

На правах рукописи

Вейнмейстер Андрей Викторович

**КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ В
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ
ИДЕНТИФИКАТОРА СОСТОЯНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена на кафедре систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Поляхов Николай Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Шестаков Вячеслав Михайлович
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет,
кафедра «Автоматизации технологических
комплексов и процессов»

кандидат технических наук, доцент
Самохвалов Дмитрий Вадимович
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
кафедра «Робототехника и автоматизация
производственных систем»

Ведущая организация ОАО «Силовые машины», Завод «Электросила»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «___» марта 2013 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

М.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. До недавнего времени принципиальным недостатком асинхронных двигателей являлись трудности, связанные с регулированием частоты вращения. В последнее время, в связи с успехами электронной промышленности, в качестве преобразователей электрической энергии в механическую повсеместно применяются общепромышленные электроприводы, построенные на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, с полностью цифровым управлением. Преимущества таких электроприводов заключаются в относительно низкой стоимости, меньших габаритных размерах, простоте ввода в эксплуатацию и более высокой надежности.

Значительная часть управляемого электропривода на базе преобразователей частоты работает без обратной связи по скорости, поскольку используется для таких применений, как насосы и вентиляторы, для которых достаточен невысокий диапазон регулирования. Однако, существует большое количество применений, где необходим более высокий диапазон или точность поддержания заданной скорости. Как правило, в таких системах используются датчики координат механического движения (скорости, положения). В настоящее время из системы электропривода стремятся исключить подобные датчики, поскольку зачастую установка их затруднена и существенно снижает надежность системы. Разрабатываются различные алгоритмы, опирающиеся на частотное или векторное управление, вычисляющие неизмеряемые регулируемые переменные с помощью доступной информации о токах и напряжениях на выходе преобразователя частоты. Работы в данной области велись и продолжаются отечественными и зарубежными исследователями: Г.Г. Соколовский, С.Г. Герман-Галкин, В.М. Терехов, В.И. Ключев, С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин, В.В. Рудаков, А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, D. Schroeder, J. Holz, P. Vas, W. Leonhard, K. Matsue, H. Kubota, T. Lipo, B. Bosc. При этом одним из основных требований к современным общепромышленным электроприводам является обеспечение диапазона регулирования не менее 500:1 при допустимой статической ошибке не более 1%.

Целью диссертационной работы является исследование методов оценки скорости вращения АД по измерению только параметров питающего напряжения с целью определения возможных границ использования и способов повышения диапазона и качества оценки, а также исследования возможности разработки метода идентификации скорости, нечувствительного к вариациям параметров в пределах 50% и обеспечивающего диапазон регулирования замкнутой системы не менее 500:1.

В диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи исследования:

- анализ существующих моделей АД и путей их уточнения;
- анализ границ работоспособности и условий устойчивости алгоритма идентификации параметров;
- компьютерное моделирование адаптивного наблюдателя и анализ качества идентификации;
- экспериментальные исследования и реализация алгоритмов идентификации в реальной электромеханической системе;
- разработка программного комплекса, позволяющего проводить виртуальные и полунатурные исследования для определения параметров системы идентификации.

Методы и средства исследования. В качестве математического аппарата в работе использованы методы адаптивного управления и теории устойчивости. Компьютерное моделирование проводилось в системе Matlab/Simulink. При проведении эксперимента использовался преобразователь частоты Siemens/Micromaster440 и устройство связи с компьютером NI USB-6009.

Достоверность результатов работы, научных положений и выводов подтверждается корректным применением методов теории автоматического управления, теории устойчивости систем и методов математического анализа а также расчётами и моделированием в пакете Matlab.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

1. Модель электромагнитных процессов в АД с учётом тепловых изменений параметров;
2. Синтез методом функций Ляпунова адаптивного наблюдателя, идентифицирующего скорость вращения и активные сопротивления обмоток АД;
3. Анализ устойчивости (гурвицевости) параметризованной матрицы наблюдателя;
4. Программный комплекс для исследования системы асинхронного электропривода.

Научная новизна.

1. Модель электромагнитных процессов в АД с учётом тепловых изменений параметров, позволяющая учитывать влияние нагрузки на тепловое состояние машины и, как следствие, на активные сопротивления ротора и статора;
2. Синтез методом функций Ляпунова адаптивного наблюдателя, идентифицирующего скорость вращения и активные сопротивления обмоток АД, гарантирующим асимптотическую устойчивость при ограниченных возмущениях;
3. Анализ устойчивости (гурвицевости) параметризованной матрицы наблюдателя показал негладкое изменение собственных значений в функции

параметра (скорости вращения) и гарантированное наличие областей собственных значений с отрицательной вещественной частью;

4. Программный комплекс для исследования системы асинхронного электропривода, позволяющий определять значения параметров наблюдателя скорости и сопротивления ротора.

Практическая значимость работы. Проведённый анализ устойчивости наблюдателя в совокупности с использованием предложенного программного комплекса позволяет повысить эффективность разработок в области программного обеспечения бездатчиковых систем управления асинхронным электродвигателем с широким диапазоном регулирования.

Реализация результатов работы. Результаты работы нашли применение в учебном процессе на кафедре систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета в рамках курсов «Электроприводная техника» и «Элементы и устройства систем автоматики», в Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в НИР ИДН/САУ-98, по гос. контракту № 16.740.11.0560 от 23 мая 2011г.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на VI Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2010 (Санкт-Петербург, 2010), на 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Судометрика 2010» (Санкт-Петербург, 2010), на ежегодных научных конференциях и семинарах СПбГЭТУ 2008-2013г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, из них 7 статей в рецензируемых изданиях, входящих в действующий перечень ВАК и 2 работы в материалах научно-технических конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 81 источник. Основная часть изложена на 107 страницах машинописного текста и содержит 65 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определены цели и поставлены задачи исследования, описаны методы их решения, сформулированы научные результаты, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор существующих математических описаний системы асинхронного электропривода. В качестве используемой модели АД выбрана 2-х фазная модель в неподвижной системе координат. Для управления двигателем используется система векторного управления с ориентацией по вектору потокосцепления ротора, регуляторы которой

реализованы во вращающейся системе координат. В качестве силовой части применён инвертор напряжения. Предварительные исследования показали, что наличие составляющих ШИМ-сигнала в питающем напряжении не вносит существенного влияния в работоспособность модели АД и системы управления, поэтому модель инвертора напряжения выполнена в виде линейных коэффициентов усиления. Предполагается, что основные параметры двигателя (такие как сопротивления и индуктивности статора и ротора) известны, или могут быть определены перед запуском двигателя известными методами. Однако, в процессе работы, в результате нагрева и изменения режимов, значения параметров могут отклоняться от начальных. Диапазон отклонения сопротивлений в результате нагрева может достигать 50% от значения при холодной машине. Отклонения значений индуктивностей в результате режимов работы могут достигать 10% от номинальных. Анализ чувствительности модели АД к параметрической неточности показал зависимость, приведённую на рис.1. Видно, что под нагрузкой (со 2-й секунды) отклонения скорости от номинального значения могут достигать 40%. Причём влияние нагрева двигателя, или, что тоже самое, использование в модели некорректного сопротивления двигателя, значительно проявляется с увеличением нагрузки.

