая ценность работы:

Алгоритмы, устройство, способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, позволяют рассчитывать выходные координаты асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии Прииртышья», Павлодар 2001 г., на международной научно-практической конференции «Социальные-

экономические региона: потенциал, проблемы аспекты развития И перспективы», Павлодар 2002г., на международной научно-практической конференции «Металлургия и энергетика Прииртышья», Павлодар 2003 г., на международной научно-практической конференции «Экологические проблемы и перспективы применения чистых технологий для устойчивого развития регионов», Павлодар 2005г., на международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке: динамика развития в Евразийском пространстве», Павлодар 2006 г., на международной научно-«Энергетика, практической конференции экология, энергосбережение, транспорт», Омск 2007г., на международной научно-практической конференции ресурсосберегающие технологии – основа «Энерго-. инлустриально – инновационного развития», Павлодар, 2008 г., на международной конференции «LifeIT2009: IT meets environmental and sustainable energy technologies», Hagen, Германия, 2009. на международной научно-практической конференции «Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы», Павлодар, 2009 г., на Международной научно-практической конференции «Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы», Павлодар, 2009, на XVI Всероссийской научнотехнической конференции «Энергетика: Экология, надежность, безопасность», Томск, 2010 г., на региональной научно-технической конференции молодых vченых. студентов, аспирантов (с международным участием) «Новые технологии на транспорте в энергетике и строительстве», Омск, 2010 г., на II Международной научно-практической конференции ««Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве», Павлодар, 2011 г.

1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Современный асинхронный электропривод представляет собой сложное электротехническое устройство, вобравшее в себя новейшие достижения в теории и практике создания микропроцессоров, силовых полупроводниковых приборов, защиты от помех, программных наработок в области управления и интерфейсов, а также создания надежных и высокоэффективных электродвигателей.

В настоящее время для управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором применяют ряд установившихся способов, существенно отличающихся по качеству регулирования, стоимости и сложности технической реализации. Кроме того, при реализации каждого способа могут быть использованы специфические приемы и методы уточнения базовых принципов регулирования. Выбор способа управления является важной задачей, позволяющей создавать электроприводы переменного тока с требуемыми характеристиками и минимальной стоимостью.

Скалярное U/f управление широко применяется в современных частотных преобразователях, так как позволяет реализовать регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с минимумом затрат. Диапазон регулирования частоты вращения невысок и составляет от 1:40 до 1:70. Точность поддержания заданной частоты вращения составляет 2..3 %. При работе с компенсацией частоты скольжения точность может достигать 0.5... 1 %. Алгоритмы скалярного управления не позволяют реализовать контроль И управление вращающим моментом электродвигателя, а также режим позиционирования. Наиболее эффективная область применения данного способа управления: вентиляторы, воздуходувки и насосы [34, 21].

Для создания в фазах двигателя требуемого напряжения применяют ряд программных и аппаратных способов, основанных на принципе широтноимпульсной модуляции (ШИМ): шестипозиционная коммутация силовых ключей, синусоидальная ШИМ, модуляция пространственного вектора напряжения, расширенная модуляция пространственного вектора напряжения (12-тактная), гистерезисное управление. Наиболее эффективные из отмеченных методов нашли применение в векторном управлении и прямом управлении моментом [28].

Векторное управление по потокосцеплению ротора. Для динамичного управления асинхронного двигателя наиболее распространен способ ориентированного по потокосцеплению ротора векторного управления. Применение данного способа впервые позволило полноценно реализовать управление скоростью и моментом асинхронного двигателя и получило первую реализацию в системе «Трансвектор» фирмы Siemens. Преимуществом метода является возможность раздельного управления потоком и моментом асинхронного электродвигателя в координатных

осях Парка-Горева, связанных с потокосцеплением ротора, существенно приближая принципы регулирования к электроприводу постоянного тока [55]. Метод основан на разделении контуров поддержания постоянства потокосцепления ротора и регулирования момента, создании подчиненных контуров. При этом переменные электродвигателя меняются не по гармоническому закону неподвижной системы координат, являются псевдопостоянными величинами, исчерпывающей а характеристикой которых является знак и текущее значение. Метод векторного управления позволяет поддерживать частоту вращения с точностью 0.01 % и электромагнитный момент с точностью 3...5 %. Перегрузочная способность систем векторного управления достигает 150...200 %. Следует отметить, что диапазон регулирования скорости в открытых и замкнутых системах векторного управления существенно отличается. В замкнутых системах векторного управления он достигает 1:10000, в то время как в бездатчиковых системах он значительно меньше и составляет 1:200.

Применение датчиков скорости вращения ротора позволяет организовать сравнительно высококачественное И алгоритмически простое управление асинхронного двигателя. Однако наличие датчиков скорости существенно ухудшает эксплуатационные характеристики электропривода. В с связи ЭТИМ промышленными предприятиями широко востребованы инверторы, позволяющие регулировать частоту вращения при отсутствии датчика скорости или положения, когда необходимая информация вычисляется косвенными методами. В последнее время уделялось большое внимание разработке алгоритмов векторного управления с использованием лишь датчиков тока и напряжения в сети питания АД или, вообще, с использованием лишь датчиков тока [20]. Эта задача существенно сложнее по сравнению с управлением с использованием датчиков скорости. Существуют различные методы вычисления и их оптимизация, а также разработка новых представляет собой широкое поле для исследователей. При этом прорабатываются как базовые принципы расчета, так и их техническая и программная реализация.

Сравнительно простой метод вычисления угловой скорости можно получить на ЭДС основании c использованием асинхронного двигателя Вследствие недостаточной точности простых алгоритмов были разработаны более точные, но более сложные, методы. В них задача решается с помощью различных типов наблюдателей. В работах [20] используются наблюдатели на скользящих режимах. В работе [74] применен наблюдатель потокосцепления статора, с помощью которого вычислить скорость ротора. Широкое распространение для оценки можно потокосцепления и скорости ротора получили системы типа MRAS [75], где используются два векторных уравнения потокосцепления ротора, одно из которых является базовой, а второе - настраиваемой моделями. Близкой к MRAS является система, нашедшая применение в Японии [73].

К системам типа MRAS примыкают адаптивные наблюдатели потокосцепления и скорости [72], где базовой моделью является сам асинхронный двигатель, а настраиваемой моделью является наблюдатель тока статора и потокосцепления ротора. Все перечисленные методы в той или иной степени чувствительны к разбросу параметров электромагнитной цепи асинхронного двигателя. В этом отношении представляет интерес определение скорости по роторным пазовым пульсациям тока статора, который, к сожалению, также имеет свои недостатки. Предприняты попытки для построения систем управления АД без датчиков скорости с помощью нейронных сетей [71]. Все рассмотренные методы оперируют уравнениями в статорной системе координат.

В работе [49] предложено математическое обеспечение системы бездатчикового частотно-токового асинхронного электропривода с векторным управлением, в [48] приведена конструктивная процедура синтеза корректирующих обратных связей наблюдателя и структура алгоритма управления модулем потокосцепления асинхронного двигателя при прямом векторном управлении.

Актуальны исследования и создание электроприводов непосредственного действия, исключающие механические редукторы [57]. Преимуществом подобных электроприводов является высокий удерживающий момент при высокой точности позиционирования, высокий и постоянный вращающий момент при любых частотах вращения и быстрое гашение движения в конце позиционирования.

В настоящее время практически все современные системы бездатчикового управления асинхронным двигателем реализуются на микропроцессорной базе. В работе [59] рассмотрена модель цифровой системы бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем на безе процессора, оперирующего данными с фиксированной запятой.

Наибольшее распространение в качестве средств получения информации о механических координатах электродвигателей в регулируемых электроприводах получили датчики скорости, реализующие непосредственное измерение контролируемой координаты или ее механического аналога. Эти датчики позволяют контролировать механические координаты электропривода с необходимой точностью, но имеют сложность конструкции и требуют тщательной установки датчиков для их сопряжения с вращающимися частями электропривода, а также усложняется ревизия и ремонт, невысокая надежность в работе, так как в этих датчиках присутствуют вращающиеся элементы.

Широко распространенные датчики скорости – тахогенераторы имеют ряд существенных недостатков, основным является то, что тахогенераторы являются электрическими микромашинами (вращающиеся преобразователи) [6,8, 13].

Известно устройство для измерения частоты вращения, содержащие электрическую микромашину постоянного или переменного тока, ротор которой соединен с валом электродвигателя, а выходы обмоток подключены к входам измерительного преобразователя, выход которого является выходом устройства [63, 64].

Недостатками этого устройства являются увеличение момента инерции вращающихся частей электропривода и определенные сложности установки его на вал электродвигателя.

Известно устройство для измерения частоты вращения асинхронного электродвигателя, содержащее трехфазный датчик напряжения, входы которого подключены к выходам трехфазного тиристорного регулятора напряжения, трехфазный датчик тока, включенный входами между выводами обмоток статора асинхронного электродвигателя и выходами трехфазного тиристорного регулятора напряжения, первый трехфазный фильтр первой гармоники, входы которого подключены к соответствующим выходам трехфазного датчика напряжения, а выходы - к соответствующим входам первого выпрямителя, второй трехфазный фильтр первой гармоники, входы которого подключены к соответствующим выходам трехфазного датчика тока, a выходы - к соответствующим входам второго выпрямителя, делитель, связанный входом "делимое" с выходом первого выпрямителя, входом "делитель" с выходом второго выпрямителя, а выходом - с входом функционального преобразователя, выход которого является выходом датчика частоты вращения асинхронного электродвигателя [7, 10].

Известное устройство обладает рядом недостатков, основной из них заключается в том, что оно не позволяет измерять скорость двигателя при переменной частоте питающего напряжения (тока).

Другим существенным недостатком устройства является высокая погрешность измерений в переходных режимах работы электропривода, т.к. в основу его работы положено математическое описание асинхронного электродвигателя в установившемся режиме работы.

Известен способ измерения крутящего момента электродвигателя [4, 35, 60], заключающийся в том, что измеряют мгновенные значения фазных токов обмоток статора электродвигателя I₁, а также измеряют реактивную мощность W двигателя, по величине которых вычисляют значение тока I_н намагничивания.

Способ обладает рядом недостатков. Основной из них заключается в том, что информация о крутящем моменте может быть получена с некоторой задержкой относительно времени измерения фазных токов и реактивной мощности. Это снижает точность измерения крутящего момента в динамиче-

ских режимах работы электропривода, другим существенным недостатком способа является его сложность.

Также разработан способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя [46, 47], заключающийся в том, что измеряют мгновенные значения фазных токов обмоток статора электродвигателя, с учетом которых рассчитывают величину крутящего момента, измеряют линейные напряжения между двумя фазами, по измеренным значениям фазных токов находят составляющие вектора тока в двухфазной системе координат, а по измеренным значениям линейных напряжений находят составляющие вектора напряжения в двухфазной системе координат, затем вычисляют составляющие вектора тока ротора в двухфазной системе координат.

Недостаток данного способа заключается в том, что информация о крутящем моменте может быть получена с некоторой задержкой относительно времени измерения фазных токов и линейных напряжений. Это снижает точность измерения крутящего момента в динамических режимах работы электропривода, другим существенным недостатком способа является его сложность.

