

На правах рукописи



КУЛЬМУХАМЕТОВА Александра Сериковна

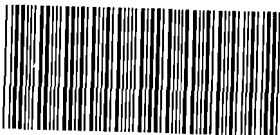
**ЭЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНОГО
ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ АППАРАТА ИСКУССТВЕННОЙ
ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЁГКИХ**

Специальность:

05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



005545651

Челябинск – 2013

- 6 МАР 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Южно-Уральском государственном университете на кафедре электромеханики и электромеханических систем

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Воронин Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мугалимов Риф Гарифович
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический университет
им. Г.И. Носова»,
профессор кафедры электротехники и
электротехнических систем

кандидат технических наук, доцент
Хакимьянов Марат Ильгизович
ФГБОУ ВПО "Уфимский государственный
нефтяной технический университет",
доцент кафедры электротехники и
электрооборудования предприятий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Ивановский
государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

Защита диссертации состоится «25» апреля 2014 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу:
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Автореферат разослан «20» февраля 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



А.В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется необходимостью организации производства и оснащения медицинских учреждений страны отечественной высокоэффективной медицинской техникой, в частности, аппаратурой искусственной вентиляции лёгких (АИВЛ).

Аппараты искусственной вентиляции лёгких используются, чаще всего, в критических ситуациях, связанных с угрозой жизни пациента. Поэтому эффективность и надёжность их действия напрямую влияют на решение вопроса сохранения его жизни. Более 80% потребностей отечественной медицины в АИВЛ покрывается за счет покупки аппаратов иностранного производства. В России на текущий момент производством АИВЛ занимается целый ряд предприятий например ОАО «Уральский приборостроительный завод», г. Екатеринбург, фирма «Тритон-Электроникс», г. Екатеринбург, ООО «ФакторМед-Техника», г. Москва, НПК «Оптим», г. Санкт-Петербург. Однако, в своих разработках эти предприятия используют электроприводы преимущественно зарубежного производства, которые, наряду с очевидными достоинствами, имеют и определенные недостатки, такие как, например, ремённые передачи, наличие которых значительно снижает ресурс и надёжность электропривода. Учитывая солидные затраты зарубежных производителей на рекламу (маркетинг), отечественным предприятиям, при использовании тех же самых (импортных) электроприводов, пока удастся охватить не более 15–20% отечественного рынка. При этом, современное состояние науки и техники в России позволяет разрабатывать и изготавливать электроприводы АИВЛ, которые не уступают зарубежным аналогам по основным характеристикам, а по некоторым и превосходят их, обеспечивая конкурентное преимущество как на отечественном, так и на зарубежном рынках.

В последнее время в электроприводах АИВЛ нашли применение вентильные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов, имеющие высокие удельные показатели и отличную управляемость. При этом в поршневых компрессорах чаще всего использовались приводы с высокоскоростными двигателями и понижающими скорость вращения механизмами. Это существенно сокращало ресурс работы привода, понижало его надёжность и повышало стоимость. Кафедра ЭМЭС ЮУрГУ одна из первых предложила использовать безредукторный привод. С одной стороны это позволило существенно уменьшить скорость вращения двигателя и исключить узел понижения скорости, соответственно повысив ресурс его работы и уменьшив стоимость. С другой стороны поставило ряд вопросов, возникающих при создании безредукторного привода. К ним следует отнести обеспечение равномерности вращения, сокращение числа информационных датчиков, диагностики состояния, снижение энергопотребления и др.

Исследованиям низкооборотных приводов с ВД, в том числе и для медицинской техники, занимались С.А. Петрицев, А.Ф. Шевченко, Д.В. Коробатов, В.А. Лифанов, С.Г. Воронин, Г. Б. Вьяльцев и целый ряда других авторов. Однако в работах указанных авторов практически не рассмотрены вопросы вектор-

ного управления ВД, слабо освещены вопросы обеспечения заданных динамических свойств, равномерности вращения двигателя, минимизации электрических потерь, диагностики его состояния. Между тем, при создании электропривода АИВЛ эти вопросы выступают на первый план. Например, равномерность вращения двигателя напрямую влияет на равномерность воздушного потока, поступающего в лёгкие и строго регламентируется. Без их решения, как показала практика, невозможно создание удовлетворяющего специфическим требованиям, конкурентноспособного электропривода АИВЛ.

