

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

---

УДК 681.5.11

## ДИСКРЕТНАЯ СИСТЕМА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

А.А. Абдуллин

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.Н. Дроздов

Существует ряд задач для решения которых требуется применение систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В системах передачи данных для обеспечения синхронной работы приемной и передающей аппаратуры. Так же в аппаратуре связи с автономными синхронизирующими генераторами приемника и передатчика, когда связь организуется через искусственные спутники Земли. Близки по свойствам к системам ФАПЧ электромеханические развертывающие устройства, в которых воздействие на электродвигатель осуществляется через управляемых генератор. При создании преобразователей частоты на полностью управляемых ключах система ФАПЧ обеспечивает синхронизацию фазы тока и напряжения питающей сети, за счет чего минимизируется реактивная составляющая полной мощности.

Реализация систем ФАПЧ возможна двумя типами: аналоговая и дискретная (цифровая). Обе реализации используют одинаковую структурную схему, которая включает в себя следующие основные элементы: фазовый дискриминатор (ФД), который осуществляет измерение фазового рассогласования; управляемый генератор (УГ), который позволяет получать сигнал, имеющий заданные характеристики; фильтр низких частот (ФНЧ); устройство управления. В случае аналоговой реализации синтезируется непрерывная система ФАПЧ. Возможен вариант, при котором синтезированная непрерывная система ФАПЧ преобразуется к дискретной, но при этом требуется чрезвычайно высокое быстродействие контроллера. В настоящее время, с учетом развития современной микропроцессорной техники, следует отдавать предпочтение цифровой реализации ФАПЧ. В этом случае программными средствами реализуется дискретные ФД, ФНЧ и УГ. Для управления системой дискретной ФАПЧ требуется соответствующий алгоритм. В работе предусматривается синтез алгоритма управления и программная реализация системы ДФАПЧ. Расчет и моделирование производились с использованием пакета прикладных программ MATLAB.

УДК 62-892

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩИХСЯ УГЛОВ ОПЕРЕЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ $\beta_0$ В ПАКЕТЕ MATLAB/SIMULINK

В.А. Алидин

Научный руководитель – м.н.с. А.В. Егоров

**Введение.** В настоящее время наиболее перспективными двигателями для построения моментных приводов остаются вентильные двигатели (ВД) на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе. ВД обладают регулировочными и механическими характеристиками близкими к характеристикам двигателей постоянного тока (ДПТ), но лишены главных недостатков последних. В вентильном двигателе нет щеточно-коллекторного узла, а источник греющих потерь располагается на статоре двигателя.

Для моделирования работы ВД необходимо реализовать математическую модель в том или ином математическом пакете, что может потребовать значительные затраты времени. В то же время пакет MATLAB с библиотекой Simulink имеет в своем составе готовую модель синхронной машины с постоянными магнитами, использование которой имеет ряд особенностей.

**Цель.** Получение простой и наглядной модели вентильного двигателя на базе библиотечной модели синхронного двигателя пакета MATLAB. Исследование влияния угла опережения включения на вопросы динамики привода на базе ВД.

**Основной результат.** В результате исследования получена зависимость момента развиваемого ВД от угла опережения включения  $\beta_0$ . Даны рекомендации по моделированию вентильного двигателя в программе MATLAB.

**Вывод.** Предлагаемая модель, с одной стороны, позволяет сократить время на создание модели ВД, с другой стороны, позволяет специалистам из смежных областей скорее приступить к моделированию, например, системы управления, имея только общее представление о ВД.

УДК 62-523.2

## **БЕЗДАТЧИКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛА СИГНАЛА ПРОТИВО-ЭДС**

**Д.В. Горчаков**

(Московский энергетический институт (технический университет) филиал в г. Смоленске)

**Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Льготчиков**

(Московский энергетический институт (технический университет) филиал в г. Смоленске)

**Краткое вступление. Постановка проблемы.** В настоящее время вентильные двигатели (ВД) считаются наиболее перспективными электромеханическими преобразователями благодаря своим высоким энергетическим показателям, компактности, надежности и низким эксплуатационным расходам. В связи с чем, вентильные электроприводы интенсивно проникают на рынок бытовой и промышленной техники.

Как правило, ВД оборудуются датчиками положения ротора (ДПР) для определения момента подачи импульсов управления на ключи инвертора.

С точки зрения стоимости и надежности электропривода желательно избежать использования ДПР. При этом информацию о положении ротора получают косвенным путем, используя так называемые алгоритмы «бездатчикового» управления.