На основании проведенного обзора исследований и разработок в области асинхронного электропривода следует отметить, что для управляемых асинхронных электродвигателей часто возникает необходимость в контроле угловой скорости вращения и электромагнитного момента. Существующие методы контроля имеют высокую стоимость и сложность конструкции, недостаточную точность измерения. Эффективность внедрения управляемых электроприводов связано с необходимостью обеспечения асинхронных требований технологического процесса: контроля выходных координат асинхронного электродвигателя; разработки алгоритма и устройства косвенного контроля координат АДКР. Это обусловило актуальность данной работы.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ КООРДИНАТ

2.1 Выбор математического описания модели асинхронного двигателя

Обобщенная асинхронная машина показана на рисунке 2.1. Она содержит трехфазную обмотку на статоре и трехфазную обмотку на роторе. Обмотки статора и ротора подключены к симметричным трехфазным источникам напряжения.

Математическое описание такой машины базируется на известных законах[3, 5, 58, 62, 70].



Рисунок 2.1 – Обобщенная асинхронная машина

Уравнения равновесия ЭДС на обмотках статора и ротора базируется на втором законе Кирхгоффа.

Для статора:

и_a =
$$R_a i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}$$
;
 $u_a = R_a i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}$;
 $u_b = R_b i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}$;
 $u_c = R_c i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}$

$$(2.1)$$

Для ротора:

В уравнениях (2.1) присутствуют мгновенные напряжения, токи и потокосцепления статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток. Обычно обмотки выполняют симметричными, и поэтому $R_a = R_b = R_c = R_s$ активное сопротивление статорной обмотки, $R_a = R_b = R_c = R_r$ активное сопротивление статорной обмотки, $R_a = R_b = R_c = R_r$.

Вторым используемым законом является закон Ампера, который связывает потокосцепления обмоток с токами, протекающими по обмоткам:

Для статора

$$\begin{split} \psi_{A} &= L_{AA}i_{A} + L_{AB}i_{B} + L_{AC}i_{C} + L_{Aa}i_{a} + L_{Ab}i_{b} + L_{Ac}i_{c}, \\ \psi_{B} &= L_{BA}i_{A} + L_{BB}i_{B} + L_{BC}i_{C} + L_{Ba}i_{a} + L_{Bb}i_{b} + L_{Bc}i_{c}, \\ \psi_{C} &= L_{CA}i_{A} + L_{CB}i_{B} + L_{CC}c_{C} + L_{Ca}i_{a} + L_{Cb}i_{b} + L_{Cc}i_{c}. \end{split}$$
(2.2)

Для ротора:

$$\begin{split} \psi_a &= L_{aA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c, \\ \psi_b &= L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c, \\ \psi_c &= L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c. \end{split}$$

$$(2.3)$$

Симметричные уравнения для определения потокосцеплений показывают, что потокосцепление каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках; эти зависимости проявляются через взаимоиндукцию.

В уравнениях (2.2, 2.3) L_{AA} , L_{BB} , L_{CC} , L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все остальные – взаимоиндуктивностями между соответствующими обмотками.

Третьим законом, лежащим в основе анализа, является второй закон Ньютона – закон равновесия моментов на валу машины:

$$J\frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_{II}, \qquad (2.5)$$

где *J* (кГМ²) – момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма и редуктора;

 $\vec{\omega}_m(1/rad)$ - угловая скорость вала машины;

*M*_{*n*}(Hм) – момент рабочего механизма, приведенный к валу, в общем случае он может быть функцией скорости и угла поворота.

Наконец, четвертым и последним законом, лежащим в основе анализа машины, является закон, сформулированный Ленцем, как правило левой руки. Этот закон связывает векторные величины момента, потокосцепления и тока:

$$\vec{M} = k * (\vec{\Psi} * \vec{i}).$$
(2.6)

Следует подчеркнуть, что, несмотря на полное и строгое математическое описание, использование уравнений (2.1) – (2.6) для исследования машины встречает трудности.

Основными из них являются:

- в уравнениях (2.3 и 2.4) фигурируют векторные величины, а в уравнениях (2.1 и 2.2) скалярные;

- коэффициенты взаимоиндукции между обмотками статора и ротора в уравнениях (2.2) являются функцией угла поворота ротора относительно статора, то есть уравнения (2.2) являются уравнениями с переменными коэффициентами;

- уравнение (2.4) является нелинейным, так как в нем перемножаются переменные.

Наиболее удобное для исследования и моделирования асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором математическое описание представлено общепринятой моделью [11, 30] адекватной обобщенной двухфазной машины

$$\begin{split} U_{as} &= d\psi_{as}/dt + R_{s} * I_{as} * W_{K}; \\ U_{\beta s} &= d\psi_{as}/dt + R_{s} * I_{\beta s} + \psi_{as} * W_{K}; \\ U'_{ar} &= d\psi_{ar}/dt + R'_{r} * I'_{ar} + \psi_{\beta r} * (W_{K} - \omega); \\ U'_{\beta r} &= d\psi_{\beta r}/dt + R'_{r} * I'_{\beta r} + \psi_{ar} * (W_{K} - \omega); \\ I_{as} &= A^{*} (\psi_{as} * L'_{r} - \psi_{ar} * L_{\mu}); \\ I_{\beta s} &= A^{*} (\psi_{\beta s} * L'_{r} - \psi_{\beta r} * L_{\mu}); \\ I'_{ar} &= A^{*} (\psi_{\alpha r} * L_{s} - \psi_{\alpha s} * L_{\mu}); \\ I'_{\beta r} &= A^{*} (\psi_{\beta r} * L_{s} - \psi_{\beta s} * L_{\mu}); \\ M_{9} &= 3/2 * L_{\mu} * A^{*} P_{n} * (\psi_{\alpha s} * \psi_{\beta r} - \psi_{\beta s} * \psi_{\alpha r}); \\ M_{9} - M_{c} &= \frac{J}{p_{n}} * \frac{d\omega}{dt}. \end{split}$$

$$(2.7)$$

где

 $A = \frac{l}{L_{s} * L_{r}' - L_{\mu}^{2}};$

$$L_s = L_{s\sigma} + L_{\mu};$$

 $L'_{r} = L'_{r\sigma} + L_{\mu};$

W_K - скорость вращения координатной системы;

L_s - полная индуктивность обмотки статора;

 L'_r - приведенная полная индуктивность обмотки ротора;

L_µ - взаимная индуктивность обмотки статора и ротора;

L_s - индуктивность обмотки рассеяния обмотки статора;

 $L'_{r\sigma}$ - приведенная индуктивность рассеяния обмотки ротора;

 R_{s}, R_{r}' - соответственно активные сопротивления обмоток статора и приведенного ротора;

 $\psi_{\alpha s}$, $\psi_{\beta s}$, $\psi_{\alpha r}$, $\psi_{\beta r}$ - потокосцепления статора и ротора по осям α и β ;

 $U'_{\alpha s}$, $U'_{\beta s}$, $U'_{\alpha r}$, $U'_{\beta r}$ -напряжения статора и приведенные напряжения ротора по соответствующим осям;

 $I'_{\alpha s}, I'_{\beta s}, I'_{\alpha r}, I'_{\beta r}$ - токи статора и приведенные токи ротора по соответствующим осям;

p^{*n*} - число пар полюсов;

*М*_э - электромагнитный момент, развиваемый двигателем;

М_с - момент статического сопротивления;

J - момент инерции вращающихся частей;

ω - угловая скорость ротора.

Выходные координаты электромагнитный момент M_3 , развиваемый двигателем, и его угловая скорость ω , определяются из выражения (2.1). Однако данные выходные координаты не могут быть определены без необходимого контроля за текущими значениями потокосцеплений статора и ротора по осям α и β , что тяжело реализовать на практике [37, 61, 67, 68].

Поскольку в асинхронном двигателе питающие напряжения подводят к обмотке статора, то для упрощения измерительного блока целесообразно скорость вращения координатной системы приравнять к нулю $\omega_{\kappa} = 0$. Составляющие напряжения обмоток ротора также примем равными нулю, так как обмотка ротора замкнута накоротко и электрическая энергия к нему не подводится $u'_{ar} = u'_{\beta r} = 0$.

$$\begin{split} U_{\alpha s} &= U_{A}; \\ U_{\beta s} &= 1/\sqrt{3} * U_{A} + 2/\sqrt{3} * U_{B}; \\ I_{\alpha s} &= I_{A}; \\ I_{\beta s} &= 1/\sqrt{3} * I_{A} + 2/\sqrt{3} * I_{B}; \\ I'_{\alpha r} &= 1/L_{\mu} * \int U_{\alpha s} dt - R_{s}/L_{\mu} \int I_{\alpha s} dt - L_{s}/L_{\mu} * I_{\alpha s}; \\ I'_{\beta r} &= 1/L_{\mu} * \int U_{\beta s} dt - R_{s}/L_{\mu} \int I_{\beta s} dt - L_{s}/L_{\mu} * I_{\beta s}; \\ M_{2} &= 3/2 * L_{\mu} * P_{n} * (I_{\alpha s} * I'_{\beta r} - I_{\beta s} * I'_{\alpha r}); \\ \omega &= \frac{\frac{L'_{r}}{L_{\mu}} * U_{\alpha s} - (\frac{L'_{r} * L_{s}}{L_{\mu}} - L_{\mu}) * \frac{dI_{\alpha s}}{dt} - \frac{L'_{r} * R_{s}}{L_{\mu}} * I_{\alpha s} + R'_{r} * I'_{\alpha r})}{-(L'_{r} * I'_{\beta r} + L_{\mu} * I_{\beta s})}. \end{split}$$

$$(2.8)$$

В работах [36,37] определяют выходные координаты электромагнитный момент M_{2} , развиваемый двигателем, и его угловую скорость ω , из выражения (2.8).

Выражение (2.8) позволяет обеспечить контроль текущих значений момента, развиваемого асинхронным электродвигателем, и угловой скорости на основе измерений напряжений и токов фаз статора [46, 36].

Крутящий момент, развиваемый двигателем и угловая скорость, не могут быть непосредственно определены, так как для этого необходимо обеспечить получение информации о мгновенных значениях токов обмоток статора и ротора, а также напряжения обмоток статора в двухфазной системе координат. Для получения приемлемых выражений для крутящегося момента, развиваемого двигателем и угловой скорости, был выполнен ранее ряд преобразований [22, 23, 53, 54].

Поставив выражения (1), (2), (3), (4) в (5) и (6) уравнения системы (2.8) получим:

$$I'_{\alpha r} = 1 / L_{\mu} * \int U_{a} dt - R_{s} / L_{\mu} \int I_{a} dt - L_{s} / L_{\mu} * I_{a};$$

$$I'_{\beta r} = 1 / L_{\mu} * \int (1 / \sqrt{3} * U_{A} + 2 / \sqrt{3} * U_{B}) dt -$$

$$-R_{s} / L_{\mu} \int (1 / \sqrt{3} * I_{A} + 2 / \sqrt{3} * I_{B}) dt - L_{s} / L_{\mu} * (1 / \sqrt{3} * I_{A} + 2 / \sqrt{3} * I_{B});$$

$$M_{9} = 3 / 2 * L_{\mu} * P_{n} * (I_{\alpha s} * I'_{\beta r} - I_{\beta s} * I'_{\alpha r});$$

$$\omega = \frac{\frac{L'_{r}}{L_{\mu}} * U_{\alpha s} - (\frac{L'_{r} * L_{s}}{L_{\mu}} - L_{\mu}) * \frac{dI_{\alpha s}}{dt} - \frac{L'_{r} * R_{s}}{L_{\mu}} * I_{\alpha s} + R'_{r} * I'_{\alpha r})}{-(L'_{r} * I'_{\beta r} + L_{\mu} * I_{\beta s})}.$$
(2.9)

2.2 Реализация модели асинхронного электродвигателя для контроля выходных координат в компьютерной среде моделирования Matlab

Модель асинхронного двигателя применяется для анализа статических и динамических характеристик при разработке и исследовании современных способов управления. Приближение модели асинхронного электродвигателя к реальной электрической машине может быть выполнено с различной точностью, что во многом определяется расчетными возможностями вычислительной машины и целесообразностью того или иного уточнения. При этом возможна как детализация модели двигателя, так и иных элементов электропривода: автономного инвертора, механической части, датчиков.