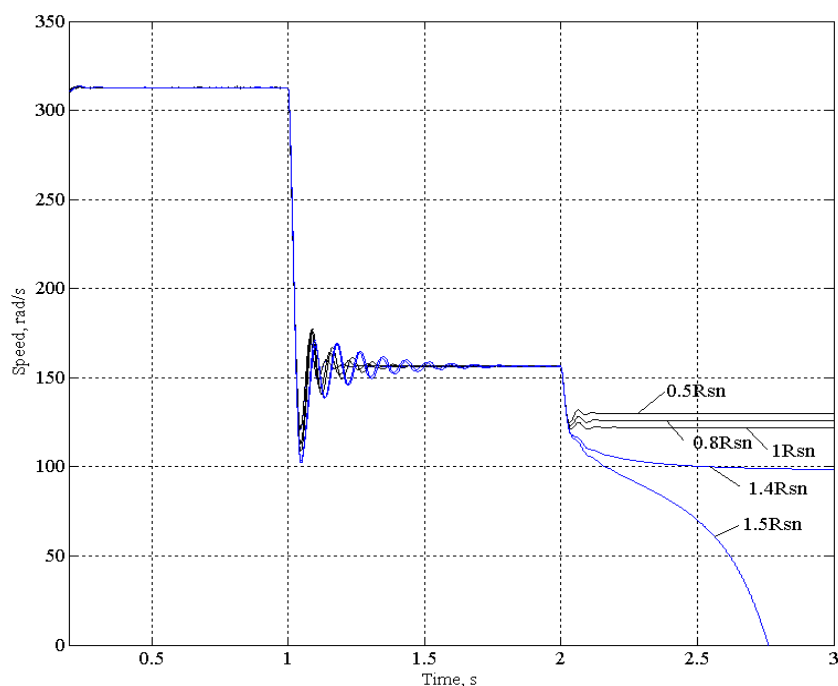


Рис.1. Скорость вращения при различных отклонениях сопротивления статора.

Проведённый по критерию заявленного диапазона регулирования анализ существующих на рынке систем управления АД показал, что для систем без датчика скорости у большинства стандартных приводов максимальный заявленный диапазон составляет 100:1 (существуют системы с диапазоном 200:1 – Yaskawa). Для систем с датчиком диапазон достигает 10000:1

(преобразователь ЭПВ разработки ЭЛПРИ). В связи с вышеизложенным, поставлена задача разработки метода идентификации скорости, нечувствительного к вариациям параметров в пределах 50% и обеспечивающего диапазон регулирования замкнутой системы не менее 500:1 при обеспечении статической точности 1%.

Вторая глава посвящена существующим методам идентификации скорости и анализу их чувствительности к параметрической неопределённости объекта управления. Выполнена классификация методов, приведённая на рис.2. Для реализации векторного управления, помимо идентификации скорости, необходимо определение вектора потока (в рассматриваемом случае – потока ротора). Поэтому методы должны оцениваться не только по качеству оценки скорости, но и потока.