Известен алгоритм управления ВД, в котором положение ротора определяется по прохождению через ноль противо-ЭДС отключенной фазы двигателя. С момента пересечения нуля сигналом противо-ЭДС отсчитывается временная задержка, в течение которой ротор двигателя поворачивается на 30 эл. градусов. По истечении времени задержки производится коммутация фазы.

При моделировании в среде MATLAB7.10.0 в пакете Simulink было обнаружено, что возникающие в момент коммутации обмоток импульсные помехи существенно усложняют определение момента перехода через ноль противо-ЭДС, а, следовательно, и определение моментов коммутации фаз двигателя.

**Базовые положения исследования.** В работе предложен алгоритм управления, в котором определение положения ротора производится путем анализа предварительно

проинтегрированного сигнала противо-ЭДС. Интегрирование в данном случае позволяет исключить из алгоритма управления расчет задержки подачи управляющего импульса на ключи инвертора.

**Основной результат.** Моделирование описанной системы показало, что помимо общего упрощения алгоритма работы системы управления, предложенный метод обеспечивает большую устойчивость системы управления к импульсным помехам, возникающим в результате коммутации обмоток двигателя.

УДК 681.5.033.23

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА РЕСУРСОВ**

**А.В. Зотов**

(Вятский государственный университет, г. Киров)

**Научный руководитель – д.т.н., профессор В.С. Хорошавин**

(Вятский государственный университет, г. Киров)

Объект управления (ОУ) представлен в виде структуры образованной последовательным соединением линейного динамического звена и нелинейного динамического звена с экстремальной статической характеристикой, и эта структура может быть описана системой дифференциальных уравнений нелинейных по координатам, но линейных по управлениям.

Необходимо найти допустимое управление, доставляющее минимум интегральному критерию, время движения от начальной до конечной точки не задано.

Были исследованы особенности трех систем управления нелинейными динамическими объектами с экстремальной статической характеристикой, а именно система управления, реализующая оптимальное управление в виде кусочно-непрерывной функции, содержащей комбинацию релейного и особого управления [1], система управления, реализующая квазиоптимальное управление в виде непрерывной функции, содержащей особое управление и добавку управления [2], и система управления, реализующая адаптивное управление [3]. Законы управления для первых двух систем найдены на основе принципа максимума Понтрягина применительно к нелинейным объектам. Третья система управления реализована на ПИД-регуляторе с переменным коэффициентом усиления. Системы управления сравнивались по минимуму расхода ресурса (характеризуемым координатой на выходе линейного звена и входе нелинейного звена) в переходном процессе, по времени переходного процесса, по асимптотической устойчивости в конечной точке, и по перерегулированию.

Система, реализующая оптимальное управление в виде кусочно-непрерывной функции, обеспечивает не только наименьшее значение интегрального критерия среди рассматриваемых систем управления, но и для многих граничных условий наибольшее быстродействие. К недостаткам данной системы управления можно отнести необходимость реализации стабилизации ОУ в конечной точке, что усложняет систему управления. Переходной процесс сопровождается значительным перерегулированием по координате на выходе линейного звена и входе нелинейного звена. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке реальных систем управления.

Система, реализующая квазиоптимальное управление, показывает большее, чем для системы оптимального управления значение интегрального критерия на траекториях (для некоторых граничных условий он больше в несколько раз, чем для системы оптимального управления) и большее время переходного процесса. Однако данная система управления доставляет асимптотическую устойчивость ОУ, отсутствует перерегулирование по

координатам, управление является непрерывной функцией и легко реализуемо.

Система с адаптивным управлением стабилизирует ОУ в конечной точке или в малой ее окрестности. К недостаткам данной системы можно отнести то, что для большинства граничных условий показывает самое большое значение интегрального критерия в переходном процессе, и самое большое время переходного процесса для большинства граничных условий. Также к недостаткам можно отнести небольшое перерегулирование по обеим координатам. Однако для некоторых граничных условий числовые значения интегральных критериев при квазиоптимальном и адаптивном управлении незначительно отличаются, что позволяет сделать вывод о пригодности адаптивного регулятора в ряде случаев. Уменьшение длительности переходного процесса возможно за счет увеличения коэффициента усиления регулятора, однако при этом будет расти перерегулирование и колебательность.

### **Литература**

1. Хорошавин В.С. Прикладные методы качественного исследования особых управлений и структур нелинейных оптимальных систем: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Кировский политехнический институт, 1993. – 402 с.
2. Зотов А.В. Нахождение закона управления непрерывными инерционными объектами второго порядка с экстремальной статической характеристикой, доставляющего асимптотическую устойчивость в состоянии равновесия, отличном от точки экстремума // Материалы Международной заочной научно-практической конференции «Наука, образование, бизнес: проблемы, перспективы, интеграция». – М.: Наука. – 2013.
3. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 1 // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74.