Создание статических и динамических имитационных моделей, в виде структурной схемы, с помощью библиотеки системы позволяет рассчитывать и исследовать статические и динамические свойства моделируемой системы, а также прогнозировать поведение системы в различных ситуациях без создания физического объекта. [19, 29, 30, 31, 45, 50]

Простота и удобство моделирования сложных динамических систем в прикладном пакете Simulink компьютерной среды программирования Matlab позволяют получить модели электромеханических систем и исследовать режимы их работы с довольно большой точностью, которая ограничена только возможностью самого компьютера.

Пакет моделирования динамических систем *Simulink* содержит множество библиотек с уже готовыми блоками, которые реализуют разнообразные математические функции [1, 2, 9, 12, 15, 16, 38].

Вот примеры наиболее часто используемых библиотек при моделировании динамических структур:

- библиотека непрерывных элементов реализует передаточные функции,

интегралы, производные и задержку по времени;

- библиотека нелинейных элементов содержит блоки ограничения, блок с зоной нечувствительности, релейные элементы;

- библиотека математических операций включает в себя блоки суммирования, скалярного и матричного умножения, блок вычисления модуля, блок определения знака сигнала и т.п.;

- библиотека атрибутов сигнала содержит мультиплексоры, демультиплексоры и переключателя сигналов;

- библиотека источников сигнала включает в себя модули, реализующие сигналы различных форм и типов;

- библиотека приемников сигнала содержит различные типы осциллографов, индикаторов и модулей записи в память компьютера текущих значений переменных.

Соединив между собой необходимые блоки, установив осциллографы для отображения измеряемых параметров и выставив время решения модели

производится запуск программы по команде "пуск" непосредственно из файла *Simulink* или из дополнительного командного файла среды *Matlab*.

Модели сгруппированы в крупные модули, каждый их которых состоит из подмодулей, открывающихся в отдельном окошке. Это сделано для более наглядного представления модели.

Основные интересующие параметры электропривода выводятся на осциллоскопы. Осциллоскопы измеряют значения электромагнитного момента и скорости.

При этом сама модель содержит в основном буквенные обозначения всех переменных, а соответствующие числовые значения этих переменных прописаны в командном файле.

Удобство в том, что при изменении какого-либо параметра в модели его значение нужно поменять один раз в командном файле и сделать перезапуск на решение модели, а не искать изменяемый параметр по всем структурным блокам, из которых состоит модель.

Как уже упоминалось ранее, запуск модели можно произвести по команде "пуск" непосредственно из файла Simulink или из дополнительного командного файла среды Matlab.

Наиболее удобный и универсальный способ запуска модели получается при создании дополнительного командного файла.

Кроме этого, в командном файле имеется возможность записать непосредственно формулу, по которой вычисляется требуемая величина, а уже вычисленное числовое значение можно увидеть в строке состояния среды Matlab после запуска модели.

Виртуальная модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором выполнена с использованием пакета системного моделирования Simulink, в библиотеке которого имеются блоки виртуальных электрических машин и асинхронной машины в том числе.

На рисунке 2.2. представлена модель такой виртуальной машины, питающейся от трехфазного источника и подключенной выходом к блоку измерения.



Рисунок 2.2 – Виртуальная модель АДКР в программе Matlab

На рисунке 2.3. показано окно настройки асинхронного двигателя, куда записываются параметры машины.

Входными координатами модели асинхронного двигателя являются: электрические координаты (токи и напряжения) в трехфазной системе координат (A, B, C), также момент статического сопротивления, создаваемый механизмом.

| Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units 🛛 🛛 🔀 |
|--|
| Asynchronous Machine (mask) (link) Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description. |
| Parameters |
| Rotor type: Wound |
| Reference frame: Rotor |
| Nom. power,L-L volt. and freq. [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]: |
| [3*746, 220, 60] |
| Stator [Rs(ohm) Lls(H)]: |
| [0.435_2.0e-3] |
| Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]: |
| [0.816 2.0e-3] |
| Mutual inductance Lm (H): |
| 69.31e-3 |
| Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]: |
| [0.089 0 2] |
| Initial conditions [s() th(deg) isa,isb,isc(A) pha,phb,phc(deg)]: |
| [1,0 0,0,0 0,0,0] |
| OK Cancel Help Apply |

Рисунок 2.3 – Диалоговое окно МАТLAВ для задания параметров асинхронного двигателя

На рисунке 2.3 показано диалоговое окно, в полях настройки задаются:

- в первом поле – тип ротора;

- во втором поле – координатная система отсчета;

- в третьем поле – мощность, действующее линейное напряжение и частота;

- в четвертом поле, пятом, шестом полях – параметры классической схемы замещения;

- в седьмом поле – момент инерции ротора, коэффициент трения и число пар полюсов;

В последнем поле – начальные условия.

Универсальный блок измерения переменных состояния и его окно настройки показаны на рисунке 2.4.

В первом поле окна настройки (Machine type) указывается тип машины. При этом изменяется вид окна настройки под соответствующую машину.

Галочками отмечаются величины, которые подлежат измерения или наблюдению.



Рисунок 2.4 – а)универсальный блок измерения переменных состояния; б) окно настройки блока измерения переменных состояния

На рисунке 2.5 приведены результаты моделирования при прямом пуске для виртуальной модели АДКР в программе Matlab.

Результаты моделирования показывают, что при прямом пуске вначале наблюдаются значительные колебания момента (рисунок 2.5, а). Такие же колебания наблюдаются в скорости (рисунок 2.5, б). Кроме того они показывают, что при приложении момента нагрузки наблюдается уменьшение скорости.



Рисунок 2.5 - Результаты моделирования при прямом пуске виртуальной модели АДКР в программе Matlab для электромагнитного момента



Рисунок 2.5 - Результаты моделирования при прямом пуске виртуальной модели АДКР в программе Matlab для угловой скорости

Для оценки адекватности виртуальной модели асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по уравнениям (2.7) построена модель, выполненная с использованием пакета системного моделирования Simulink, которая представлена на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Структурная модель, выполненная с использованием пакета системного моделирования Simulink,

На рисунке 2.7 приведены результаты моделирования модели асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по уравнениям (2.7).

На рисунке 2.7, а, представлен график угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, а на рисунке 2.7, б, график электромагнитного момента[40, 41].



a)

Рисунок 2.7 - Результаты моделирования модели АДКР, составленной по уравнениям (2.7): а) график угловой скорости



Рисунок 2.7 - Результаты моделирования модели АДКР, составленной по уравнениям (2.7): б) график электромагнитного момента

Сравнение результатов моделирования при прямом пуске машины от сети с использованием моделей, представленной на рисунках 2.2 и 2.7, показывает их полную идентичность.

З РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И СПОСОБОВ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ КООРДИНАТ АДКР

Для обеспечения требуемых режимов работы технологических механизмов и комплексов практически в любой отрасли промышленности необходим контроль параметров движения рабочих органов, а именно - скорости перемещения и развиваемого усилия. В большинстве случаев для контроля вращательного движения используют известные датчики скорости [63] и момента [51, 52, 56, 60], реализованные на основе дополнительных, встраиваемых в электродвигатель или присоединенных к нему микромашин постоянного или переменного тока [33]. Но эти устройства имеют высокую стоимость и сложность конструкции; требуется их тщательное механическое сочленение с вращающимися частями электродвигателя.

Поэтому применение нецелесообразно В ряде случаев ИХ по конструктивным стоимостным ограничениям. Это приводит ИЛИ к необходимости разработки, создания и использования других средств контроля координат технологических механизмов с малым содержанием материальных и энергетических ресурсов.

3.1 Разработка алгоритма и способа косвенного контроля электромагнитного момента АДКР

Наиболее распространенными устройствами контроля координат являются устройства непосредственного измерения. Они имеют существенные недостатки: необходимость совмещения датчика с механической частью электродвигателя, что усложняет ремонт и ревизию, сложность конструкции. Эти недостатки исключаются при применении устройств косвенного контроля координат.[39, 42, 43, 65, 66].

Необходимая информация о крутящем моменте асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором была получена на основе анализа математической модели электрической машины (2.1), которая с высокой степенью адекватности отражает происходящие в электродвигателе процессы и системы уравнений, необходимых для построения датчиков контроля момента.

В уравнения (2.2) входит крутящий момент, развиваемый двигателем. Однако он не может быть непосредственно определен, так как для этого необходимо обеспечить получение информации о мгновенных значениях токов обмоток статора и ротора, а также напряжения обмоток статора в двухфазной системе координат.

Так как информация о крутящем моменте может быть получена с некоторой задержкой относительно времени измерения фазных токов и линейных напряжений, что снижает точность измерения крутящего момента в динамических режимах работы электропривода и является сложным процесс

определения величины крутящего момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, то ее вычисление целесообразно осуществлять на основании известных паспортных данных двигателя и легко измеряемых величин, таких как фазные токи и напряжения.

Выражения (1) и (2) системы (2.3) подставим в уравнение (3) системы (2.3). После некоторых преобразований, с учетом фазных токов i_a , i_b и фазных напряжений u_a , u_b соответственно фаз A и B, известных значений числа пар полюсов p_n и активного сопротивления обмотки статора r_1 получим выражение для определения величины крутящего момента M асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором из выражения:

$$M = \sqrt{3} * p_{n} * \left[i_{a} * \left(\int u_{b} dt - r_{1} \int i_{b} dt \right) - i_{b} * \left(\int u_{a} dt - r_{1} \int i_{a} dt \right) \right], \qquad (3.1)$$

где i_a , i_b - мгновенные значения фазных токов на фазах A и B;

u_a, u_b - мгновенные значения фазных напряжений на фазах A и B[53]. Проверим размерность формулы (3.1):

$$\left[i_{a}*\left(\int u_{b}dt - r_{1}\int i_{b}dt\right)\right] = \left[A*(B*c - OM*A*c)\right] = \left[A*(B*c - B*c)\right] = A*B*c,$$

$$\left[i_{b}*\left(\int u_{a}dt - r_{1}\int i_{a}dt\right)\right] = \left[A*(B*c - OM*A*c)\right] = \left[A*(B*c - B*c)\right] = A*B*c,$$

$$M [B*A*c] = [B*A*c].$$

В соответствии с выражением (3.1) и алгоритмом, представленном на 3.1 рисунке для определения крутящего момента асинхронного электродвигателя необходимо произвести измерение мгновенных значений фазных напряжений И токов, произвести операции преобразования, перемножения, интегрирования.



Рисунок 3.1 – Алгоритм косвенного контроля крутящего момента АДКР

В соответствии с выражением (3.1) построена обобщенная функциональная схема контроля крутящего момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, представленная на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Обобщенная функциональная схема контроля крутящего момента АДКР

В соответствии с выражением (3.1) для определения крутящего момента асинхронного электродвигателя, с источника питания 1 (рисунок 3.3) подают напряжение на асинхронный электродвигатель 2, измеряют мгновенные значения i_a , i_b фазных токов на фазах A и B с помощью датчиков тока 3, 4, измеряют мгновенные значения фазных напряжений u_a , u_b датчиками напряжения 5, 6. Далее с помощью блока вычисления момента 7 получаем сигнал, пропорциональный крутящему моменту, развиваемому асинхронным электродвигателем, и выводим его на блок индикации 8.