На основании изложенного **целью работы** является развитие теории безредукторных электроприводов с вентильными двигателями для аппаратов искусственной вентиляции лёгких

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Анализ и систематизация требований, предъявляемых к электроприводам АИВЛ, обоснование выбранного типа и разработка электропривода, максимально удовлетворяющего предъявляемым требованиям на основе исследований способов коммутации и описания динамических процессов.

2. Определение алгоритмов коммутации вентильного двигателя, обеспечивающих максимальное значение электромагнитного к.п.д. двигателя

3. Разработка алгоритмов управления электроприводом аппарата искусственной вентиляции лёгких на основе исследований динамических режимов в управляемом синхронном режиме и методов демпфирования колебаний ротора.

4. Разработка методов непрерывной диагностики состояния электропривода в процессе его эксплуатации, обеспечивающих получение информации, необходимой для прогнозирования отказов.

5. Уточнение математических моделей динамических процессов электропривода в составе АИВЛ.

6. Внедрение разработанных электроприводов для аппаратов искусственной вентиляции лёгких.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и эмпирические методы исследования, базирующихся на фундаментальных положениях теории электромеханического преобразования энергии, теории автоматического управления, а также методы математического моделирования с использованием стандартных компьютерных программ.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается следующим:

- при математическом описании и моделировании электромеханических преобразователей использованы общепринятые в электромеханике и теоретической электротехнике, проверенные практическими разработками допущения;

- адекватность используемых математических моделей, результаты моделирования и теоретических исследований подтверждены экспериментальными данными, полученными автором;

– основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях различного уровня и опубликованы в печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК.

Научное значение работы:

– теоретически обоснованы условия, в виде соотношения электромагнитной и электромеханической постоянных, при которых динамическая модель ВД с возбуждением от постоянных магнитов с достаточной степенью точности соответствует динамической модели классического коллекторного двигателя постоянного тока;

– установлено, что при определённом соотношении параметров электродвигателя дискретная 120–градусная коммутация по энергетическим показателям не проигрывает векторному управлению и с этой точки зрения может оказаться даже более предпочтительной;

– установлено, что при векторном управлении за счет регулирования угла коммутации ВД при изменении скорости вращения появляется возможность не только решать вопросы минимизации энергопотребления двигателя, но и существенно изменять его механические характеристики;

– разработан упрощенный алгоритм векторного управления ВД в управляемом синхронном режиме, обеспечивающий высокую равномерность вращения двигателя при стабильной нагрузке на валу;

– предложен новый метод оценки электромагнитного момента двигателя по измеряемым электрическим координатам, которая одновременно осуществляет диагностику механической части ИВЛ и управление электроприводом.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

– аналитические соотношения электромагнитной и электромеханической постоянных, при которых динамические процессы в ВД могут рассматриваться в виде линейных дифференциальных уравнений, либо в виде нелинейной модели с перекрестными связями;

– упрощенный алгоритм векторного управления ВД в управляемом синхронном режиме;

– метод оценки электромагнитного момента двигателя по измеряемым электрическим координатам;

Научная новизна работы заключается в следующем:

– впервые определены условия, ограничивающие область существования упрощенной и полной моделей ВД;

– теоретически показана возможность оптимизации энергетических показателей двигателя и качественного изменения вида его механической характеристики путем регулирования угла коммутации в функции от скорости вращения ротора;

– разработан метод определения электромагнитного момента по измеряемым электрическим координатам, позволяющий одновременно решать вопросы диагностики состояния двигателя и управления им в рабочем режиме

– дано теоретическое обоснование и разработана практическая схема реализации управляемого синхронного режима ВД, отличающегося значительным

сокращенном требуемого вычислительного ресурса при реализации векторного управления по сравнению с другими известными методами.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– обосновано, что в большинстве случаев для АИВЛ компрессорного типа предпочтительно применение электропривода, построенного на основе вентильных электродвигателей (ВД) с векторным управлением;

– определены соотношения параметров электродвигателя, при которых дискретная 120–градусная коммутация по энергетическим показателям не проигрывает векторному управлению;

– разработан упрощенный, с точки зрения объема используемого вычислительного ресурса, алгоритм векторного управления ВД обеспечивающий высокую равномерность вращения двигателя при стабильной нагрузке на валу;

– внедрены в производство разработанные электроприводы, по техническим характеристикам и эксплуатационным свойствам не уступающие лучшим современным отечественным и зарубежным образцам