УДК 621.313

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО КОРТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**А.А. Майков**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Усольцев**

**Краткое введение.** В работе исследуется трехфазный асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Номинальная частота вращения 2800 об/мин. Электрическая мощность двигателя составляет 370 Вт. Номинальные напряжения для подключения звезда/треугольник 690/400 В. Двигатель установлен в учебном лабораторном стенде, позволяющем исследовать характеристики двигателя, а также осуществлять управление двигателем по закону  $U/f=\text{const}$  с фиксированными значениями частоты входного напряжения.

**Целью работы** является определение параметров схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, и построение модели на основе расчета. Сравнение экспериментальных результатов и модели при различных значениях частоты и величины напряжения подчиняющихся закону  $U/f=\text{const}$ .

**Базовые положения исследования.** Для построения модели были использованы механическая, скоростная и моментная характеристики при напряжении питания 220 В и частоте 50 Гц. Поскольку двигатель работал на пониженном напряжении, обмотки статора были подключены треугольником для увеличения электромагнитного момента.

Для исключения систематических погрешностей, вносимых нагрузкой, были определены моменты сухого и вязкого трения установки и учтены при обработке результатов.

Для определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя использовались три основные точки механической характеристики: пуск или точка короткого замыкания, точка опрокидывания и точка холостого хода.

В режиме холостого хода цепь ротора разомкнута, учитывая это нашли суммарное активное и индуктивное сопротивление. Для определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора воспользовались данными режима короткого замыкания. После этого нашли индуктивное сопротивление ветви намагничивания. Сопротивление ротора нашли из точки опрокидывания через механическую мощность и далее нашли активное сопротивление статора.

При больших скольжениях в эксперименте проявилось влияние вытеснения тока в стержнях ротора, поэтому по точке короткого замыкания были определены коэффициенты вытеснения для активного и индуктивного сопротивления обмотки.

Полученных параметров достаточно для построения математической модели и изучения ее реакции на изменение управления по закону  $U/f=\text{const}$ .

**Промежуточные результаты.** При снятии механических характеристик было выявлено падение напряжения питания, при уменьшении сопротивления нагрузки, из-за большого внутреннего сопротивления источника питания, что может повлиять на точность расчета параметров схемы замещения и на всю модель в целом.

Кроме того, дополнительную погрешность порядка 2–4% вносит наличие высших гармоник ШИП.

Механические характеристики рассчитывались из уравнения электромагнитного момента по формуле Клосса, а так же из уравнений состояния двигателя вида:

$$M := \frac{z_p \cdot P_{\text{mech}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1 - s)}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{mech}}$  – механическая мощность;  $s$  – скольжение.

Механические характеристики на основании выражения (1) лучше соотносятся с экспериментальными данными, чем механические характеристики построенные по формуле Клосса. Это объясняется тем, что в формуле Клосса не учитывается эффект вытеснения тока, а также комплексное значение коэффициента привидения Т-образной схемы замещения к Г-образной.

На низких частотах питания, порядка 5 Гц погрешность значительно увеличивается, что объясняется малым электромагнитным моментом асинхронного двигателя, сравнимым с суммарным моментом трения и погрешностью системы.

**Основной результат.** В результате в данной работе мы получили математическую модель, достаточно точно повторяющую основные характеристики данного трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при различных значениях напряжения и частоты питания не ниже 10 Гц с соблюдением закона управления  $U/f=\text{const}$  с погрешностью не превышающей 15%.

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ  
НАПРЯЖЕНИЯ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЕТЕВОГО ТОКА  
И СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ СЕТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ  
ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ**

**Н.А. Поляков**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент В.С. Томасов**

На сегодняшний день вопросы энергоэффективности преобразователей электрической энергии и показателей качества энергопотребления играют важную роль при проектировании полупроводниковых преобразователей. Все более ужесточаются рамки требований к гармоническому составу токов и напряжений питающей сети, диктуемые как ГОСТом, так и международными стандартами (Например, ГОСТ Р 51317.3.2-2006, соответствующий международному стандарту МЭК 61000-3-2:2005 или вступивший в силу с января 2013 года ГОСТ Р 54149-2010)).