Рисунок 3.3- Общая схема для измерения электромагнитного момента АДКР



Рисунок 3.4 – Блок вычисления момента АДКР

Блок вычисления момента может быть реализован на основе структурной схемы, представленной на рисунке 3.4.

Так как выражение (3.1) недостаточно точно определяет значение крутящего момента асинхронного электродвигателя, было выведено выражение (3.2) [22], которое позволяет обеспечить требуемую точность результата.

$$M = \sqrt{3} * p_n * [i_a * (\int_{0}^{1/f} u_b dt - r_{i(20)} * [1 + \alpha(t - 20)] * \int_{0}^{1/f} i_b dt) - i_b * (\int_{0}^{1/f} u_a dt - r_{i(20)} * [1 + \alpha(t - 20)] \int_{0}^{1/f} i_a dt)].$$
(3.2)

где *f* - частота основной гармоники напряжения питания АДКР, Гц;

 $r_{I(20)}$ - активное сопротивление проводников обмотки статора АДКР при температуре 20 ${}^{o}C$, Ом (паспортные данные);

 α - температурный коэффициент, характеризующий свойства проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, $1/{}^{o}C$;

t - температура проводников обмотки статора АДКР, ${}^{o}C$. Проверим размерность формулы (3.2):

$$\sqrt{3} * p_n * [i_a * (\int_{0}^{1/f} u_b dt - r_{1(20)} * [1 + \alpha(t - 20)] * \int_{0}^{1/f} i_b dt)] =$$

= [A*(B*c - OM*A*c)] = [A*(B*c - B*c)] = A*B*c

$$i_{b} * \left(\int_{0}^{1/f} u_{a} dt - r_{i(20)} * \left[1 + \alpha(t - 20)\right] \int_{0}^{1/f} i_{a} dt\right) \right] = \left[A * (B * c - OM * A * c)\right] = \left[A * (B * c - B * c)\right] = A * B * c$$

$$M [B*A*c] = [B*A*c].$$

В соответствии с выражением (3.2) и алгоритмом, представленном на 3.5 определения крутящего рисунке для момента асинхронного электродвигателя необходимо произвести измерение мгновенных значений фазных напряжений и токов, частоты основной гармоники напряжения, температуры проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, и с учетом активного сопротивления проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя при температуре 20 °С, температурного коэффициента, характеризующего свойства проводников обмотки статора асинхронного произвести преобразования, электродвигателя, операции перемножения, интегрирования.



Рисунок 3.5 – Алгоритм косвенного контроля крутящего момента асинхронного электродвигателя

В соответствии с выражением (3.2) построена обобщенная функциональная схема контроля крутящего момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, представленная на рисунке 3.6.

В соответствии с выражением (3.2) для определения крутящего момента асинхронного электродвигателя с источника питания 1 (рисунок 3.7) подают напряжение на асинхронный электродвигатель 2, измеряют мгновенные i_a , i_b фазных токов на фазах A и B с помощью датчиков тока 3, 4, измеряют мгновенные значения фазных напряжений u_a , u_b датчиками напряжения 5, 6, датчиком температуры 7 измеряют температуру t проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, датчиком частоты 8 измеряют частоту fосновной гармоники напряжения статора асинхронного электродвигателя, преобразуют частоту блоками преобразования 9, 10, с помощью блока вычисления момента 11 получаем сигнал, пропорциональный крутящему моменту, развиваемому асинхронным электродвигателем, и выводим его на блок индикации момента 12.



Рисунок 3.6 – Обобщенная функциональная схема контроля крутящего момента АДКР

В блоке 11 произвели преобразования с помощью четырех интегрирующих устройств 19, 20, 21, 22, пяти блоков перемножения 16, 17, 18, 25, 26, пяти блоков суммирования 13, 15, 23, 24, 27 и трех блоков усиления 14, 28, 29.

Блок вычисления момента может быть реализован на основе структурной схемы, представленной на рисунке 3.8.

Таким образом, способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя заключается в том, что при известном значении числа пар полюсов p_n измеряют мгновенные значения фазных токов i_a , i_b и напряжения u_a , u_b двух фаз соответственно фаз A и B обмотки статора электродвигателя, с учетом которых рассчитывают величину крутящего момента асинхронного электродвигателя, измеряют температуру проводников t обмотки статора асинхронного электродвигателя, частоту f основной гармоники напряжения статора асинхронного электродвигателя, при известных значениях температурного коэффициента α, характеризующего свойства проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, активного сопротивления $r_{1(20)}$ проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя при температуре 20 ${}^{o}C$, а крутящий момент асинхронного электродвигателя Μ вычисляют по формуле (3.2).



Рисунок 3.7 – Общая схема для измерения электромагнитного момента



Рисунок 3.8 – Структурная схема блока вычисления крутящего момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

3.2 Разработка алгоритма и способа косвенного контроля угловой скорости АДКР

Необходимая информация об угловой скорости вращения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором была получена на основе анализа математической модели электрической машины (2.7), которая с высокой степенью адекватности отражает происходящие в электродвигателе процессы и системы уравнений, необходимых для построения датчиков контроля момента.

В уравнения (2.8) входит угловая скорость вращения, но она не может быть непосредственно определена, так как для этого необходимо обеспечить получение информации о мгновенных значениях токов обмоток статора и ротора, а также напряжения обмоток статора в двухфазной системе координат.

Поскольку в асинхронном двигателе питающие напряжения подводят к обмотке статора, то для упрощения измерительного блока целесообразно скорость вращения координатной системы приравнять к нулю $\omega_{\kappa} = 0$. Составляющие напряжения обмоток ротора также примем равными нулю, так как обмотка ротора замкнута накоротко и электрическая энергия к нему не подводится $u'_{ar} = u'_{\beta r} = 0$.

Так как информация об угловой скорости вращения может быть получена с некоторой задержкой времени, что снижает точность измерения угловой частоты вращения в динамических режимах работы электропривода, и является сложным процесс определения величины угловой скорости вращения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, то ее вычисление целесообразно осуществлять на основании известных паспортных данных двигателя и легко измеряемых величин, таких как фазные токи и напряжения.

Для получения приемлемых выражений для угловой скорости двигателя подставим первое и второе выражения системы (2.9) в уравнение четыре системы (2.9) получим [54]:

$$\omega = \sqrt{3} * [L'_r * u_a - (L'_r * R_s + R'_r * L_s) * i_a + R'_r * \int u_a dt - R'_r * R_s \int i_a dt - (L'_r * L_s - L^2_{\mu}) * \frac{di_a}{dt}] *$$

$$* [L'_r * R_s \int (i_a + 2i_b) dt - L'_r * \int (u_a + 2u_b) dt + (L'_r * L_s - L^2_{\mu}) * (i_a + 2i_b)]^{-1}.$$
(3.3)

Проведя некоторые преобразования с выражением (3.3), получим значение скорости вращения **Ф** в виде (3.4)

$$\omega = \frac{\sqrt{3} * L'_{r} * [u_{a} - (R_{s} + \frac{R'_{r} * L_{s}}{L'_{r}}) * i_{a}]}{L'_{r}(\int (R_{s}(i_{a} + 2i_{b}) - (u_{a} + 2u_{b}))dt - (\frac{L^{2}_{\mu}}{L'_{r}} - L_{s}) * (i_{a} + 2i_{b}))} + \frac{\sqrt{3} * L'_{r} * [\frac{R'_{r}}{L'_{r}} * \int (u_{a} - R_{s} * i_{a})dt + (\frac{L^{2}_{\mu}}{L'_{r}} - L_{s}) * \frac{di_{a}}{dt}]}{L'_{r}(\int (R_{s}(i_{a} + 2i_{b}) - (u_{a} + 2u_{b}))dt - (\frac{L^{2}_{\mu}}{L'_{r}} - L_{s}) * (i_{a} + 2i_{b}))}$$
(3.4)

В выражении (3.4) разделим числитель и знаменатель на L'_r , получим

$$\omega = \frac{\sqrt{3} * [u_a - (R_s + \frac{R'_r * L_s}{L'_r}) * i_a]}{\int (R_s(i_a + 2i_b) - (u_a + 2u_b))dt - (\frac{L^2_{\mu}}{L'_r} - L_s) * (i_a + 2i_b)} + \frac{1}{\int (R_s(i_a + 2i_b) - (u_a + 2u_b))dt - (\frac{L^2_{\mu}}{L'_r}) * (i_a + 2i_b)}$$

$$+\frac{\sqrt{3}*\frac{R'_{r}}{L'_{r}}*\int(u_{a}-R_{s}*i_{a})dt}{\int(R_{s}(i_{a}+2i_{b})-(u_{a}+2u_{b}))dt-(\frac{L^{2}_{\mu}}{L'_{r}}-L_{s})*(i_{a}+2i_{b})}+$$
(3.5)

$$+\frac{\sqrt{3}*(\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}}-L_{s})*\frac{di_{a}}{dt}}{\int (R_{s}(i_{a}+2i_{b})-(u_{a}+2u_{b}))dt-(\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}}-L_{s})*(i_{a}+2i_{b})}$$

Примем следующие обозначения

$$T'_{r} = \frac{L'_{r}}{R'_{r}},$$

$$\omega_{\rm H}(t) = \frac{\sqrt{3} * [u_{a} - (R_{\rm s} + \frac{R'_{\rm r} * L_{\rm s}}{L'_{\rm r}}) * i_{a}]}{\int (R_{\rm s}(i_{a} + 2i_{b}) - (u_{a} + 2u_{b}))dt - (\frac{L^{2}_{\rm \mu}}{L'_{\rm r}} - L_{\rm s}) * (i_{a} + 2i_{b})}.$$

Тогда, с учетом преобразований, получим для выражения $\Delta \omega_{инт}(t)$ и $\Delta \omega_{ди\varphi}(t)$

$$\Delta \omega_{uum}(t) = \left(\frac{\sqrt{3} * [\frac{R'_r}{L'_r} * \int (u_a - R_s * i_a) dt]}{\int (R_s(i_a + 2i_b) - (u_a + 2u_b)) dt - (\frac{L^2_{\mu}}{L'_r} - L_s) * (i_a + 2i_b)} \right) * \omega_{\mu}^{-1}(t) = \\ = \left(\frac{\sqrt{3} * [\frac{R'_r}{L'_r} * \int (u_a - R_s * i_a) dt]}{\int (R_s(i_a + 2i_b) - (u_a + 2u_b)) dt - (\frac{L^2_{\mu}}{L'_r} - L_s) * (i_a + 2i_b)} \right) *$$

$$*\left(\frac{\sqrt{3}*[u_{a}-(R_{s}+\frac{R_{r}^{\prime}*L_{s}}{L_{r}^{\prime}})*i_{a}]}{\int (R_{s}(i_{a}+2i_{b})-(u_{a}+2u_{b}))dt-(\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}}-L_{s})*(i_{a}+2i_{b})}\right)^{-1}=\frac{\int (u_{a}-R_{s}*i_{a})dt}{T_{r}^{\prime}(u_{a}-(R_{s}+\frac{L_{s}}{T_{r}^{\prime}})i_{a})};$$

$$\begin{split} \Delta \omega_{ou\phi}(t) &= \left(\frac{\sqrt{3} * (\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}} - L_{s}) * \frac{di_{a}}{dt}}{R_{s} \int (i_{a} + 2i_{b}) - (u_{a} + 2u_{b}) dt - (L_{s} - \frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}}) * (i_{a} + 2i_{b})} \right) * \omega_{\mu}^{-1}(t) = \\ &= \left(\frac{\sqrt{3} * (\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}} - L_{s}) * \frac{di_{a}}{dt}}{R_{s} \int (i_{a} + 2i_{b}) - (u_{a} + 2u_{b}) dt - (L_{s} - \frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}}) * (i_{a} + 2i_{b})} \right) * \\ & * \left(\frac{\sqrt{3} * [u_{a} - (R_{s} + \frac{R_{r}^{\prime} * L_{s}}{L_{r}^{\prime}}) * i_{a}]}{\int (R_{s}(i_{a} + 2i_{b}) - (u_{a} + 2u_{b})) dt - (\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}} - L_{s}) * (i_{a} + 2i_{b})} \right)^{-1} = \frac{(\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}} - L_{s}) * \frac{di_{a}}{dt}}{u_{a} - (R_{s} + \frac{L_{s}}{T_{r}^{\prime}})i_{a}}. \end{split}$$