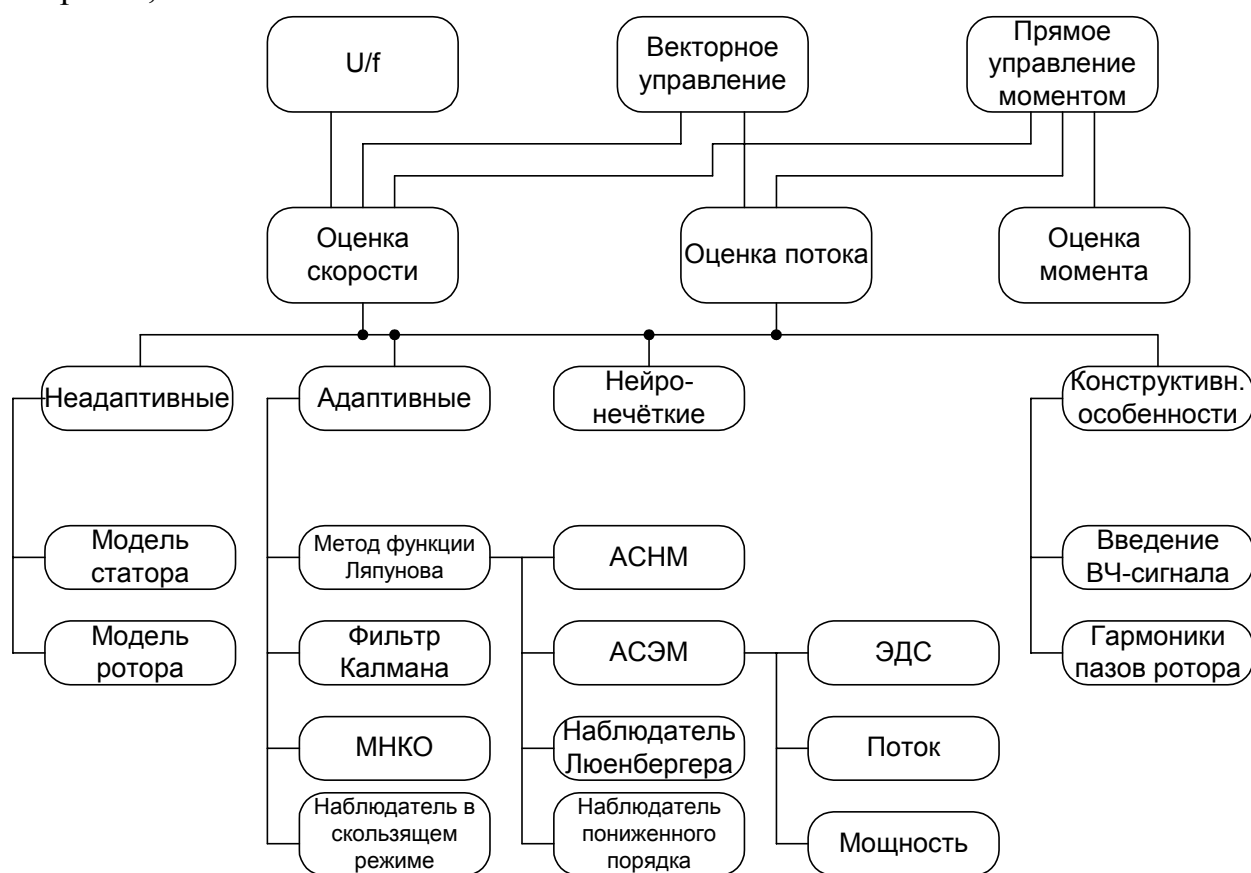


Рис.2. Классификация методов оценки переменных в системе электропривода. (МНКО – метод наименьшего квадратичного отклонения; АСНМ – адаптивные системы с настраиваемой моделью; АСЭМ – адаптивные системы с эталонной моделью)

Было проведено моделирование некоторых аналитических методов из группы неадаптивных и адаптивных. Неадаптивные методы обладают высокой чувствительностью к вариациям параметров АД – при отклонении сопротивления ротора на 1% от номинала отклонение в оценке потоков составляет до 10%, а в оценке скорости до 20%. При этом, диапазон регулирования может достигать 5:1. Как следствие, такие методы могут

использоваться только в системах с низкими требованиями к качеству регулирования.

Адаптивные методы обладают меньшей чувствительностью к отклонению параметров, однако их работоспособность зависит от выбора параметров, что может привести к необходимости дополнительного моделирования.

Методы, основанные на конструктивных свойствах машины и на воздействии на неё внешними сигналами, обладают запаздыванием до нескольких секунд и могут терять работоспособность при некоторых частотах ШИМ. В связи с этим они не могут быть использованы для решения поставленной задачи.

Исходя из проведённого сравнительного анализа наиболее работоспособным и имеющим возможности к дальнейшему совершенствованию признан идентификатор на основе адаптивного наблюдателя полного порядка с вычислением скорости на основе метода функций Ляпунова.

В третьей главе представлены основные положения метода функций Ляпунова для применения его в задачах идентификации переменных состояния систем электропривода. Выполнено построение адаптивного наблюдателя и проведён анализ устойчивости. Построение наблюдателя произведено в два этапа – на первом строится наблюдатель потока статора, на втором – скорости вращения.

Наблюдатель потока статора имеет вид $\frac{d\hat{x}}{dt} = \hat{\mathbf{A}}\hat{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{G}(\hat{I}_s - I_s)$, где

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(k) & g_2(k, \hat{\omega}) & g_3(k) & g_4(k, \hat{\omega}) \\ -g_2(k, \hat{\omega}) & g_1(k) & -g_4(k, \hat{\omega}) & g_3(k) \end{bmatrix}^T - \text{матрица обратных связей,}$$

коэффициенты которой получены на основе собственных значений матрицы \mathbf{A} и зависят от оценки скорости и коэффициента настройки. Элементы матрицы имеют вид:

$$g_1 = (k - 1)(a_{r11} + a_{r22}),$$

$$g_2 = (k - 1)a_{i22},$$

$$g_3 = (k^2 - 1)(ca_{r11} + a_{r21}) - c(k - 1)(a_{r11} + a_{r22}),$$

$$g_4 = -c(k - 1)a_{i22},$$

где $a_{(\cdot)}$ - коэффициенты, зависящие от параметров АД, а k - коэффициент настройки.

Для построенного наблюдателя проведен анализ интервальной устойчивости в зависимости от настроечного коэффициента k матрицы

обратных связей G на рабочем диапазоне скоростей. Зависимости вещественных частей собственных значений матрицы от коэффициента для различных скоростей представлены на рис.3. Из графиков видно, что наблюдатель устойчив лишь при значениях $k < 1$. Кроме того, зависимость вещественных частей от настроечного коэффициента имеет негладкий характер, что, однако, не влияет на устойчивость наблюдателя.

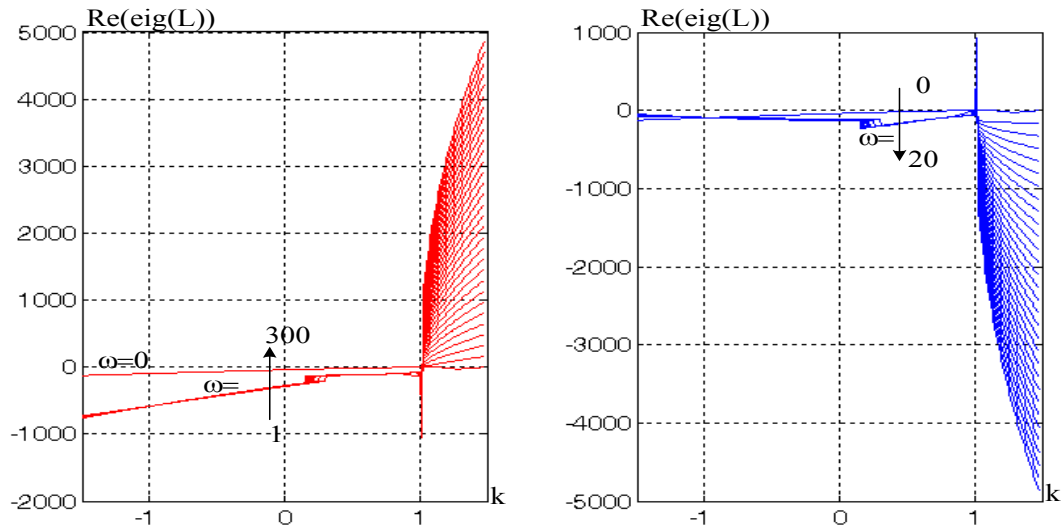


Рис.3. Распределение вещественных частей собственных значений наблюдателя потока в зависимости от скорости и коэффициента настройки.