Внедрение полупроводниковых преобразователей на полностью управляемых ключах в системы электропривода является оправданным с точки зрения создания устройств, соответствующих современным требованиям к энергетической эффективности и энергетической совместимости. Активные выпрямители напряжения (АВН) позволяют формировать на стороне питающей сети практически синусоидальную форму потребляемого тока. Использование системы управления с заданием фазы тока, синфазной синусоидальным напряжениям питающей сети, позволяет компенсировать реактивную составляющую мощности. Однако, для промышленных устройств необходимо учитывать неидеальный характер самой питающей сети. Поэтому для достижения максимальной производительности систем с трехфазными АВН в информационной подсистеме преобразователя необходимо обеспечивать не только математические преобразования, связанные с преобразованием координат, но и осуществлять фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) для синхронизации с фазой и частотой первой гармоники фазового напряжения.

В работе рассматривается влияние АВН с системой управления с формированием задания на основе выделения фазы первой гармоники напряжения промышленной сети на гармонический состав тока в питающей сети и составляющие полной мощности. Осуществлено внедрение системы ФАПЧ в систему управления АВН с преобразованием координат. Исследование работы системы управления проведено в среде MATLAB/Simulink. Работа системы управления с ФАПЧ рассмотрена в условиях идеальной сети, а так же в сети с искажениями формы напряжения, как соответствующими ГОСТ, так и несоответствующими. Рассмотрено применение стандарта IEEE 1459-2010 для расчета составляющей полной мощности при несинусоидальной несимметричной нагрузке.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСКОМПЕНСИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ПИТАНИИ  
ОТ ИСТОЧНИКА СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ**

**А.В. Свириденко**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Усольцев**

**Краткое введение.** В работе исследуется двигатель постоянного тока (ДПТ) с электромагнитным возбуждением. Электрическая мощность двигателя составляет 370 Вт. Номинальная частота вращения 2200 об/мин. Двигатель установлен в учебном лабораторном

стенде, позволяющем исследовать характеристики двигателя, а также создавать замкнутые системы управления электроприводом на его основе. При исследовании была обнаружена значительная нелинейность характеристик двигателя, которую можно объяснить, прежде всего, наличием нескомпенсированного поперечного магнитного потока реакции якоря. Нелинейность двигателя затрудняет проектирование систем замкнутого электропривода на его основе. Детальное исследование рассматриваемого двигателя и разработка его математической модели позволит обеспечить заданное качество регулирования в статических и переходных режимах.

**Целью работы** является получение математической модели двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при питании от источника соизмеримой мощности.

**Базовые положения исследования.** Для разделения влияния источника питания и реакции якоря на характеристики двигателя исследование проводилось в режимах независимого и параллельного возбуждения. В первом случае питание обмотки возбуждения (ОВ) производилось от отдельного источника, а во втором она подключалась к источнику питания широтно-импульсного регулятора (ШИР), включенного в цепь обмотки якоря.

Если мощность источника питания соизмерима с мощностью двигателя, то напряжение на якоре машины и на обмотке возбуждения заметно изменяется с изменением нагрузки. Это связано с изменением падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника и ШИР. Увеличение нагрузки двигателя вызывает понижение напряжения и, соответственно, тока обмотки возбуждения, т.е. приводит к уменьшению магнитного потока главных полюсов.

При независимом возбуждении магнитодвижущая сила ОВ и создаваемый ею магнитный поток остаются постоянными. В то же время, отсутствие компенсационной обмотки в машине приводит к тому, что магнитный поток, создаваемый током якоря, искажает картину магнитного поля. На одном краю полюсного наконечника магнитный поток ослабляется, а на другом краю – усиливается. Та часть полюсного наконечника, через которую проходит больший магнитный поток, насыщается. Это приводит к увеличению эквивалентного полного сопротивления магнитной цепи и магнитный поток в зазоре машины уменьшается. Изменение магнитного потока под влиянием тока якоря вызывает изменение параметров машины как объекта управления.

Размагничивание двигателя по мере роста нагрузки компенсируется увеличением тока якоря. Однако возможности компенсации ограничены сопротивлением цепи якоря, которое включает в себя, помимо сопротивления обмотки и щеточных контактов, внутреннее сопротивление источника питания и ключей ШИР. Поэтому при некоторой нагрузке двигатель опрокидывается, т.е. вращающий момент перестает расти и скорость резко снижается вплоть до полной остановки.

**Промежуточные результаты.** В результате экспериментальных исследований было установлено, что мощность источника питания практически равна мощности двигателя. Кроме того, внешняя характеристика источника существенно нелинейна, что в первую очередь связано с нелинейностью ключей ШИР.

Изменение потокосцепления якоря двигателя под влиянием нагрузки  $\Delta\Psi = f(i_a)$  по отношению к величине потокосцепления на холостом ходу  $\Psi_0$  можно вычислить из экспериментальной скоростной характеристики  $\omega = f(i_a)$  в виде

$$\Delta\Psi = \frac{u - i_a r_a}{\omega} - \Psi_0,$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения, а  $i_a$  – ток якоря.