Окончательно после некоторых преобразований выражения (3.5), с учетом фазных токов i_a , i_b и фазных напряжений u_a , u_b соответственно фаз A и B, известных паспортных данных получим выражение для определения величины угловой скорости вращения ω асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором из выражения [23]:

$$\omega = \omega_{\mu} (1 + \Delta \omega_{\mu \mu \tau} + \Delta \omega_{\mu \mu \phi})$$
 (3.6)

лде
$$\omega_{\mu}(t) = \frac{\sqrt{3} * [u_a - (R_s + \frac{R'_r * L_s}{L'_r}) * i_a]}{\int (R_s(i_a + 2i_b) - (u_a + 2u_b))dt - (\frac{L^2_{\mu}}{L'_r} - L_s) * (i_a + 2i_b)}$$
 -

- измеренное мгновенное значение угловой скорости;

$$\Delta \omega_{\text{инт}}(t) = \frac{\int (u_a - R_s * i_a) dt}{T'_r (u_a - (R_s + \frac{L_s}{T'_r})i_a)} - динамическая интегральная$$

составляющая относительного значения угловой скорости;

$$\Delta \omega_{\text{диф}}(t) = \frac{\left(\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{'}} - L_{s}\right) * \frac{di_{a}}{dt}}{u_{a} - (R_{s} + \frac{L_{s}}{T_{r}^{'}})i_{a}} -$$
динамическая дифференциальная

составляющая относительного значения угловой скорости.

Проверим размерность формулы (3.6):

$$\omega_{\mu}(t) = \frac{\sqrt{3} * [u_a - (R_s + \frac{R'_r * L_s}{L'_r}) * i_a]}{\int (R_s(i_a + 2i_b) - (u_a + 2u_b))dt - (\frac{L^2_{\mu}}{L'_r} - L_s) * (i_a + 2i_b)} = \frac{B - (OM * \frac{OM * \Gamma H}{\Gamma H}) * A}{[OM * (A + A) - (B + B)] * c - (\frac{\Gamma H^2}{\Gamma H} - \Gamma H) * (A + A)} = \frac{B - OM * A}{B - OM * A} = \frac{B -$$

$$=\frac{B-O_{M}*A}{[O_{M}*A-B]*c-\Gamma_{H}*A}=\frac{B}{B*c-B*c}=\frac{B}{B*c}=c^{-1}$$

$$\Delta \omega_{unm}(t) = \frac{\int (u_a - R_s * i_a)dt}{T'_r(u_a - (R_s + \frac{L_s}{T'_r})i_a)} = \frac{(B - O_M * A) * c}{\frac{\Gamma_H}{O_M}(B - (O_M + \frac{\Gamma_H}{\Gamma_H} * O_M) * A)} =$$

$$=\frac{B*c}{\frac{\Gamma_{H}}{O_{M}}(B-O_{M}*A)}=\frac{B*c}{\frac{\Gamma_{H}*B}{O_{M}}}=\frac{B*c}{\Gamma_{H}*A}=\frac{B*c}{B*c}=1$$

$$\Delta \omega_{\partial u\phi}(t) = \frac{\left(\frac{L_{\mu}^{2}}{L_{r}^{\prime}} - L_{s}\right) * \frac{di_{a}}{dt}}{u_{a} - \left(R_{s} + \frac{L_{s}}{T_{r}^{\prime}}\right)i_{a}} = \frac{\left(\frac{\Gamma \mu^{2}}{\Gamma \mu} - \Gamma \mu\right) * \frac{A}{c}}{B - \left(OM + \frac{\Gamma \mu}{\Gamma \mu}\right) * A} =$$
$$= \frac{\Gamma \mu * A}{c(B - B)} = \frac{B * c}{B * c} = 1$$
$$\omega = \omega_{u}\left(1 + \Delta \omega_{uum} + \Delta \omega_{\partial u\phi}\right) = c^{-1}\left(1 + 1 + 1\right) = c^{-1}$$

$$c^{-1} = c^{-1}$$
.

В соответствии с выражением (3.6) и алгоритмом, представленном на рисунке 3.9 для определения угловой скорости вращения асинхронного электродвигателя необходимо произвести измерение мгновенных значений фазных напряжений и токов, и с учетом паспортных данных, произвести операции преобразования, перемножения, интегрирования.

В соответствии с выражением (3.6) построена обобщенная функциональная схема контроля угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, представленная на рисунке 3.10.



Рисунок 3.9 – Алгоритм косвенного контроля угловой скорости вращения асинхронного электродвигателя



Рисунок 3.6 – Обобщенная функциональная схема контроля угловой скорости вращения АДКР

Способ косвенного контроля угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором осуществляется следующим образом.

Способ поясняется чертежом (рисунок 3.11), на котором изображена схема для измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя.

Схема содержит источник питания 1, трехфазный асинхронный электродвигатель 2, датчики тока 3, 4, датчики напряжения 5, 6, блок вычисления угловой скорости вращения 7, блок индикации 8.

С источника питания 1 подают напряжение на трехфазный асинхронный электродвигатель 2, измеряют мгновенные значения i_a , i_b фазных токов на фазах A и B или i_b , i_c фазных токов на фазах B и C, либо i_a , i_c фазных токов на фазах A и C с помощью датчиков тока 3, 4, измеряют мгновенные значения фазных напряжений u_a , u_b или u_b , u_c фазных напряжений на фазах A и C датчиками напряжения 5, 6.

Далее с помощью блока вычисления скорости вращения 7 получаем сигнал, пропорциональный скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя, и выводим его на блок индикации 8.



Рисунок 3.11 – Общая схема для измерения угловой скорости вращения АДКР

Структурная схема блока вычисления угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором может быть реализована в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 3.12.

На рисунке 3.12:

$$A = \frac{L'_r}{L_{\mu}}; \quad B = \frac{R'_r}{L_{\mu}}; \quad C = R_s; \quad D = L_s; \quad E = L_{\mu}; \quad AD = \frac{L'_r}{L_{\mu}} * L_s;$$
$$AC = \frac{L'_r}{L_{\mu}} * R_s; \quad BC = \frac{R'_r}{L_{\mu}} * R_s; \quad BD = \frac{R'_r}{L_{\mu}} * L_s.$$

Измеряемыми координатами блока вычисления крутящего момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором являются мгновенные значения фазных токов *i_a*, *i_b* и напряжения *u_a*, *u_b* двух фаз соответственно фаз A и B обмотки статора электродвигателя.

В соответствии с выражением (3.6) определяют угловую скорость вращения асинхронного электродвигателя, у которого известны параметры обмоток статора и ротора ^R_s, L_s, R'_r, L'_r, L_µ.



Рисунок 3.12 – Блок вычисления угловой скорости вращения АДКР Вышеописанный способ измерения угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором на основе косвенного контроля координат обладает рядом недостатков.

Основной из них заключается в том, что информация об угловой скорости вращения может быть получена с некоторой задержкой времени из-за погрешности в результате большого количества преобразований и их сложности.

В связи с этим поставлена задача: разработать способ измерения угловой скорости трехфазного асинхронного электродвигателя более точный, имеющий меньшее количество преобразований и меньшую погрешность измерения.

Технический результат изобретения - повышение точности измерения угловой скорости вращения в динамических режимах работы электропривода и упрощение способа измерения [32].

Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя заключается в том, что измеряют мгновенные значения

фазных токов и напряжений двух фаз обмоток статора асинхронного электродвигателя.

Далее с учетом измеренных фазных токов *i_a*, *i_b* соответственно фаз А и В или i_b , i_c соответственно фаз В и С, либо i_a , i_c соответственно фаз А и С и фазных напряжений u_a , u_b соответственно фаз А и В или u_b , u_c соответственно фаз В и С, либо иа, ис соответственно фаз А и С, подводимых к статору, и известных активном сопротивлении обмотки статора R_s и активном сопротивлении приведенного ротора R'r, полной индуктивности обмотки статора L_s ; приведенной полной индуктивности обмотки ротора L_r' , взаимной индуктивности обмоток статора и ротора ^L_µ, постоянной времени обмотки ротора T'_r , определяемой как отношение приведенной полной индуктивности L'_r к приведенному активному сопротивлению R'_r обмотки ротора коэффициента а, определяемого как отношение полной индуктивности обмотки статора ^L_s к приведенному активному сопротивлению обмотки ротора R'_r , коэффициента β , определяемого как отношение взаимной индуктивности обмоток статора и ротора L_{μ} к приведенной полной индуктивности L'_{r} , измеренного мгновенного значения угловой скорости $\omega_u(t)$, динамической интегральной составляющей относительного значения угловой скорости значения угловой скорости $\Delta \omega_{\partial u \phi}(t)$, рассчитывают угловую скорость вращения трехфазного асинхронного электродвигателя $\omega(t)$ по формуле:

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \boldsymbol{\omega}_{u}(t) \left[1 + \Delta \boldsymbol{\omega}_{uhm}(t) + \Delta \boldsymbol{\omega}_{\partial u \phi}(t) \right], \qquad (3.7)$$

где
$$\omega_u(t) = \frac{\sqrt{3 * [u_a(t) - (R_s + R'_r * d) * i_a(t)]}}{\int (R_s[i_a(t) + 2i_b(t)] - [u_a(t) + 2u_b(t)])dt - (L_\mu * \beta - L_s) * [i_a(t) + i_b(t)]};$$

$$\Delta \omega_{uhm}(t) = \frac{\int [u_a(t) - R_s * i_a(t)] dt}{T'_r [u_a(t) - (R_s + R'_r * \alpha) i_a(t)]};$$

$$\Delta \omega_{\partial u\phi}(t) = \frac{(L_{\mu} * \beta - L_s) * \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (R_s + R_r' * \alpha)i_a(t)};$$

$$T'_r = \frac{L'_r}{R'_r}; \ \alpha = \frac{L_s}{L'_r}; \ \beta = \frac{L_{\mu}}{L'_r}$$

Так как выражение (3.7) недостаточно точно определяет значение угловой скорости асинхронного электродвигателя, было выведено выражение (3.8), которое позволяет обеспечить требуемую точность результата.

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \boldsymbol{\omega}_{u}(t) \left[1 + \Delta \boldsymbol{\omega}_{uhm}(t) + \Delta \boldsymbol{\omega}_{\partial u \phi}(t) \right], \qquad (3.8)$$

где

$$\omega_{u}(t) = \frac{\sqrt{3} * [u_{a}(t) - (R_{s} * [1 + \alpha_{t}(t - 20)] + R_{r}' * d) * i_{a}(t)]}{\int_{0}^{1/f} (R_{s} * [1 + \alpha_{t}(t - 20)] * [i_{a}(t) + 2i_{b}(t)] - [u_{a}(t) + 2u_{b}(t)]) dt - (L_{\mu} * \beta - L_{s}) * [i_{a}(t) + i_{b}(t)]}$$

- измеренное мгновенное значение угловой скорости;

$$\Delta \omega_{uum}(t) = \frac{\int_{0}^{1/f} \left[u_a(t) - R_s * \left[1 + \alpha_t(t - 20) \right] * i_a(t) \right] dt}{T'_r \left[u_a(t) - \left(R_s * \left[1 + \alpha_t(t - 20) \right] + R'_r * \alpha \right) i_a(t) \right]}$$

- динамическая интегральная составляющая относительного значения угловой скорости;

$$\Delta \omega_{\partial u\phi}(t) = \frac{(L_{\mu} * \beta - L_{s}) * \frac{di_{a}(t)}{dt}}{u_{a}(t) - (R_{s} * \left[1 + \alpha_{t}(t - 20)\right] + R_{r}^{'} * \alpha)i_{a}(t)}$$

- динамическая дифференциальная составляющая относительного значения угловой скорости.