При анализе собственных значений на низких частотах ($\omega \in (0; 20)$), получена картина распределения вещественных частей собственных значений, представленная на рис. 4.

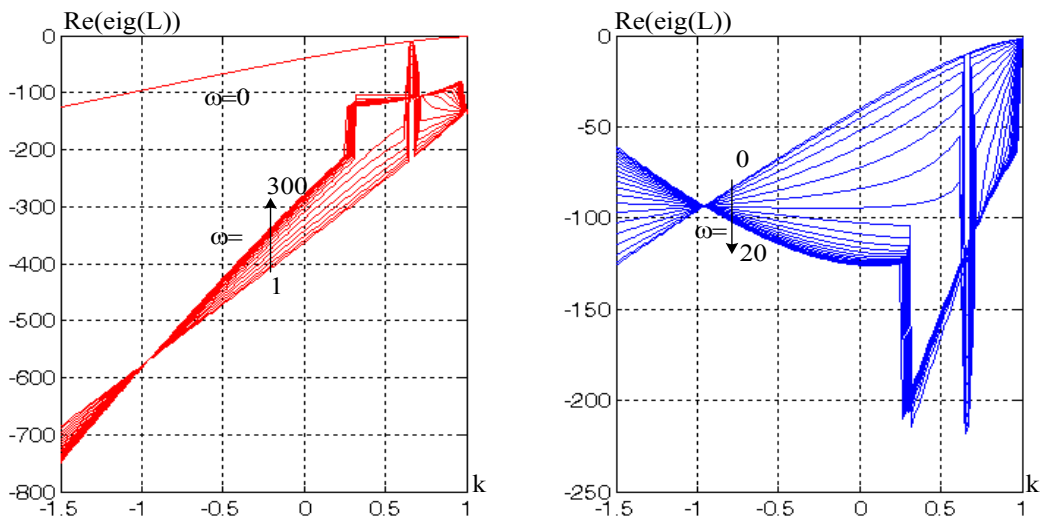


Рис.4. Распределение вещественных частей с.з. на частотах от 0 до 20 рад/с

Исследование распределения собственных значений показали, что для гарантированной устойчивости наблюдателя на всём диапазоне рабочих частот и отклонений активных сопротивлений значения коэффициента настройки должны принадлежать интервалу $k \in (-1.95; 1)$.

Далее, с применением функции Ляпунова вида $V = e^T e + \frac{(\hat{\omega}_r - \omega_r)^2}{\lambda}$

синтезирован наблюдатель скорости вращения АД по алгоритму:

$$\hat{\omega} = Kp(e_{isd}\hat{\phi}_{rq} - e_{isq}\hat{\phi}_{rd}) + Ki \int (e_{isd}\hat{\phi}_{rq} - e_{isq}\hat{\phi}_{rd}) dt,$$

где $e_{isd} = i_{sd} - \hat{i}_{sd}$, $e_{isq} = i_{sq} - \hat{i}_{sq}$, а Kp, Ki - произвольно выбираемые положительные константы.

Структура системы с наблюдателем скорости показана на рис. 5.

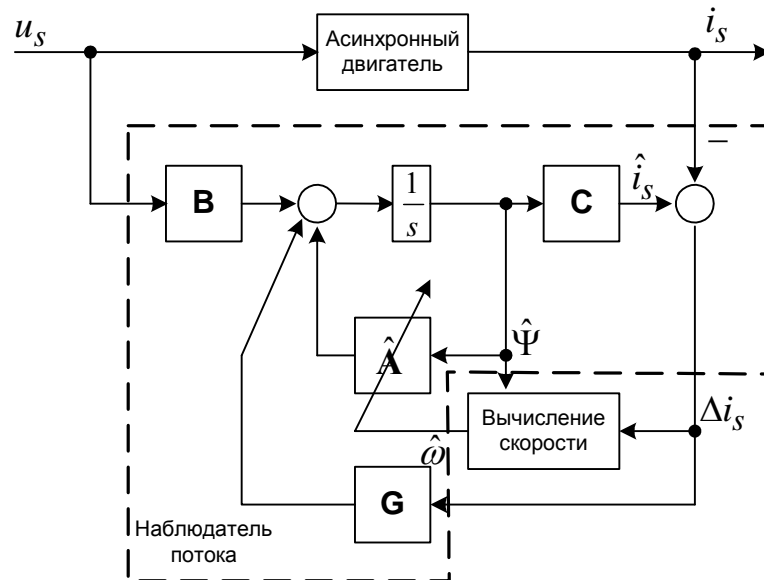


Рис.5.

Выходами наблюдателя потока являются векторы тока и потока. Блок «Вычисление скорости» реализует приведённое выше выражение для получения сигнала оценки скорости $\hat{\omega}$, который используется для настройки матрицы объекта \hat{A} . С уменьшением рассогласования измеренного и оцененного токов происходит сближение характеристик наблюдателя и объекта.

Четвёртая глава посвящена исследованию качества функционирования разработанного наблюдателя в составе разомкнутой и замкнутой системы векторного управления АД. При использовании метода оценки скорости в качестве отдельного измерителя (в разомкнутой системе) получен диапазон измерения скорости вращения порядка 1:50.

Дальнейшее моделирование показало значительное улучшение качества процессов при замыкании системы по оценке скорости. При отсутствии параметрических возмущений получен диапазон регулирования 1:1000. На рис.6 показаны графики оценки скорости и ошибки относительно реальной скорости на различных скоростях (1; 0,75; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 Гц) при номинальной нагрузке.

Определён диапазон возможных отклонений параметров АД. Проведён анализ диапазона регулирования системы в условиях рассогласования параметров объекта и модели. На рис.7. показана зависимость ошибки оценки от рассогласования сопротивления статора для различных скоростей. Несмотря на то, что полученный наблюдатель обладает адаптивными свойствами, полностью исключить влияние отклонения параметров объекта от заложенных в модели не удалось. При отклонении сопротивления статора на 20% статическая ошибка скорости может составлять до 5%.