Для независимого и параллельного возбуждения данную функцию можно аппроксимировать зависимостями:

$$\Delta\bar{\Psi}_{i_A} = 0,85 \cdot \left[ \cos\left(\frac{\pi \cdot i_a}{13}\right) - 1 \right]; \quad \Delta\bar{\Psi}_{i_A} = 0,3 \cdot \left[ \cos\left(\frac{\pi \cdot i_a}{5,3}\right) - 1 \right]$$

и представить потокосцепления как

$$\Psi(i_a) = \Psi_0 + \Delta\bar{\Psi}$$

Тогда уравнения скоростных и моментных характеристик примут вид

$$\omega(i_a) = \frac{E - (i_a)^{0,8} R}{\Psi(i_a)}; \quad M(i_a) = i_a \Psi(i_a) \quad (1)$$

где  $E$  – ЭДС источника питания. Степенные функции  $(i_a)^{0,8}$  в уравнении скоростной характеристики использованы для учета нелинейностей, не связанных с размагничиванием.

Характеристики (1) являются параметрическим заданием функции механической характеристики, где в качестве параметра используется ток якоря  $i_a$ . Механические характеристики двигателя при независимом и параллельном возбуждении, построенные по уравнениям (1), в области рабочих нагрузок обеспечивают сходимость к экспериментальным значениям с погрешностью, не превышающей 2–5%, и моделируют эффект опрокидывания. Это позволяет использовать полученные выражения в качестве математической модели статического режима работы двигателя.

Электромагнитные и электромеханические процессы двигателя в динамике требуют дополнительных исследований, основой которых может служить полученная статическая модель машины. Необходимо также детально исследовать и учесть характеристики источника питания и ШИР.

**Основной результат.** Основным результатом данной работы является математическая модель, адекватно отражающая основные характеристики нескомпенсированного двигателя постоянного тока в статическом режиме работы, при питании его от источника соизмеримой мощности. Она позволяет скорректировать характеристики лабораторной установки. Кроме того, после дополнительных исследований в ней можно учесть также нелинейные динамические явления, обеспечив тем самым полное описание двигателя как объекта управления.

УДК 681.5.11

## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛА СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТРЕХМАССОВОЙ И ДВУХМАССОВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОСЬЮ

М.Е. Сергеева

Научный руководитель – к.т.н., доцент М.В. Никитина

Объектом исследования данной работы является 4-х контурная система управления следящего электропривода опоротно-поворотного устройства (ОПУ) азимутальной оси большого наземного телескопа Алтайского оптико-лазерного центра. Назначение привода – обеспечение движения азимутальной оси в соответствии с подаваемыми на систему управления сигналами задания в условиях больших значений моментов инерции оси и действия на валу значительного момента нагрузки типа «сухое трение».

Динамические качества следящих электроприводов в значительной степени определяются конструкцией и параметрами ОПУ. По данным разработчиков ось телескопа является нежесткой и ее механизм может быть представлен двухмассовой и трехмассовой моделями. Нежесткость оси обуславливает необходимость ограничения полосы пропускания



частот электропривода при проектировании системы управления и, как следствие, к возрастанию его динамических ошибок.

**Целью работы** является исследование и сравнение динамических характеристик следящего электропривода с нежесткими связями при представлении его трехмассовой и двухмассовой математической моделью.

В ходе исследования была разработана математическая модель 4-х контурной системы следящего электропривода с трехмассовой исполнительной осью, разработана математическая модель 4-х контурной системы следящего электропривода с эквивалентной двухмассовой исполнительной осью, было проведено моделирование реакции полученных систем на скачкообразное и линейно-возрастающее задающее воздействие.

Сравнительный анализ результатов моделирования показал, что графики изменения реакций координат двухмассовой и трехмассовой системы практически совпадают, время реакции обеих системы соответствуют расчетной, т.е. переходным характеристикам системы, настроенной на симметричный оптимум, что подтверждает корректность настроек регуляторов и используемой методики синтеза.

УДК 681.5.09

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ АНАЛИЗА ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ В ФАЗАХ**

**Н.А. Смирнов**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Усольцев**

**Постановка проблемы.** При эксплуатации приводной техники возможны различные отказы в работе составных частей привода, в том числе и выход из строя элементов силовой подсистемы, в частности, электродвигателя. При этом простые алгоритмы защиты, типа защиты по превышению тока, не всегда способны распознать неисправность двигателя и отключить привод. В результате изменяются параметры объекта и искажаются токи в обмотках двигателя, что напрямую влияет на качество управления такими системами и на срок службы двигателя, подшипников и полупроводникового силового каскада.