В соответствии с выражением (3.8) и алгоритмом, представленном на рисунке 3.13 для определения угловой скорости вращения асинхронного электродвигателя необходимо произвести измерение мгновенных значений фазных напряжений и токов, частоты основной гармоники напряжения, температуры проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, и с учетом паспортных данных, произвести операции преобразования, перемножения, интегрирования. В соответствии с выражением (3.8) построена обобщенная функциональная схема контроля угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, представленная на рисунке 3.14



Рисунок 3.13 – Алгоритм косвенного контроля угловой скорости вращения АДКР



Рисунок 3.14 – Обобщенная функциональная схема контроля угловой скорости вращения АДКР

В соответствии с выражением (3.8) для определения угловой скорости асинхронного электродвигателя с источника питания 1 (рисунок 3.15) подают

напряжение на асинхронный электродвигатель 2, измеряют мгновенные i_a , i_b фазных токов на фазах А и В с помощью датчиков тока 3, 4, измеряют мгновенные значения фазных напряжений u_a , u_b датчиками напряжения 5, 6, датчиком температуры 7 измеряют температуру t проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя, датчиком частоты 8 измеряют частоту f основной гармоники напряжения статора асинхронного электродвигателя, , с блока угловой скорости 9 получаем помощью вычисления сигнал. пропорциональный угловой скорости асинхронного электродвигателя, И выводим его на блок индикации угловой скорости 10.

На рисунке 3.15 изображена общая схема для измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя согласно заявляемому способу.

На рисунке 3.16 изображен блок вычисления угловой скорости.

На рисунке 3.17 изображен блок для вычисления динамической дифференциальной составляющей относительного значения угловой скорости.

На рисунке 3.18 изображен блок для вычисления динамической интегральной составляющей относительного значения угловой скорости.

На рисунке 3.19 изображен блок для вычисления измеренного мгновенного значения угловой скорости.

Блок 9 содержит:

- блоки ввода коэффициентов 11, 12, 13, 14 (рис. 3.16), 15, 16,17 (рис. 3.17), 18, 19, 20, 21 (рис.3.18), 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 (рис.3.19);

- блоки суммирования 29 (рис. 3.16), 30, 31, 32 (рис. 3.17), 33, 34, 35,36 (рис. 3.18), 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 (рис. 3.19);

- блоки перемножения 45 (рис. 3.16), 46, 47, 48, 49, 50 (рис. 3.17), 51, 52, 53, 54, 55, 56 (рис. 3.18), 57, 58, 59, 60, 61, 62 (рис. 3.19);

- дифференцирующее устройство 63 (рис. 3.17);

- интегрирующие устройства 64 (рис. 3.18), 65 (рис. 3.19).



Рисунок 3.15 - Общая схема для измерения угловой скорости вращения АДКР

В блоке 9 для вычисления угловой скорости произвели преобразования с помощью четырех блоков ввода коэффициентов 11, 12, 13, 14, блока суммирования 29, блока перемножения 45.

Динамическую дифференциальную составляющую относительного значения угловой скорости $\Delta \omega_{\partial u \phi}(t)$ определяют в блоке 11 с помощью трех блоков ввода коэффициентов 15, 16, 17, трех блоков суммирования 30, 31, 32, пяти блоков перемножения 46, 47, 48, 49, 50, дифференцирующего устройства 63.

Динамическую интегральную составляющую относительного значения угловой скорости $\Delta \omega_{unm}(t)$ определяют в блоке 12 с помощью четырех блоков ввода коэффициентов 18, 19, 20, 21, четырех блоков суммирования 33, 34, 35, 36, шести блоков перемножения 51, 52, 53 54, 55, 56, интегрирующего устройства 64.

Измеренное мгновенное значение угловой скорости $\omega_u(t)$ определяют в блоке 14 с помощью семи блоков ввода коэффициентов 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, восьми блоков суммирования 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, шести блоков перемножения 57, 58, 59, 60,61, 62, интегрирующего устройства 65.

Далее сигнал с блока 9 выводим на блок индикации угловой скорости 10.



Рисунок 3.16 - Блок вычисления угловой скорости АДКР

Таким образом, разработаны алгоритм и способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, который повышает точность измерения крутящегося момента в динамических режимах работы электропривода и упрощает способ измерения; разработаны алгоритм и способ измерения угловой скорости вращения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, который повышает точность измерения угловой скорости в динамических режимах работы электропривода и упрощает способ измерения.



Рисунок 3.17 - Блок для вычисления динамической дифференциальной составляющей относительного значения угловой скорости.



Рисунок 3.18 - Блок для вычисления динамической интегральной составляющей относительного значения угловой скорости.



Рисунок 3.19 - Блок для вычисления измеренного мгновенного значения угловой скорости.

4 СИСТЕМА ИММИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АДКР

Для исследования динамических свойств статических И косвенного контроля крутящего угловой скорости асинхронного момента И электродвигателя короткозамкнутым ротором С использовались методы имитационного моделирования с применением прикладных программ системы MATLAB, создана система имитационного моделирования системы косвенного контроля координат асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

4.1 Описание схемы имитационного моделирования АДКР

Имитационное моделирование системы косвенного контроля координат выполнено в соответствии с приведенной на рисунке 4.1 схемой, которая состоит из программных модулей исходных данных исследуемых двигателей, преобразования координат и имитационной модели косвенного контроля координат [40, 41].



Рисунок 4.1- Функциональная схема имитационного моделирования АДКР

Разработана программа, выполняющая: ввод необходимых данных для измерения выходных координат и преобразование переменных. Фрагменты программ модулей «ИЭД» и «ПК» приведены ниже.

% Модуль исследуемых электродвигателей

R1 = 152.9; %Ohm активное сопротивление обмотки статора
R2 = 192; %Ohm - активное сопротивление обмотки ротора
XS1 = 160; %Ohm - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора
XS2 = 134.7; %Ohm - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора
Xh = 837; %Ohm - сопротивление взаимной индукции
Pn = 60; %W - номинальнальная мощность
U = 220; %V - номинальное напряжение
I = 0.27; %A - номинальный ток
f1n = 50; %Hz - частота

p = 2; % - число пар полюсов
Jmt = 0.000189; %m*kg^2 - момент инерции
Mb = 0.564; % N * m - электромагнитный момент
W = 60 * f1n / p ; % ob / min
M = 9550 * Pn / W; % N * m - электромагнитный момент
Mst = 0.00015 * M / Mb; %- момент статический
tauA =17.54; % базовый момент инерции

% Модуль «Преобразования координат»

sim('ASM').

X1 = Xh + XS1; - индуктивное сопротивление обмотки статора X2 = Xh + XS2; - индуктивное сопротивление обмотки ротора $R0 = R1 + R2*Xh^{2}/X2^{2};$ % and now averything as per unit values Rpu = U / I;Tpu = 1/(2*pi*f1n);r1 = R1 / Rpu;r2 = R2 / Rpu;r0 = R0 / Rpu;x1 = X1 / Rpu; $x^2 = X^2 / Rpu;$ xS1 = XS1 / Rpu;xS2 = XS2 / Rpu;xh = Xh / Rpu;Sigma = $1 - xh^2/(x1*x2)$; TS = Sigma * x1 / r0;T2 = x2 / r2: tStep=0.001; TFinal=60;

Для оценки эффективности устройства косвенного контроля координат разработана функциональная схема моделирования, представленная на рисунке 4.2, в которую входит: модель асинхронного электродвигателя (рисунок 2.1).

Схема моделирования системы косвенного контроля координат электродвигателя состоит из имитационной модели асинхронного электродвигателя, устройства косвенного контроля координат и модели сравнения.



Рисунок 4.2 - Функциональная схема моделирования

Модель асинхронного электродвигателя представлена моделью виртуальной машины, питающейся от трехфазного источника и подключенной выходом к блоку измерения, и выполнена в прикладном пакете Simulink компьютерной среды программирования Matlab.

Входными координатами модели асинхронного двигателя являются: токи и напряжения в трехфазной системе координат (A, B, C), также момент статического сопротивления, создаваемый механизмом.

На рисунке 4.3 показано окно настройки асинхронного двигателя[1, 12].

На рисунке 4.3 показано диалоговое окно, в полях настройки задаются:

- в первом поле – тип ротора – с короткозамкнутым ротором;

- во втором поле – координатная система отсчета;

- в третьем поле – мощность, действующее линейное напряжение и частота – Р, U, f, задаваемые в программе, выполняющей ввод необходимых данных для измерения выходных координат и преобразование переменных;

- в четвертом поле, пятом, шестом полях – параметры классической схемы замещения, задаваемые в программе, выполняющей ввод необходимых данных для измерения выходных координат и преобразование переменных, – а именно:

L1 - полная индуктивность обмотки статора;

L - взаимная индуктивность обмотки статора и ротора;

L2 - приведенная индуктивность рассеяния обмотки ротора;

r1, r2 - соответственно активные сопротивления обмоток статора и приведенного ротора;

- в седьмом поле – момент инерции ротора, коэффициент трения и число пар полюсов;

В последнем поле – начальные условия.

| Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Asynchronous Machine (mask) (link) | | | | | | |
| Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description. | | | | | | |
| You can specify initial values for stator and rotor currents. In the Initial conditions parameter you have the possibility to specify the stator current only : | | | | | | |
| [s()th(deg) isa,isb,isc(p.u.) pha,phb,phc(deg)]: | | | | | | |
| Or you can choose to enter the stator and the rotor initial currents: | | | | | | |
| [st] th(deg) isa,isb,isc(p.u.) pha,phb,phc(deg) ira,irb,irc(pu) pha,phb,phc } | | | | | | |
| Parameters | | | | | | |
| Rotor type: Wound | | | | | | |
| Reference frame: Rotor | | | | | | |
| Nom. power,L-L volt. and freq. [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]: | | | | | | |
| [Pn, U, f] | | | | | | |
| Stator [Rs(ohm) Lls(H)]: | | | | | | |
| [r1 L1] | | | | | | |
| Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]: | | | | | | |
| [r2 L2] | | | | | | |
| Mutual inductance Lm (H): | | | | | | |
| L | | | | | | |
| Inertia, friction factor and pairs of poles [$J(kg.m^2) F(N.m.s) p()$]: | | | | | | |
| [Jmt O p] | | | | | | |
| Initial conditions (read the details in the description above) | | | | | | |
| [[1,0_0,0,0_0,0,0] | | | | | | |
| OK Cancel Help Apply | | | | | | |

Рисунок 4.3 – Диалоговое окно настройки асинхронного двигателя

В процессе имитации модель позволяет наблюдать за несколькими переменными одновременно с помощью специального блока, который показан на рис. 4.4: угловая скорость; электромагнитный момент; абсолютная и относительная погрешности.