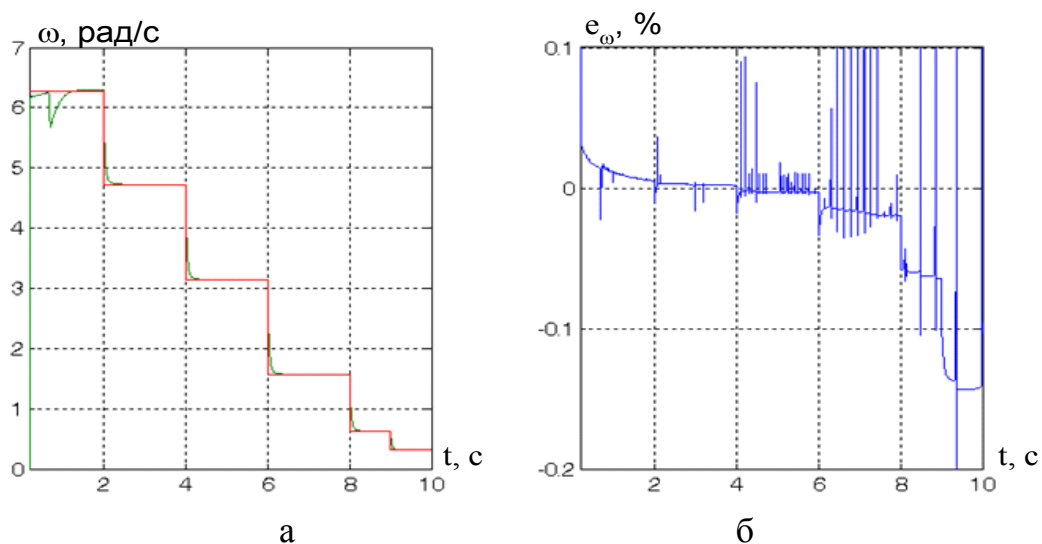


Рис. 6. а – Скорость (заданная, реальная и оценка), б – Ошибка оценки скорости

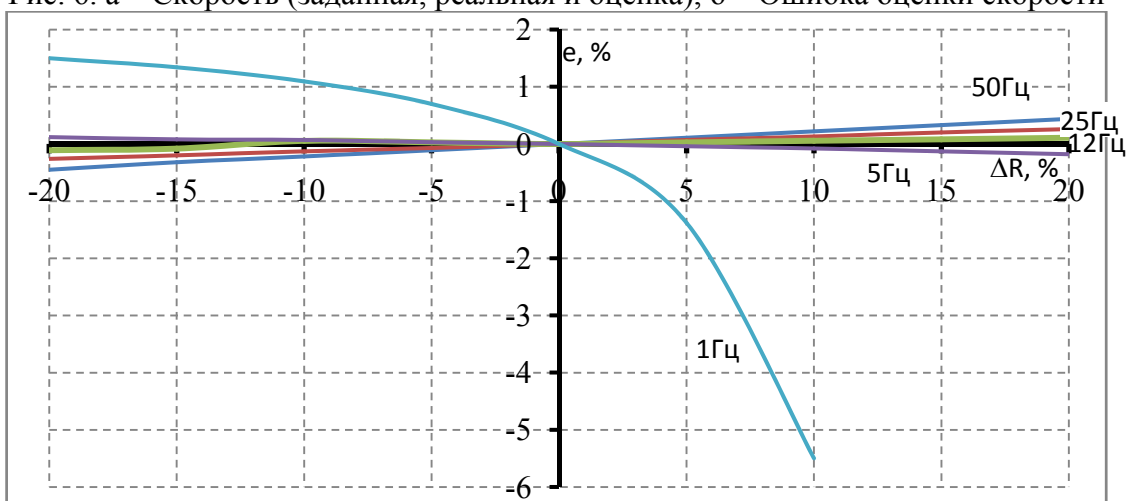


Рис.7. Зависимость ошибки оценки скорости от рассогласования сопротивлений статора на частотах 50, 25, 12,5, 1 Гц

При частоте ниже 2Гц ошибка превышает 1%, а при частотах ниже 1Гц система становится неустойчивой при рассогласовании сопротивлений более 10%.

В связи с этим исследованы дополнительные возможности улучшения качества функционирования алгоритмов путём введения компенсации отклонения параметров объекта. В качестве примера рассмотрен метод коррекции значения сопротивления ротора. Структурная схема полученной системы показана на рис.8. На рис. 9 показан процесс оценки сопротивления при начальном рассогласовании и дальнейшем его плавном увеличении.

С применением блока коррекции сопротивления качество оценки значительно улучшилось. График ошибки скорости при частоте 0,05Гц показан на рис.10.

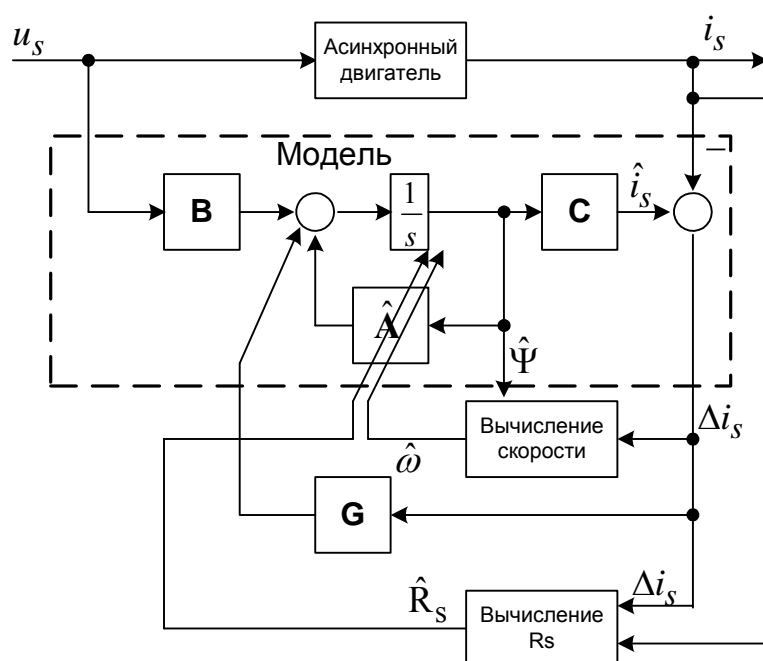


Рис.8. Функциональная схема наблюдателя с корректором сопротивления.

Здесь система, показанная на рис.5., дополнена блоком коррекции сопротивления, синтезированным на базе метода функций Ляпунова. Корректирующий сигнал формируется в одном темпе с оценкой скорости вращения и настраивает параметры (сопротивления) матрицы системы \hat{A} .