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

– на XXXXI Всероссийском симпозиуме по механике и процессам управления «Механика и процессы управления» (г. Миасс, 2011 г.);

– на IV международной научно-практической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (ТГУ, Тольятти, 2012 г.);

– на международной научно-практической конференции «Измерения: состояние, перспективы развития» (ЮУрГУ, Челябинск, 2012 г.);

– на международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (ИГЭУ, Иваново, 2013 г.);

– на II научной конференции аспирантов и докторантов (ЮУрГУ, Челябинск, 2010 г.);

– на научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (2008–2013 гг.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, из них 4 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 113 страниц, заключения, списка литературы из 112 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации 145 страниц, включая 37 рисунков и 3 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели, методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния и перспектив развития АИВЛ на ближайшее время.

Приводится классификация аппаратов ИВЛ и медико-технические требования к ним. Обобщаются принципы построения аппаратов ИВЛ, представлена структурная схема современных АИВЛ. Показаны существующие типы приводов, используемые в аппаратах искусственной вентиляции легких. Отмечено, что электропривод является наиболее универсальным исполнительным элементом аппарата ИВЛ, обладающим преимуществом по сравнению с другими типами приводов. С помощью него относительно просто могут быть решены вопросы повышения ресурса, снижения электропотребления и расширения функциональных возможностей аппарата ИВЛ.

Определены вопросы, которые необходимо решить для эффективного использования электропривода в составе ИВЛ, а именно:

- систематизация требований к электроприводу в соответствии с назначением аппаратов и их конструкцией;
- сравнительная оценка и обоснованный выбор наиболее рационального типа исполнительного электродвигателя привода и его конструкции;
- разработка методов и практических схем диагностики состояния в рабочем режиме;
- математическое описание и модели электропривода в составе аппарата ИВЛ;
- решение вопросов обеспечения заданного быстродействия электропривода;
- поиск алгоритмов управления, обеспечивающих заданное качество переходных процессов и минимизацию энергопотребления привода в динамических режимах.

Во второй главе определены требования к электроприводу по глубине регулирования, по равномерности частоты вращения, по надежности, по требуемой частоте вращения, к динамическим режимам, к способу питания, энергопотреблению и к сигналам управления.

Проведен сравнительный анализ применяемых электроприводов, сделан вывод о преимуществах применения вентильного двигателя (ВД) с возбуждением от постоянных магнитов, которые в зарубежной литературе рассматриваются как синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) управляемый от инвертора напряжения (PMSM – permanent magnet synchronous motor).

На основании общих принципов построения вентильных приводов предложена функциональная схема электропривода. Исследованы и определены условия, при которых динамические процессы в ВД могут рассматриваться либо как в эквивалентном коллекторном двигателе, то есть в виде линейных дифференциальных уравнений, либо как в синхронном двигателе с фиксированным углом нагрузки θ , т.е. в виде нелинейной модели с перекрестными связями.

Сделан вывод, что при приближенном выполнении условия $\tau_s \leq \frac{1}{4\epsilon}$, где τ_s – электромагнитная постоянная времени обмотки якоря в относительных единицах, ϵ – относительная скорость двигателя, статорная цепь ВД может рассматриваться как апериодическое звено первого порядка. Во всех других случаях необходимо ее рассматривать как колебательное звено.

Если выполняется условие $\tau_m \geq 4\tau_s$, где τ_m – механическая постоянная времени, то без ограничения динамическая модель ВД может быть представлена эквивалентной моделью коллекторного двигателя. Если данное условие не выполняется, то представление ВД эквивалентной моделью коллекторного двигателя возможно только при выполнении вышеуказанного условия. В противном случае для описания динамических процессов необходимо использовать уравнения:

$$i_q(p) = \mu(p) = \frac{(\gamma(p)\cos\theta - \varepsilon)(1 + \tau_s(p)) + \gamma(p)\tau_s\varepsilon\sin\theta}{(1 + \tau_s(p))^2 + (\varepsilon\tau_s)^2}, \quad (1)$$

$$\tau_m p \varepsilon = \mu - \mu_c, \quad (2)$$

где i_q , μ – относительное значение тока по поперечной оси и электромагнитного момента соответственно, p – оператор дифференцирования, μ_c – относительное значение момента сопротивления на валу двигателя, γ – управляющий сигнал регулирования напряжения.