Рисунок 4.4 – Измерительный блок

Схема имитационного моделирования системы косвенного контроля координат электродвигателя разработана в пакете программ Matlab 6.0 и представлена на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Схема имитационного моделирования системы косвенного контроля координат АДКР

Разработанная модель, представленная на рисунке 4.5, включает в себя стандартные элементы библиотек системы MATLAB: источники синусоидального напряжения; элементы измерений (осциллоскопы, блоки записи в рабочее пространство); блок задания нагрузки и вспомогательные элементы[1, 12, 18].

Окно настройки блока источников синусоидального напряжения показано на рисунке 4.6. Видны поля настройки, где задаются значения напряжения (peak amplitude), установку фазы (phase) и частоты (frequency).

| | lock Parameters: V1 🛛 🛛 🛛 |
|----------|-------------------------------------|
| | - AC Voltage Source (mask) (link) |
| | Ideal sinusoidal AC Voltage source. |
| | Parameters |
| | Peak amplitude (V): |
| | 100 |
| | Phase (deg): |
| | 0 |
| | Frequency (Hz): |
| | 50 |
| • + | Sample time: |
| √) V1 | 0 |
| ¥ ▲ | Measurements None |
| • | OK Cancel Help Apply |

Рисунок 4.6 – Диалоговое окно настройки блока источников синусоидального напряжения

Для наблюдения и регистрации процессов в исследуемой модели установлены виртуальные приборы:

Scope – осциллоскоп для наблюдения временных зависимостей (рисунок 4.7);

Display – устройство для вывода на экран дисплея (рисунок 4.8).

С каждым графическим элементом связано окно настроек. На рисунке 4.7 показан экран осциллоскопа и его окно настроек. В первом поле окна настроек Number of axes можно изменять число регулируемых процессов.

| | 🚽 'Scope' parameters 📰 🛛 🛛 |
|------------|--|
| | General Data history Tip: try right clicking on axes |
| | Axes Number of axes: 1 floating scope Time range: auto Tick labels: bottom axis only |
| | Sampling Decimation 💌 1 |
| L Scope | OK Cancel Help Apply |

Рисунок 4.7 - Осциллоскоп для наблюдения временных зависимостей и диалоговое окно

| | Block Parameters: Display Z | | | | |
|---------|---|--|--|--|--|
| | Parameters Format: short Decimation: 1 | | | | |
| | Floating display Sample time (-1 for inherited): -1 | | | | |
| Display | OK Cancel Help Apply | | | | |

Рисунок 4.8 - Устройство для вывода на экран дисплея и диалоговое окно

Для измерения токов и напряжений использованы блоки Voltage Measurment, Current Measurment, показанные на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Блоки измерения для тока и напряжения

На основе выражений (3.2 - 3.8) создано устройство косвенного контроля координат с использованием пакета системного моделирования Simulink, представленное на рисунке 4.10



Рисунок 4.10 – Имитационная модель устройства косвенного контроля выходных координат АДКР

устройства Элементами, используемыми имитационной модели В косвенного контроля выходных координат, являются элементы из библиотеки интегратора, блоков (аналогового непрерывных звена аналогового дифференцирования, линейного аналогового звена, заданного передаточной функцией), библиотеки математических функций (аналогового сумматора, позволяющего суммировать любое число сигналов на входе и имеющей один вход; вычислителя, формирующего на выходе результат умножения или деления двух и более входных сигналов; звена, осуществляющего перемножение двух входных величин; аналогового усилителя), библиотеки нелинейных блоков (усилителя с ограничением).

Сравнение контролируемых координат асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и устройства косвенного контроля координат осуществляется разработанной имитационной моделью, приведенной на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Имитационная устройства модель сравнения координат

Визуализация результатов моделирования осуществляется многоканальными осциллоскопов на основе визуальных регистрирующих устройств, входящих в состав библиотеки компонентов пакета системного моделирования Simulink.

Оценка результатов моделирования осуществляется в определении абсолютной и относительной погрешностей, развиваемых электродвигателем электромагнитных моментов и угловой скоростей

$$\begin{split} \Delta M &= M_{\rm AB} - M_{\rm yctp.}; \\ \Delta \omega &= \omega_{\rm AB} - \omega_{\rm yctp}; \\ \delta_{\rm M} &= (\Delta M \ / \ M_{\rm AB} \)*100\%; \\ \delta_{\omega} &= (\Delta \omega / \ \omega_{\rm AB} \)*100\%, \end{split}$$

- где ΔM, Δω абсолютная погрешность электромагнитного момента и угловой скорости соответственно;
 - δ_M, δ_ω относительная погрешность электромагнитного момента и угловой скорости соответственно;
 - М_{дв}, ω_{дв}- -электромагнитный момент и угловая скорость, развиваемая электродвигателем соответственно;
 - М_{устр}; ω_{устр} электромагнитный момент и угловая скорость, измеренные устройством косвенного контроля координат;

а также выводится в виде непрерывных динамических зависимостей.

Для получения результатов необходимо проведение имитационного эксперимента для асинхронного электродвигателя.

4.2 Моделирование системы косвенного контроля координат АДКР

Для получения результатов проведено имитационное моделирование для асинхронного электродвигателя общепромышленного исполнения серии 4А, данные которых приведены в таблице 4.1[40, 41].

Для удобства расчетов эти данные приведены к базисным величинам, представленным в таблице 4.2.

| Данные двигателей | | Единица измерения | Тип двигателя | | |
|------------------------------|----------------|----------------------|---------------|--------|---------|
| | | | 4A50A4 | 4A71A4 | 4A112M4 |
| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Число пар полюсов | 2p | | 4 | 4 | 4 |
| Число фаз | m | | 3 | 3 | 3 |
| Частота питающего напряжения | f | Гц | 50 | 50 | 50 |
| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Выходная мощность | P ₂ | Вт | 60 | 550 | 5500 |

Таблица 4.1 - Основные данные исследуемых двигателей серии 4А

| Номинальное напряжение | U _{н.ф.} | В | 220 | 220 | 220 |
|------------------------------|-----------------------|-------|----------|--------|--------|
| Номинальный ток | I _{н.ф.} | A | 0,27 | 1,58 | 11,1 |
| Активное сопротивление | R ₁ | Ом | 152,9 | 16,39 | 1,32 |
| обмотки статора | | | | | |
| Активное сопротивление | R ₂ | Ом | 192 | 15,08 | 0,922 |
| обмотки ротора; | | | | | |
| | | | | | |
| Индуктивное сопротивление | X_1 | Ом | 160 | 12,27 | 1,439 |
| рассеяния обмотки статора | | | | | |
| Индуктивное сопротивление | X_2 | Ом | 134,7 | 24,33 | 2,35 |
| рассеяния обмотки ротора | | | | | |
| Сопротивление взаимной | X_{μ} | Ом | 837 | 195,9 | 51,5 |
| индукции | | | | | |
| Индуктивность обмотки | Lm | Гн | 2,66 | 0,624 | 0,164 |
| рассеяния обмотки статора; | | | | | |
| Полная индуктивность обмотки | L_1 | Гн | 3,175 | 0,663 | 0,169 |
| статора | | | | | |
| Полная индуктивность обмотки | L ₂ | Гн | 3,095 | 0,7015 | 0,1715 |
| ротора | | | | | |
| Кратность максимального | k _M | | 2,37 | 2,47 | 2,5 |
| момента | | | | | |
| Кратность максимального тока | kı | | 2,81 | 4,06 | 6,17 |
| Номинальное скольжение | S | | 0,078 | 0,075 | 0,035 |
| Момент инерции | J | KΓ*M2 | 0,000189 | 0,0011 | 0,0206 |
| Коэффициент мощности | $\cos \varphi$ | | 0,687 | 0,737 | 0,882 |

Таблица 4.2 – Базовые величины исследуемых двигателей серии 4А

| Данные | Единица | Тип двигателя | | | | |
|---|------------------------|---------------|-----------|-----------------------|--|--|
| двигателей | измерения | 4A50A4 | 4A71A4 | 4A112M4 | | |
| $U_{\delta} = U_{{}_{\mathrm{H},\varphi_{\cdot}}} \sqrt{2}$ | В | | 310 | | | |
| $I_{\rm d} = I_{\rm h.\phi.} \sqrt{2}$ | А | 0,381 | 2,23 | 15,7 | | |
| $Z_{\delta} = U_{\delta} / I_{\delta}$ | Ом | 815,8 | 139 | 19,7 | | |
| $P_{\delta} = (3/2) * U_{\delta} * I_{\delta}$ | Вт | 177,2 | 1036,9 | 7300,5 | | |
| $\omega_{\delta} = \omega_{o}$ | C ⁻¹ | 314 | | | | |
| $t = 1/\omega_{o}$ | (c) | 0,00318 | | | | |
| $M_{\delta} = P_{\delta} / \omega_{\delta}$ | Н*м | 0,564 | 3,3 | 23,25 | | |
| $J_{\rm d} = M_{\rm d} / \omega_{\rm d}^2$ | Кг*м ² | 5,68*10-6 | 33,5*10-3 | 0,24*10 ⁻³ | | |
| $\Psi_{\rm d} = U_{\rm d} / \omega_{\rm d}$ | Вб | 0,987 | 0,987 | 0,987 | | |
| $\Psi_{\delta} = M_{\delta}$ | | 1,73 | 0,295 | 0,042 | | |
| $J = J/J_{\delta}$ | | 17,54 | 32,1 | 85,8 | | |
| Ψ_{6}/i_{6} | | 2,6 | 0,44 | 0,063 | | |

Имитационное моделирование системы косвенного контроля координат выполнено в соответствии с приведенной на рисунке 4.5 схемой.

Для моделирования был принят режим пуска асинхронного двигателя как наиболее тяжелый, при котором параметры изменяются в широких пределах. При моделировании были приняты нулевые начальные условия, кроме того, принято:

- время начала моделирования t₀=0;

- время окончания $t_{\kappa 1} = 50/314$ c; $t_{\kappa 2} = 70/314$ c; $t_{\kappa 3} = 120/314$ c;

- шаг интегрирования $\Delta t = 0,001/314$ с.

Расчет осуществлялся методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с фиксированным шагом интегрирования.

Результаты моделирования системы косвенного контроля координат в виде осциллограмм динамических процессов приведены на рисунках 4.12-4.13 для асинхронных электродвигателей с номинальной мощностью 60 Вт; 550 Вт и 5500 Вт.

Анализ динамических процессов, приведенных на рисунке 4.12, показывает, что косвенный контроль угловой скорости и электромагнитного момента асинхронных двигателей серии 4А в диапазоне мощностей (60-5500 Вт) дает достаточную сходимость с измеренными характеристиками двигателя.

Для качественной оценки результатов моделирования получены кривые, характеризующие зависимости их абсолютной и относительной ошибок на рисунке 4.13.

В таблице 4.3 приведена оценка абсолютной и относительной ошибок результатов имитационных экспериментов.

| 1 | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--|
| Тип двигателя | Абсолютн | ая ошибка Δ, о.е. | Относительная ошибка б, % | | |
| | $\Delta \omega$,10 ⁻² | ΔM , 10 ⁻² | δ_{ω} , 10 ⁻² | $\delta_{_M}$, 10 ⁻² | |
| 4A50A4 | -5+5 | -0,01+0,01 | -1,5+0,5 | 1,33 | |
| 4A71A4 | -5+ 5 | -0,01+0,04 | -1,5+1,0 | 1,33 | |
| 4A112M4 | -5+ 5 | -0,01+ 0,03 | 0,0+ 5,0 | 1,33 | |

Таблица 4.3

Наибольшая величина ошибок не превышает 0,05 %.