Проведены исследования динамических свойств полученной системы в режиме гармонического задания скорости с целью определения полосы пропускания. При амплитуде задания 0,5 от номинальной скорости вращения получена ширина полосы пропускания 3 Гц. При амплитуде задания частоты вращения 0,01 от номинальной скорости вращения полоса пропускания увеличивается до 10Гц, а при минимально возможной скорости 0.001 от номинальной скорости вращения – до 14Гц. Следует отметить, что во всех потенциально возможных рабочих режимах (за полосой пропускания) фазовое

запаздывание оценки скорости от реального значения не превышало 20 градусов, а в амплитуде появлялась статическая ошибка, не превышавшая 5%.

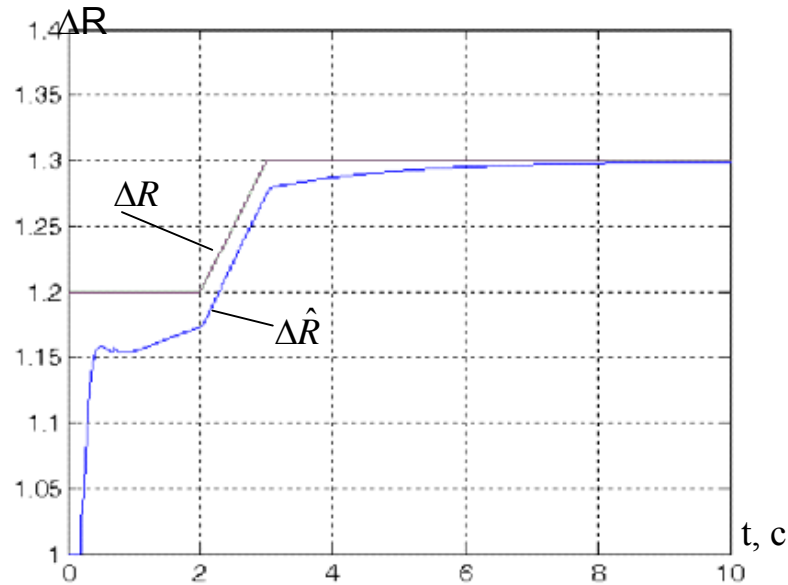


Рис.9. Отклонение сопротивления (ΔR) и его оценка ($\Delta \hat{R}$).

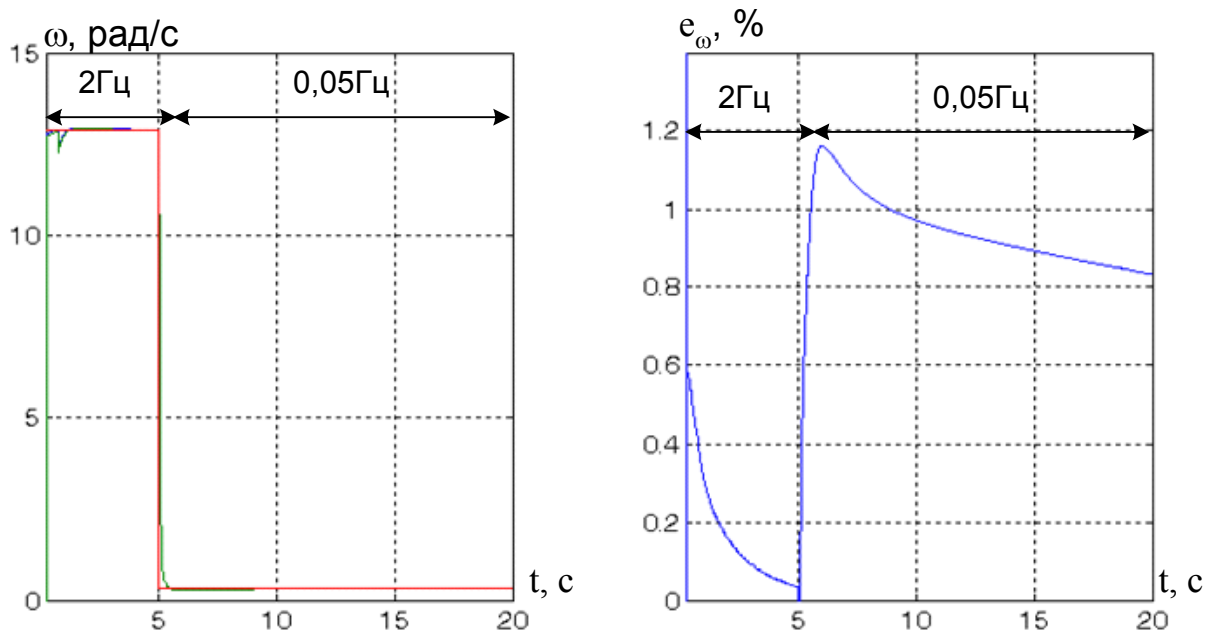


Рис.10. Скорость и ошибка скорости на частоте 2Гц и 0,05 Гц.

Разработан программный комплекс в среде Matlab для проведения исследований систем управления АД. Комплекс предоставляет удобный интерфейс пользователя, облегчающий задачи настройки компонентов системы. В рамках комплекса возможно задавать параметры АД и его модели, осуществлять настройку регуляторов и наблюдателя, исследовать влияние

применяемых коррекций, изменять режимы управления. На рис. 11 показано одно из окон пользовательского интерфейса.

Четыре вкладки предоставляют доступ к различным настройкам параметров компонентов системы, одна вкладка предназначена для настройки режимов вывода и сравнения графиков процессов по необходимым переменным состояния АД или других элементов системы. Предусмотрено четыре плоскости для вывода графиков с возможностью наложения процессов различных итераций моделирования.