**Цель работы** является определение неисправностей в статоре синхронного двигателя, таких как межвитковые и межфазные короткие замыкания и короткое замыкание фазы на корпус в двигателе, обрыв фазы, путем анализа гармонического состава токов в фазах.

**Базовые положения исследования.** Можно выделить основные неисправности в статоре синхронного двигателя:

- обрыв фазного провода;
- замыкание на землю в фазе двигателя;
- межвитковое замыкание в фазе двигателя;
- межфазное замыкание в двигателе.

Исследуется влияние данных неисправностей на спектральный состав токов в фазах двигателя. Выявляются характерные гармоники для каждого типа неисправностей.

**Промежуточные результаты.** На основе системы уравнений, описывающих работу системы автономный инвертор напряжения – синхронный электродвигатель, работающий в режиме вентильного двигателя, разработана и реализована в пакете MATLAB/ Simulink математическая модель объекта.

В модель подаются тестовые синусоидальные ШИМ-сигналы, формирующие токи в фазах двигателя. После чего массивы значений токов раскладываются в ряд Фурье и

производится сравнение полученных последовательностей для исправной системы и при возникновении исследуемых отказов.

Оценивается влияние на точность определения типа отказа разреживание массивов анализируемых данных для снижения вычислительной нагрузки.

**Основной результат.** В результате реализуется выявление и локализация отказов в системе автономный инвертор напряжения – синхронный электродвигатель. Диагностируются такие нарушения, как межвитковые и межфазные короткие замыкания и короткое замыкание фазы на корпус в двигателе, обрыв фазы. Реализация методики позволяет повысить надежность разрабатываемых систем электропривода и сократить время на выявление и устранение неисправностей при нарушении нормального режима работы электропривода. Ограничением данной методики является необходимость вывода из работы электропривода для выдачи тестовых сигналов. Поэтому рекомендуется использовать ее при подготовке привода к работе и при локализации неисправности, косвенно обнаруженной во время работы привода по ухудшению показателей качества электропривода, таких как величина ошибки слежения.

УДК 621.3.078

## **РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО СТЕНДА ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ШАР НА ПЛОСКОСТИ»**

**М.А. Соколов**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Усольцев**

**Введение.** В настоящее время, изучение основ автоматического регулирования, студентами технических специальностей, носит чаще всего чисто теоретический характер. И хотя знание теоретической базы предмета играет первостепенную роль, отсутствие в учебном процессе практической составляющей, негативно сказывается на полученных знаниях. В качестве восполнения этого недостатка, необходимо создать лабораторный стенд, который позволит наглядно изучить различные способы автоматического регулирования, а так же развить практические навыки по разработке и настройке регуляторов при различных параметрах системы и различных внешних воздействиях.

**Цель работы.** Создание прототипа обучающего стенда для обучения основам автоматического регулирования на примере динамической системы «шар на плоскости». Разработка программного оснащения установки, а так же создание методики обучения основам автоматического регулирования на основе данного стенда.

**Краткое описание установки.** Система представляет собой плоскость, по которой свободно перемещается шар. Центр плоскости жестко закреплен на поворотном шарнире, вокруг которого она может поворачиваться на некоторый угол. Поворот плоскости производится за счет двух электромоторов, расположенных снизу, каждый из которых производит независимый поворот плоскости вокруг одной из двух возможных осей. Обратная связь, по положению шара реализована в реальном времени при помощи машинного зрения, захват изображения для которого производится при помощи видеокамеры, а последующая цветокоррекция и обработка реализована на компьютере с использованием стандартной библиотеки для работы с изображениями в пакете MATLAB.

Алгоритмы автоматического регулирования, пользовательский интерфейс с представлением данных о работе стенда в реальном времени, а также формирование сигналов задания для электромоторов, также реализованы в среде MATLAB/Simulink. Эта

среда, для работы со стендом была выбрана исходя из ее широких возможностей и функционала, а также благодаря тому, что она часто используется как в образовательном процессе, для создания виртуальных моделей регуляторов и объектов регулирования, а также для разработки реальных инженерных решений в сфере автоматического управления.

Работа с установкой может производиться на разных уровнях. Поверхностное изучение автоматического регулирования, подразумевает работу только с пользовательским интерфейсом и наблюдение переходных процессов, при различных параметрах. При более глубоком изучении дисциплины, возможна работа с блочной диаграммой, реализация различных регуляторов с последующей настройкой, создание алгоритмов управления электромоторами, адаптация системы регулирования под изменяющиеся параметры окружающей среды, сопоставление и анализ данных теоретического моделирования и эксперимента.