Рисунок 4.12 – Динамические процессы ω, M= f(t) моделирования косвенного контроля координат асинхронного электродвигателя: а) двигатель 4А50А4; б) двигатель 4А71А4; в) двигатель 4А112М4



Рисунок 4.13 – Абсолютная и относительная ошибки динамических процессов ω, M = f(t) моделирования косвенного контроля координат АДКР: а) двигатель 4А50А4; б) двигатель 4А71А4; в) двигатель 4А112А4

Таким образом, исследование и контроль выходных координат электромагнитного момента и угловой скорости АДКР можно осуществлять на основе косвенного контроля координат.

```
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
```

Современный асинхронный электропривод представляет собой сложное электротехническое устройство, вобравшее в себя новейшие достижения в теории управления и практике создания микропроцессоров, силовых полупроводниковых приборов, защиты от помех, программных наработок в области управления и интерфейсов, а также создания надежных и высокоэффективных электродвигателей.

В рамках данной диссертации показано, что исследования в области создания асинхронных электроприводов с контролем выходных координат важны для промышленности. На основании проведенного обзора и анализа отобранного материала отмечено, что моделирование динамичных регулируемых асинхронных электроприводов является актуальной научной и практической задачей.

В диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

- разботана система имитационного моделирования АДКР в прикладном пакете Simulink компьютерной среды программирования Matlab 6.1, Matlab 6.5, позволяющая осуществлять косвенный контроль выходных координат АДКР с достаточной сходимостью с измеренными характеристиками двигателя;

- разработаны алгоритмы косвенного контроля выходных координат АДКР, позволяющие путем измерения мгновенных значений фазных токов и напряжений двух фаз обмоток статора АДКР и паспортных данных двигателя получить значения угловой скорости и электромагнитного момента;

- разработаны способы косвенного контроля электромагнитного момента АДКР, основанные на измерении мгновенных значений фазных токов и напряжений двух фаз обмоток статора и паспортных данных АДКР, позволяющие рассчитать значение угловой скорости, защищенные патентами РК;

- разработаны способы косвенного контроля угловой скорости АДКР, основанные на измерении мгновенных значений фазных токов и напряжений двух фаз обмоток статора и паспортных данных АДКР, позволяющие рассчитать значение угловой скорости, защищенные патентами РК;

- разработаны функциональные схемы устройства косвенного контроля координат АДКР, позволяющие использовать как промышленные микроконтроллеры, например MSP430F2xx, так и аппаратноспециализированные комплексы.

Анализ динамических процессов асинхронных двигателей серии 4А в диапазоне мощностей (60-5500 Вт), показывает, что косвенный контроль угловой скорости и электромагнитного момента асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором дает достаточную сходимость с измеренными характеристиками двигателя, с абсолютной и относительной ошибками не превышающими 0,5 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Ануфриев И., Смирнов А., Смирнова Е. МАТLAВ 7.- СПБ.: БХВ -Петербург, 2005.-1104 с.
- 2. Арион В.Д. Журавлев В.Г. Применение динамического программирования к задачам электроэнергетики.- Кишинев: 1989.-135 с.
- 3. Архипцев Ю.Ф., Котеленец Н.Ф. Асинхронные электродвигатели.- М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 4. А.С. СССР № 1508111, кл. G 01 L 3/10, опубл. 1987.
- 5. Башарин А.В. Управление электроприводом.- Л.: Энергоиздат, 1982.
- 6. Боднер В.А., Алферов А. В. Измерительные приборы.- М.: 1986.
- 7. Браславский И.Я. Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. -256 с.
- Браславский И.Я., Зюзев А.М., Тимофеев Д.Г. К построению САР скорости на основе системы ТПН-АД без тахогенераторных датчиков // Тезисы докладов научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями", Екатеринбург, 1992, с. 9-10.
- 9. Вержбицкий В.М. Численные методы: Математические методы и обыкновенные дифференциальные уравнения.–М.: Оникс 21 век. 2005.
- 10.Волков А.В. Датчик частоты для частотно-регулируемого электропривода. - Киев.: 1983.
- 11.Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Спб.: Питер, 2007. 350 с.
- 12. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Санкт-Петербург: Корона-Принт, 2001, 320 с.
- 13. Гольдберг О.Д. и др. Автоматизация контроля параметров и диагностики асинхронных двигателей. М. : Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
- 14. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. М.: Высшая школа, 1990. 225 с.
- 15.Гультяев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB. -СПБ.: Питер, 2000.- 429 с.
- 16.Гультяев А. Имитационное моделирование с среде Windows. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 1999. - 287с.
- 17. Данку А., Фаркаш А., Надь Л. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 18. Дьяконов В. Matlab 6: Учебный курс. Питер.: 2001.
- 19.Дьяконов В.П. МАТLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров.- М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.

- 20. Изосимов Д. Б. Многосвязный нелинейный идентификатор состояния асинхронного двигателя на скользящих режимах Проблемы управления многосвязными системами. М.: Наука, 1983. С.133-139
- 21. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 22.Инновационный Патент № 20031 бюл. № 2 от 14.02.2009 Способ измерения крутящегося момента асинхронного электродвигателя/ Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д.
- 23.Инновационный Патент № 21033 бюл. № 3 от 16.03.2009 Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя/ Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д.
- 24. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Академия, 2006. 496 с.
- 25.Кацман М.М. Электрический привод. М.: Академия, 2005. 384 с.
- 26.Кисаримов Р.А.Электропривод. М.: ИП РадиоСофт, 2008. 352 с.
- 27.Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001.- 704с.
- 28.Козаченко В. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам.
- 29.Кондрашев В.Е., Королев С.Б. МАТLAВ как система программирования научно-технических расчетов.- Москва: Мир, 2002.-350 с.
- 30.Копылов И.П. Математическое моделирование асинхронных машин. -М.: Высшая школа, 2001.- 328 с.
- 31.Красс М.С. Основы математики и ее приложения. М.: Дело, 2003.
- 32.Кузьмин П.К., Маничев В. Б. Автоматизация функционального проектирования.- Минск.: 1988.
- 33. Левинтов С.Д., Борисов А.М. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента. М.: Энергоатомиздат, 1984. 88 с.
- 34. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках М.: Энергоатомиздат, 1998, 200 с.
- 35. Лейтман М.Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 36.Мельников В. Ю., Бородацкий Е.Г. Датчик контроля координат трехфазного электродвигателя, Датчики электрических и неэлектрических величин: Тез. докл. к первой международной конференции, Барнаул, 1993 – с.121-122.
- 37. Мельников В. Ю., Бородацкий Е.Г. Косвенный контроль координат асинхронного короткозамкнутого двигателя. Деп. В Казгос ИНТИ, Алматы, 1994, вып.1, 69 с.
- 38.Мельников В.Ю., Кибартас В.В., Кибартене Ю. В. Косвенный контроль координат неявнополюсного синхронного электродвигателя. Павлодар, 2005, 145с.

- 39. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Косвенный метод контроля крутящего момента асинхронного электродвигателя// Материалы II Международной научно-практической конференции ««Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве», Павлодар, 2011.- с.65-67.
- 40. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Моделирование системы непрямого контроля координат асинхронного электродвигателя// Материалы Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы И перспективы применения чистых технологий для устойчивого развития регионов», Павлодар, 2005г.- с.47-49.
- 41.Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Моделирование системы непрямого контроля координат при прямом пуске асинхронного электродвигателя // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт», Омск, 2007г.с.102-105.
- 42. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Способ измерения угловой скорости вращения асинхронного трехфазного электродвигателя// Труды региональной научно-технической конференции молодых ученых, студентов, аспирантов (с международным участием) «Новые технологии на транспорте в энергетике и строительстве», Омск, 2010 г., с. 118-122.
- 43. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Способы измерения угловой скорости вращения и крутящего момента асинхронного электродвигателя// Материалы докладов шестнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Экология, надежность, безопасность», Томск, 2010, с. 404-406.
- 44.Никитенко А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. -М.: Высшая школа, 1983.
- 45.Пантелеев А.В., Бортаковский А.С. Теория управления в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2003.
- 46.Патент РК № 6585 от 15.09.98. Устройство для измерения частоты вращения асинхронного вращения/ Мельников В. Ю., Бородацкий Е.Г.
- 47.Патент РК № 8343, кл. G01L 3/10, опубл. 1999, Бюл. № 12.
- 48.Пересада СМ., Ковбаса С.Н. Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем // Техн. электродинам. 2002, № 4, с. 17-22.
- 49.Поздеев Д.А., Хрещатая С.А. Математическое исследование структуры бездатчикового частотно-токового асинхронного электропривода с векторным управлением// Электротехника. 2002, № 9, с.37-43.
- 50.Половко А.М. Бутусов П.Н. МАТLAВ для студента.- Санкт-Петербург: БХВ - Петербург, 2005.- 320 с.

- 51.Поспелов Л.П. Основы автоматизации производства. М.: Недра, 1988
- 52.Потапов Л.А., Юферов Ф.М. Измерение вращающихся моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей. М.: Энергия, 1984.
- 53.Предварительный Патент РК № 18934, бюл. № 11 от 15.11.2007 Способ измерения крутящегося момента асинхронного электродвигателя/ Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д.
- 54.Предварительный Патент РК № 18973, бюл. № 8 от 15.08.2008 Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя/ Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д.
- 55.Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987
- 56.Рыбальченко Ю.И. Магнитоупругие датчики крутящего момента. М.: Машиностроение, 1981. 128 с.
- 57. Свечарник Д. В. Электрические машины непосредственного привода. Безредукторный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- 58.Слежановский О.В. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. -М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 59.Старокожев А.И., Фролов Ю.М. Модель системы бездатчикового векторно¬го управления. - Труды Региональной научно-технической конференции «Сис¬темы и элеменш роботизированных комплексов», Воронеж 24-25 апр., 2003. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2003, с. 107-113.
- 60. Столов Л.Н., Афанасьев А.Д. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 61. Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин.М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 62. Трусов П.В. Введение в математическое моделирование. М.: Логос, 2004.
- 63. Тун А.Я. Системы контроля скорости электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.
- 64. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. Лениградское отделение: Энергия, 1975.
- 65.Умурзакова А.Д. The means of measuring the imprint coordinates for the three-phase asynchronous electric motor// Материалы Международной конференции «LifeIT2009: IT meets environmental and sustainable energy technologies», Hagen, Германия, 2009. с.10.
- 66. Умурзакова А.Д. Способ измерения крутящегося момента асинхронного электродвигателя на основе косвенного метода контроля координат// Материалы Международной научно-практической конференции «Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы», Павлодар, 2009. – с.56-59.

- 67. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979
- 68. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981.
- 69. Шрамков Е.Г. Электрические измерения. М.: Высшая школа, 1972.
- 70.Эпштейн И.И. автоматизированный электропривод переменного тока. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- 71.D. Schroder, C Schaffner and U. Lenz. Neural-Net Based Observes for Sensor¬less Drives // In Proc. IECON *94. - 1994. - V.3. - P. 1599-1610.
- 72.Hisao Kubota and Kouki Matsuse. Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Machines using Flux Observer // In Proc. IECON '94. - 1994. - V.3. -P.1611-1615.
- 73.Ichiro Miyeshita, Akio Imayanayida, Takashi Koga. Recent Industrial Applica¬tion of Speed Sensorless Vector Control in Japan // In Proc. IECON *94. - 1994. -V.3.-P.1573-1578
- 74.Marchesoni M., Segarich P., Soressi E. A Simple Approach to Flux and Speed Observation in Induction Motor Drives // In Proc. IECON '94. 1994. V.I. P.305-310.
- 75.Tung-Hai Chin. Approaches for Vector Control of Induction Motor without Speed Sensor// In Proc. IECON *94. -1994. V.3. P. 1616-1620.