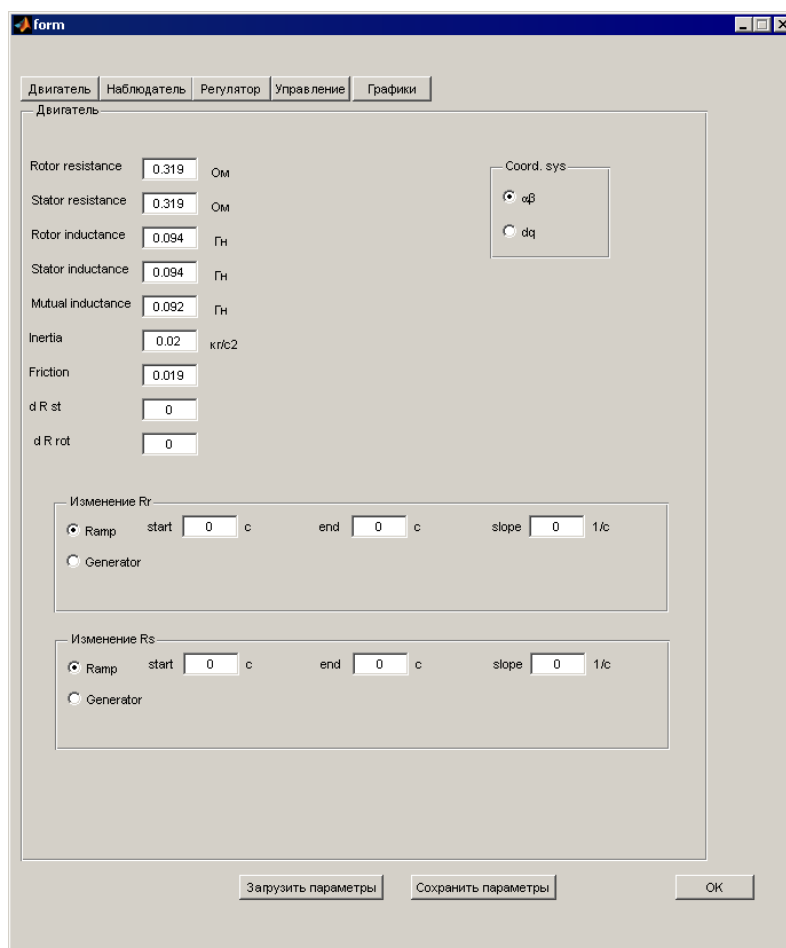


Рис. 11. Пользовательский интерфейс программного комплекса.

Проведён полунатурный эксперимент для оценки работоспособности метода при использовании реальных сигналов с датчиков тока и напряжения. Структурная схема эксперимента показана на рис. 12. Применялся стандартный преобразователь частоты Micromaster 440 (MM440). Для измерения использовались датчики тока на элементах Холла и трансформаторы напряжения. Сигналы через устройство сбора данных (NI USB-6009) заводились в персональный компьютер (ПК) и обрабатывались в Matlab. Результат вычислений сравнивался с получаемым с аналогового выхода ПЧ сигналом реальной скорости. Полученные графики измеренной и оцененной скорости показаны на рис. 13.

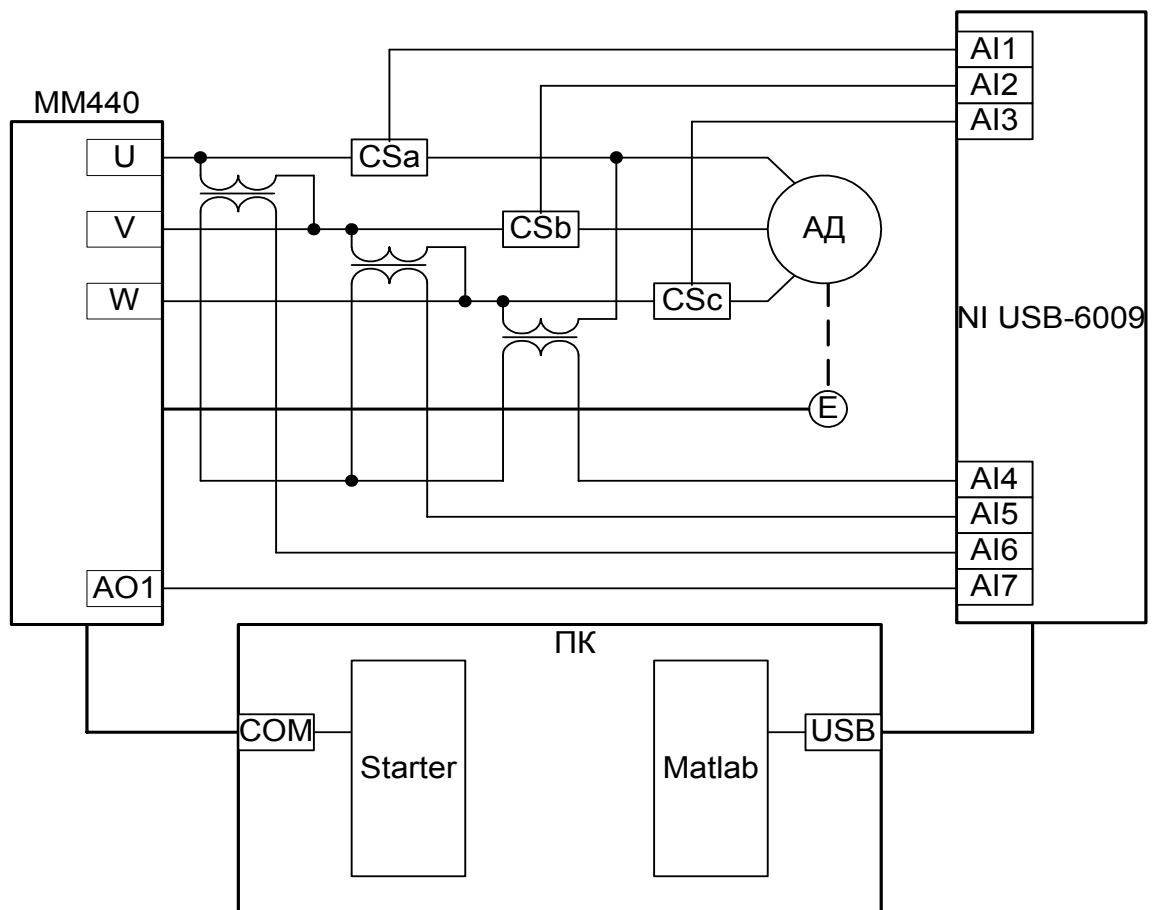


Рис.12. Структурная схема экспериментальной установки.