При выполнении условия $\tau_m \geq 10\tau_s$ динамическая модель ВД без ограничений приближенно может быть представлена передаточной функцией

$$W(p) = \frac{\Delta\varepsilon(p)}{\Delta\gamma(p)} = \frac{k_1(\theta)}{(1 + \tau_m p) \cdot (1 + \tau_s p)}, \quad (3)$$

Проведена сравнительная оценка различных способов коммутации ВД (120-ти градусная коммутация, 180-ти градусная коммутация и векторное управление) при одинаковом значении параметра относительной индуктивности обмотки и относительной скорости вращения двигателя (ξ и ε), были рассчитаны электромагнитная мощность и электромагнитный к.п.д. двигателя.

Сделаны следующие выводы:

1. Для двигателей с относительно малой индуктивностью обмотки ($\xi < 1$) наибольший к.п.д. получаем при 120–градусной коммутации, немного уступает векторное управление..

2. При $\xi > 1$ у ВД с векторным управлением и со 180–градусной коммутацией зависимости $\eta(\theta)$ и $P_s(\theta)$ практически совпадают и имеют максимум по электромагнитной мощности и к.п.д.

3. При 120–градусной коммутации для рассматриваемых значений параметров при изменении угла коммутации от 0 до $\pi/2$ величина электромагнитной мощности и к.п.д. с увеличением θ падает. Таким образом, для этого способа коммутации, как по электромагнитной мощности, так и по к.п.д. оптимальным является значение угла $\theta = 0$.

Поскольку для векторного управления и 180–градусной коммутации были выявлены максимумы по электромагнитной мощности и к.п.д., были определены углы коммутации, которым соответствуют указанные максимумы, построено семейство аппроксимирующих зависимостей позволяющее выбрать оптимальный угол коммутации во всем диапазоне скоростей вращения ротора ВД заданной конструкции (параметр $\zeta = \omega L/R$) по критерию максимума электро-

магнитного к.п.д., в случаях использования 180-градусной коммутации или векторного управления.

При векторном управлении за счет регулирования угла коммутации ВД при изменении скорости вращения показана возможность не только решать вопросы минимизации энергопотребления двигателя, но и существенно изменять его механические характеристики от присущих двигателю постоянного тока независимого возбуждения до аналогичных двигателям последовательного возбуждения.

В третьей главе представлена сравнительная оценка бездатчиковых способов управления ВД. Обоснована сложность использования рассмотренных методов, особенно с точки зрения оценки начального положения ротора либо использования вычислительной мощности.

Предложен достаточно простой алгоритм векторного управления с использованием синхронного режима работы. ВД, обеспечивающий существенное уменьшение количества используемых вычислительных ресурсов по сравнению с другими алгоритмами векторного управления и заданную равномерность частоты вращения привода при стабильной нагрузке на валу двигателя.

Для повышения энергоэффективности ВД в синхронном режиме, согласно предложенному алгоритму, производится регулирование величины вектора поля статора. Для этого введен контур регулирования тока статора, который поддерживает такой ток в обмотке статора, который бы обеспечивал среднее значение угла нагрузки равным 90 эл.град, при этом мгновенное значение, может существенно колебаться. Начальное положение вектора поля статора θ_0 , может быть сформировано в соответствии с известными законами позиционной коммутации.

Согласно предлагаемому алгоритму, изменение модуля вектора статора происходит при выполнении одного из двух условий: либо переключился датчик Холла, либо вектор поля статора переместился на середину текущего контрольного интервала (сектор между углами $\pi/2 - \theta_{кр}$ и $\pi/2 + \theta_{кр}$ от момента переключения предыдущего МКИ).

Например, датчик Холла переключился, но при этом угол нагрузки меньше чем $\pi/2$, то согласно алгоритму, произойдет уменьшение модуля вектора поля статора. А если вектор поля статора пересек середину контрольного интервала, а датчик Холла не переключился, вектор поля статора будет увеличен.

Если ротор ВД вращается со скоростью, отличающейся от синхронной (переходный режим), или вообще не вращается (пусковой режим), для классического синхронного привода такой режим соответствует выходу из синхронизма и потере работоспособности. В предлагаемом алгоритме эта проблема решается переходом в режим, близкий к позиционной коммутации, который может быть назван режимом синхронизации.

В том случае, когда скорость ротора меньше синхронной, и увеличение тока статора не привело к синхронизации, с течением времени угол нагрузки будет увеличиваться и при достижении критическом значении угла нагрузки $\theta_{кр}$. (выход за границу контрольного интервала), возможен выход из синхро-

низма. Тогда происходит значительно увеличение тока статора и принудительно устанавливается начальное значение угла нагрузки.