Неидеальность факторов и нелинейность величин, неизбежно возникающие при переходе от работы с виртуальной моделью к работе с реальной установкой, также положительно влияют на процесс обучения. Сравнение данных теоретического и экспериментального анализа, позволит лучше понять процессы, связанные с особенностями автоматического регулирования, развить практические навыки настройки регуляторов с учетом реальных факторов, а также поможет вызвать интерес к изучаемой дисциплине.

**Основной результат и дальнейшее направление работы.** Результатом проведенной работы является прототип учебного стенда, разработанное программное оснащение установки, а также основные принципы обучения основам автоматического регулирования с использованием данного стенда. Главное направление дальнейшей работы в данной области – расширение функционала лабораторного стенда и совершенствование методики его применения в образовательном процессе.

УДК 681.5.11

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕЖЕСТКОЙ ОСЬЮ СКАНИРОВАНИЯ**

**Д.А. Субботин**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Толмачёв**

Одной из актуальных задач в области современного электропривода является задача расширения функциональных возможностей трехосных телескопов траекторных измерений путем повышения точности воспроизведения заданной диаграммы движения электроприводом оси сканирования. Характерными особенностями подобных осей являются ограниченный диапазон регулирования положения и повышенная точность поддержания скорости на рабочих участках диаграммы сканирования.

Для большинства сканирующих осей трехосных телескопов траекторных измерений рабочий диапазон регулирования угла составляет примерно 1–2 градуса, а масса установленного на сканирующей оси оборудования может достигать 700 кг. Известные автору аналоги сканирующих осей, в частности системы тепловизионного наблюдения, во-первых, практически не описаны теоретически, а во вторых имеют массу менее 3–4 кг.

Это приводит нас к необходимости проведения серьезных теоретических и экспериментальных исследований.

**Целью работы** является выбор оптимального структурного решения системы управления электропривода оси сканирования с нежесткими связями с позиции обеспечения наиболее высокой точности поддержания скорости на рабочем участке диаграммы сканирования.

Объектом исследования является безредукторный электропривод оси сканирования

трехосного инфракрасного телескопа, построенный на основе бесконтактного магнитоэлектрического преобразователя (МЭП) напряжения на обмотке управления в пропорциональный угол поворота ротора мостового типа с возбуждением от постоянных магнитов и ограниченным углом поворота.

Назначение привода – обеспечение движения оси в соответствии заданными трапециидальными диаграммами сканирования в режимах широкого и узкого угловых полей, отличающимся диапазоном углов сканирования и длительностями рабочих и нерабочих участков.

К числу определяющих требований относится обеспечение высокой точности поддержания скорости движения на рабочих участках диаграммы сканирования в условиях ограниченного предельного быстродействия МЭП, действия на валу значительного момента нагрузки типа «сухое трение» и ограничения на допустимое напряжение на обмотке управления МЭП. Так для исследуемого привода требуется поддержание скорости на рабочих участках не хуже 5% на уровне 1град/с при моментах нагрузки до 25 Нм.

Структурное решение системы управления, так же как и предельные динамические характеристики электропривода оси сканирования телескопа определяются статическими и динамическими характеристиками МЭП с инерционной нагрузкой. Исследование и анализ одноконтурных систем управления электропривода оси сканирования с абсолютно жесткими связями показали, что реализация заданного движения оси возможно как в структурах, замкнутых по углу поворота ротора МЭП, так и в структурах, замкнутых по скорости вращения.

Следующим шагом анализа и исследования электропривода оси сканирования на основе МЭП является синтез и математическое моделирование нежесткой оси сканирования с задаваемым коэффициентом жесткости и возможностью учитывать механические резонансы системы.

В ходе исследования была разработана адекватная математическая модель двухмассовой оси сканирования и проведено математическое моделирование реакции полученной системы на различные задающие воздействия, при разных значениях коэффициента жесткости системы. Сравнительный анализ результатов моделирования одномассовой и двухмассовой систем позволил определить минимально возможный коэффициент жесткости, при котором поведение двухмассовой системы можно свести к одномассовой.

На основе полученного результата к двухмассовой системе были применены методики синтеза системы управления, полученные ранее для одномассовой модели.

Была исследована одноконтурная система с ПД-регулятором скорости, двухконтурная система с ПД-регулятором во внутреннем контуре и ПИ+И регуляторами во внешнем, сформировано задающее воздействие из условия обеспечения траектории движения на нерабочем участке так, чтобы подход к рабочему участку и выход с него осуществлялся с нулевым ускорением.