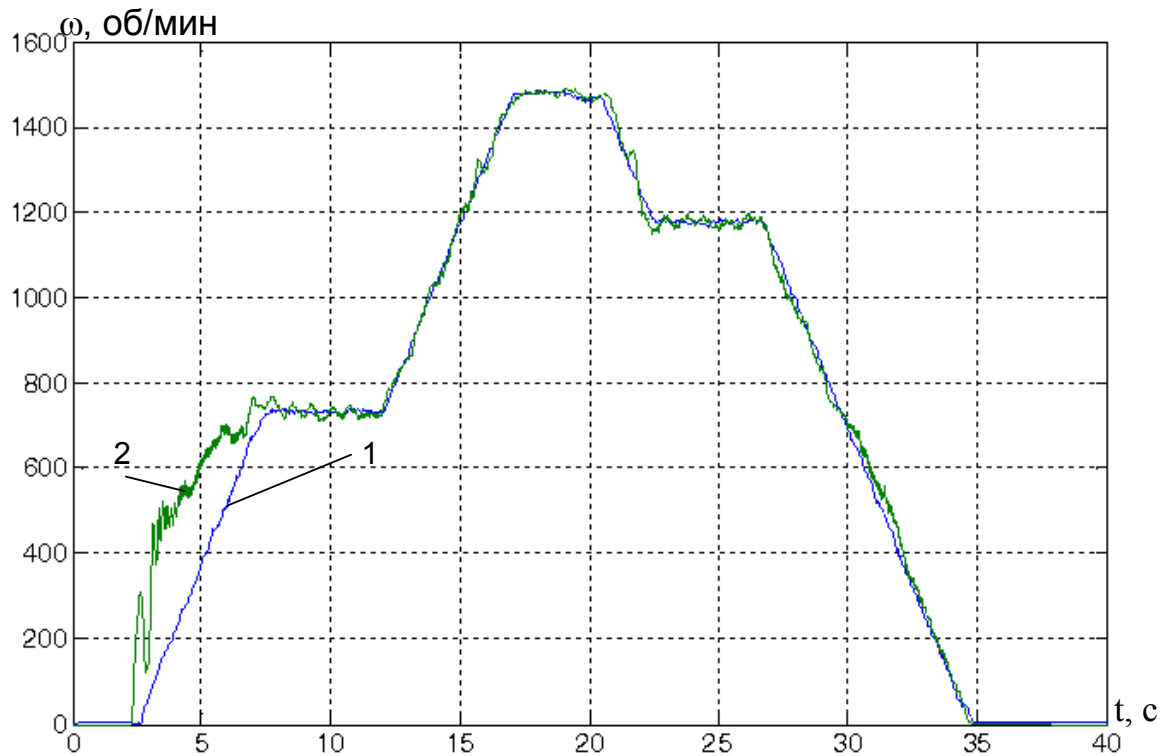


Рис.13. Скорость с датчика (1) и её оценка (2).

Несмотря на использование аппаратных и программных фильтров для снимаемых с датчиков сигналов, кривые токов и напряжений на входе блоков идентификации имеют значительную составляющую шумов. В результате этого оценка скорости также зашумлена. Кроме того, наблюдается проблема оценки скорости в пусковом режиме. В остальном, результаты практически совпали с результатами моделирования системы с разомкнутым контуром управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными в диссертации целью и задачами проведены теоретические, вычислительные и экспериментальные исследования.

Проведён системный анализ методов и структур, используемых в системах бездатчикового электропривода, позволивший выявить наиболее пригодные для управления объектами с ограниченной параметрической неопределённостью.

Рассмотрены теоретические вопросы построения адаптивных наблюдателей состояния для системы электропривода с нестационарными параметрами на основе метода функций Ляпунова.

Построена компьютерная модель системы векторного управления АД, включающая в себя модель АД, учитывающую зависимость активных сопротивлений обмоток в функции режима работы, а также адаптивный наблюдатель скорости вращения и активного сопротивления.

Исследованы вопросы устойчивости наблюдателя в зависимости от настройки системы идентификации и нестационарности параметров объекта, что позволило установить границы его применимости для систем асинхронного электропривода среднего уровня с диапазоном регулирования до 500:1.

Разработан программный комплекс в среде Matlab для исследования адаптивных наблюдателей в системе электропривода, позволяющий упростить процедуру моделирования такого типа систем.

Проведены экспериментальные исследования работы наблюдателя, показавшие корректность результатов математического моделирования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Вейнмейстер А.В. Адаптивно-нечёткие регуляторы систем управления техническими объектами / А.В. Вейнмейстер, Н.Д. Поляхов, И. А. Приходько, Д. М. Филатов, О. Э. Якупов. // Известия.СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - №4.-2012. - С. 59-66

2. С.В. Михалёв, А.В. Вейнмейстер Пути совершенствования тепловых моделей электрических машин // Известия.СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - №8.-2011. - С. 56-62
3. В. Н. Мещеряков, А. М. Башлыков, А.В. Вейнмейстер Реализация успешного запуска и стабильной работы синхронизированного электропривода с применением адаптивных регуляторов //Современные проблемы науки и образования - №6. – 2012.
4. С.А. Анисимов, А.М. Боронахин, А.В. Вейнмейстер, П.А. Иванов Концепция построения испытательного оборудования для калибровки систем навигации и ориентации // Известия.СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - №8.-2011. С.76–82.
5. Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, А.А. Карачёв, А.В. Вейнмейстер, А.В. Беспалов Интеллектуальное управление в технических системах // Мехатроника, автоматизация, управление - №10.-2007. - С.11-16.
6. А.В. Вейнмейстер, Доан Ань Тоан, В.А. Дубровин Экспериментальное исследование и анализ зависимости волновых параметров асинхронных двигателей от частоты // Известия.СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия "Электротехника"- №1.-2006.- С.20-25.
7. А.В. Вейнмейстер, В.Е. Кузнецов, Н.Д. Поляхов Наблюдатели состояния для оценки частоты вращения асинхронного электродвигателя Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия "Электротехника"- №1.-2005. – С.36-41

В других изданиях

8. Н.Д. Поляхов, В.Е. Кузнецов, О.Э. Якупов, А.В. Вейнмейстер и др. Улучшение характеристик линейного электродвигателя средствами адаптивного управления VI Международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2010, Санкт-Петербург, 2010
9. Ю.В. Филатов, А.М. Боронахин А.В. Вейнмейстер Стенд для испытания инерциальных навигационных систем 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Судометрика 2010», Санкт-Петербург, 2010