В случае, когда скорость ротора больше синхронной, т.е. датчик Холла переключился раньше, чем вектор поля статора достиг контрольного интервала, происходит уменьшение тока статора, вплоть до 0, т.е. переход в режим динамического торможения.

Таким образом, даже отсутствие переключения датчиков Холла позволяет получить информацию, необходимую для управления, и, соответственно, поддерживать синхронный режим двигателя.

Основным недостатком работы ВД в управляемом синхронном режиме является достаточно высокая колебательность ротора, присущая всем синхронным двигателям и приводящая к неравномерности вращения ротора. Поэтому в диссертации большое внимание уделено исследованию динамики управляемого синхронного режима и методов демпфирования колебаний ротора, т.е. коррекции системы управления. Для описания динамических режимов используется полученная в гл. 2 упрощенная структурная схема ВД, в которой в связи с особенностями синхронного режима принято $\theta_0 = \text{var}$. В результате структурная схема получит вид (рис. 1), где $k_1(\theta, \epsilon_0)$, $k_2(\epsilon_0)$ – коэффициенты, определяемые точкой установившегося режима.

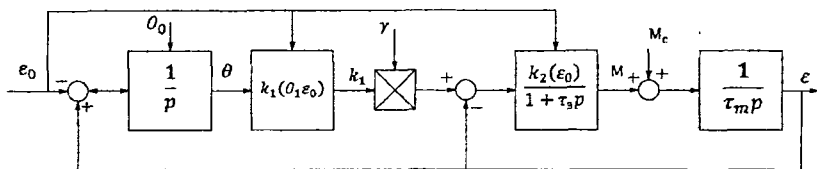


Рис. 1 Детализированная структурная схема ВД

Путём структурных и матричных преобразований из этой схемы получена линеаризованная матричная передаточная функция взаимосвязи между выходными переменными и входными воздействиями в режиме малых отклонений координат при нулевых начальных условиях

$$W(p) = C(pE - A)^{-1}B + D, \quad (4)$$

$$\dim W(p) = 3 \times 4,$$

$$\text{где } A(t) = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ \tau_3 & -1 & \overline{u_1} [\overline{u_3} \tau_3 \cos(\overline{x_3} + \overline{u_2}) - \sin(\overline{x_3} + \overline{u_2})] & \\ -1 & \tau_3 [1 + (\overline{u_3} \tau_3)^2] & & \\ \tau_m & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 0 & \end{bmatrix},$$

матрица коэффициентов:

$$B(t) = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\bar{x}_3 + \bar{u}_2) + \bar{u}_3 \tau_3 \sin(\bar{x}_3 + \bar{u}_2)}{\tau_3 [1 + (\bar{u}_3 \tau_3)^2]} & \frac{\bar{u}_1 [\bar{u}_3 \tau_3 \cos(\bar{x}_3 + \bar{u}_2) - \sin(\bar{x}_3 + \bar{u}_2)]}{\tau_3 [1 + (\bar{u}_3 \tau_3)^2]} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\bar{u}_1 \sin(\bar{x}_3 + \bar{u}_2) - \bar{u}_1 \bar{u}_3 \tau_3 [2 \cos(\bar{x}_3 + \bar{u}_2) + \bar{u}_3 \tau_3 \sin(\bar{x}_3 + \bar{u}_2)] + 2 \bar{u}_3 \tau_3 \bar{x}_2}{1 + (\bar{u}_3 \tau_3)^2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_m} \\ -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\text{матрица управления: } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

матрицы выходных переменных и входных воздействий соответственно, где $\bar{u}_1 \dots \bar{u}_3$ – координаты состояния системы в точке установившегося режима, $x_1 \dots x_3$ – текущие координаты состояния системы

Матрица $W(p)$ представлена со следующими компонентами:

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) & W_{14}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) & W_{24}(p) \\ W_{31}(p) & W_{32}(p) & W_{33}(p) & W_{34}(p) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $W_{ij}(p) = \frac{\gamma_i(p)}{u_j(p)}$ – скалярные передаточные функции, имеющие третий порядок. Каждая из передаточных функций в этой матрице устанавливает связь между одной парой воздействий или координат системы. Приведём только одну из них, остальные будут отличаться только числителем.