Надо отметить, что обоснование использования данных структурных решений и методики синтеза регуляторов были подробно описаны в предшествующих докладах, посвященных одномассовой модели сканирующей оси.

Для указанных выше систем управления и задающего воздействия было проведено математическое моделирование режимов работы электропривода в узком и широком угловых полях.

Анализ результатов сравнительного моделирования одномассовой и двухмассовой систем показал на отличия в их поведении при переходе от нерабочего участка сканирования к рабочему.

## **ВИДЫ ВОЗМУЩЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОСИ ТЕЛЕСКОПА, НА ПАЛУБЕ КОРАБЛЯ В УСЛОВИЯХ МОРСКОЙ КАЧКИ**

**С.А. Тушев**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент В.С. Томасов**

**Введение.** Опорно-поворотное устройство (ОПУ) телескопа установлено на палубе корабля без гиросtabilизированной платформы. Предполагается, что в районе использования этого телескопа действует морская качка с определенными параметрами, при которых электропривод телескопа должен обеспечивать заданную точность слежения за объектом. Всего на корабль действует шесть видов качки: три вращательных (бортовая качка, килевая качка и рыскание по курсу) и три возвратно-поступательных (вертикальная, продольная и поперечная).

Влияние морской качки проявляется, в том числе, в дополнительных возмущающих моментах, действующих на оси ОПУ.

**Цель.** Получение зависимостей возмущающих воздействий от параметров морской качки. Определение ограничений возможностей телескопа в связи с появлением дополнительных возмущающих воздействий.

**Основной результат.** В результате исследования выявлены зависимости дополнительных возмущающих моментов от параметров морской качки и точки наблюдения за объектом. Получены соотношения, связывающие максимально реализуемые ускорения движения осей и величины дополнительных динамических возмущений.

**Вывод.** Полученные соотношения позволяют определить, насколько сократится диапазон допустимых координат объекта наблюдения от параметров морской качки, в связи с тем, что достижимые ускорения снижаются из-за снижения максимального динамического момента двигателя.

## **ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПОГРЕШНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**С.А. Шунаев**

(Московский энергетический институт (технический университет) филиал в г. Смоленске)

**Научный руководитель – д.т.н., профессор В.П. Кавченков**

(Московский энергетический институт (технический университет) филиал в г. Смоленске)

Одним из важных показателей, возникающих при нахождении математического описания процесса на основе статистических показателей действующего производства, является оценка возможной погрешности моделей, полученных на базе этой информации. Это связано с тем, что математический аппарат множественной регрессии построен в предположении, что все данные эксперимента соответствуют истинным значениям переменных. Однако в реальных условиях промышленного производства технологические показатели регистрируются с некоторой погрешностью, обусловленной ошибками измерительных приборов или неточностью анализов. Эта погрешность увеличивает неопределенность уравнения и в этом смысле эквивалентна действию добавочного внешнего шума и приводит к возрастанию остаточной дисперсии модели по сравнению с остаточной

дисперсией при точно измеренных данных. Достаточно высокий уровень погрешностей при регистрации статистических данных может существенно исказить действительное соотношение между величинами коэффициентов уравнения регрессии, что приведет к неверным выводам при энергетической интерпретации полученных результатов.

Предлагаемый метод оценки предполагает вычисление приращения выборочного коэффициента множественной корреляции между оцениваемыми величинами  $\Delta R^2$ , полное приращение дисперсии, вызванное погрешностью регистрации независимых переменных  $\Delta\sigma^2$ , а также отклонение коэффициентов регрессии –  $\Delta b_i$ . Метод позволяет решить следующие важные задачи:

1. выделить факторы, ошибки измерения которых составляют существенную часть приращения остаточной дисперсии, и определить требуемую точность их регистрации;
2. определить суммарное приращение остаточной дисперсии за счет погрешностей измерения независимых переменных;
3. произвести коррекцию регрессионных коэффициентов от искажающего влияния ошибок измерения.

Исходными данными для такого рода расчетов являются компоненты матриц наблюдений  $X$  и  $Y$ , содержащие статистические показатели измеренные с ошибками. Выборочную оценку дисперсии ошибки можно получить либо из паспортных характеристик измерительных приборов, либо экспериментальным путем.

Таким образом, точность математической модели можно повысить, если уменьшить погрешность регистрации переменных. Однако, опыт показывает, если общее приращение остаточной дисперсии за счет ошибок измерения невелико (<10%), то нет необходимости затрачивать усилия на повышение точности регистрации данных и лучше искать другие пути совершенствования полученной модели (включение новых переменных, поиск вида полинома, учет структуры связей и т.д.).