$$W_{11}(p) = \frac{\mu(p)}{\gamma(p)} = \frac{-\tau_m p^2 (\cos \bar{\theta} + \bar{\varepsilon}_0 \tau_3 \sin \bar{\theta})}{[1 + (\bar{\varepsilon}_0 \tau_3)^2] (\tau_3 \tau_m p^3 + \tau_m p^2) + p + \bar{\gamma} (\sin \bar{\theta} - \bar{\varepsilon}_0 \tau_3 \cos \bar{\theta})}. \quad (6)$$

Анализ линеаризованной математической модели ВД (рис. 1) и передаточных функций по различным каналам управления $W_{ij}(p)$ позволяет сформулировать различные стратегии управления вентильным приводом для всех режимов его работы.

В синхронном режиме работы ВД для повышения точности поддержания скорости при колебаниях нагрузки введём в закон управления составляющую, зависящую от вариации электромагнитного момента. Такая дополнительная обратная связь в зависимости от поддерживаемого скоростного режима и величины нагрузки должна корректировать либо амплитуду (γ), либо фазу (θ_0) напряжения питания ВД.

При цифровой реализации последнего варианта зависимость сдвига фазы напряжения питания ВД от величины возмущающего момента сводится к передаточной функции $W(z) = \frac{\theta_0(z)}{\Delta\mu(z)} = \frac{kz}{z-1}$, где коэффициент k определяется в за-

висимости от скорости ϵ_0 и вариации момента $\Delta\mu$. Результаты моделирования и экспериментальных исследований привода подтвердили эффективность такой достаточно просто реализуемой коррекции.

Описанный алгоритм внедрен в электроприводе компрессора аппарата искусственной вентиляции легких (ИВЛ). Его применение обеспечивает относительные пульсации менее 1,5 % в диапазоне частот от 10 об/мин до 1000 об/мин. Следует особо отметить, что применение данного алгоритма позволило удовлетворить жесткие требования по стабилизации частоты вращения и энергопотреблению (электропривод ИВЛ питается от автономного источника), недостижимые с другими алгоритмами, без какой-либо доработки аппаратной части, рассчитанной лишь на позиционную коммутацию обмоток статора ВД. Более того, из электропривода удалось исключить энкодер, используемый ранее как датчик обратной связи по частоте вращения в контуре стабилизации.

В четвертой главе рассмотрены методы непрерывного контроля состояния изоляции, показано, что для оценки величины сопротивления между фазными обмотками и корпусом двигателя эффективно использование измерения величины его ёмкостной составляющей. При этом удаётся определить не только состояние изоляции на момент контроля, но оценить тенденции её изменения и предотвратить возникновение аварийного режима

Рассмотрены задачи регламентирования или ограничения электромагнитного момента двигателя, а также определения величины момента сопротивления на его валу, при отсутствии возможности установки дополнительных датчиков момента по конструктивным соображениям. Предложен метод идентификации указанных координат по другим, наблюдаемым координатам и параметрам, в случае, когда напряжение на фазных обмотках, изменяется по синусоидальному закону, на основании которого появилась возможность диагностировать состояние АИВЛ, как механической части, так и электрической, т.к. любая неисправность ведет к изменению момента сопротивления. Указанный метод позволяет одновременно осуществлять диагностику механической части ИВЛ и решать вопросы управления электроприводом с обеспечением заданных статических характеристик динамических свойств.

При решении этой задачи было принято допущение о том, что в n -фазном двигателе имеем ротор с неявно выраженными полюсами в виде постоянных магнитов, поэтому можно считать, что индуктивности по продольной и поперечной осям статорной обмотки одинаковы ($L_d=L_q=L$). Одновременно принято предположение о равенстве активных сопротивлений, индуктивностей и э.д.с. фазных обмоток, а также, что фазные э.д.с. синусоидальны и сдвинуты на 120 эл. градусов.

Полученное решение для определения электромагнитного момента выглядит следующим образом:

$$\mu(\tau) = \frac{\gamma(\cos\theta + \varepsilon\tau_3 \sin\theta) - \varepsilon}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2} - e^{-\frac{\tau}{\tau_3}} \left[\frac{\gamma(\cos\theta + \varepsilon\tau_3 \sin\theta) - \varepsilon}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2} \cos\varepsilon\tau + \frac{\gamma(\sin\theta - \varepsilon\tau_3 \cos\theta) + \varepsilon^2\tau_3 \sin\theta}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2} \sin\varepsilon\tau \right]. \quad (7)$$

Дальнейшие упрощение модели даёт выполнение соотношения $\frac{1}{\tau_3} \gg \varepsilon$ или $\tau_3\varepsilon \ll 1$. В этом случае мнимая часть комплексно-сопряжённых корней характеристического уравнения системы пренебрежимо мала по сравнению с их действительной частью, комплексно-сопряжённые корни превращаются в два кратных действительных корня и колебательной составляющей переходного процесса можно пренебречь. Тогда изображение электромагнитного момента будет иметь вид

$$\mu(p) = i_q(p) \approx \frac{(\gamma \cos\theta - \varepsilon)(1 + \tau_3 p) + \gamma \varepsilon \tau_3 \sin\theta}{(1 + \tau_3 p)^2}. \quad (8)$$

Этому изображению соответствует следующий оригинал

$$\mu(\tau) = i_q(\tau) \approx \gamma(\cos\theta + \varepsilon\tau_3 \sin\theta) - \varepsilon - e^{-\frac{\tau}{\tau_3}} \left[\gamma(\cos\theta + \varepsilon\tau_3 \sin\theta) - \varepsilon + \left[\gamma(\sin\theta - \varepsilon\tau_3 \cos\theta) - \varepsilon^2\tau_3 \right] \varepsilon\tau \right]. \quad (9)$$

Наилучшие результаты при определении электромагнитного момента, как в стационарных, так и в нестационарных условиях работы ВД продемонстрировала следующая модель

$$\mu(p) = i_q(p) \approx \frac{\gamma(\cos\theta + \varepsilon\tau_3 \sin\theta) - \varepsilon}{(1 + (\varepsilon\tau_3)^2)(1 + \tau_3 p)}. \quad (10)$$

Она базируется на выражении для установившегося значения электромагнитного момента $\mu(0)$. Ей соответствует следующий оригинал

$$\mu(\tau) = i_q(\tau) \approx \frac{\gamma(\cos\theta + \varepsilon\tau_3 \sin\theta) - \varepsilon}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2} \left[1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_3}} \right]. \quad (11)$$

Последняя модель положена в основу наблюдающего устройства для оценивания электромагнитного момента.

$$\frac{d\hat{\mu}}{d\tau} = \frac{1}{\tau_3} \left[-\hat{\mu} + \frac{\gamma(\cos\theta + \varepsilon\tau_3 \sin\theta) - \varepsilon}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2} \right], \quad (12)$$

где $\hat{\mu}$ – оценка электромагнитного момента двигателя.

Для определения момента сопротивления используется уравнение (2). При этом предполагалось, что частота вращения ротора измеряется, как и в случае определения электромагнитного момента, и мы располагаем оценкой электромагнитного момента двигателя.

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{1}{\tau_m}(\hat{\mu} - \mu_c),$$

$$\frac{d\mu_c}{d\tau} = 0.$$
(13)

Уравнение редуцированного наблюдателя Люенбергера для оценивания момента сопротивления имеет следующий вид

$$\dot{v} = \lambda_n v + \varepsilon - \frac{\hat{\mu}}{\lambda_n \tau_m},$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = \hat{\mu}_c = \lambda_n \tau_m \varepsilon + \lambda_n^2 \tau_m v,$$
(14)

где λ_n – корень наблюдателя, v – вспомогательная переменная, $\hat{\mu}$ – наблюдаемый момент.

Таким образом, реализация наблюдателя момента сопротивления чрезвычайно проста – на одном интеграторе. Так же, как и для наблюдателя электромагнитного момента двигателя, можно легко получить дискретную модель наблюдателя. Особенность наблюдателя момента сопротивления в том, что он работает совместно с наблюдателем электромагнитного момента. Синтез двух наблюдателей был проведен автономно, независимо друг от друга. Такой порядок синтеза предпочтительнее, чем синтез полноразмерного наблюдателя всех неизмеряемых координат объекта. Для подтверждения результатов было проведено компьютерное моделирование, качество оценивания в обоих случаях высокое, относительная ошибка не превышает 2%.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований и практические результаты работы.

С использованием предложенных методов и алгоритмов разработан и изготовлен турбинный медицинский компрессор КВМ-1 и проведена модернизация электроприводов АИВЛ Фаза-7 (ОАО «Уральский приборостроительный завод») и MV 200 ZisLine (ООО фирма «Тритон-ЭлектроникС»).

Одна из отличительных особенностей компрессора КВМ-1 заключена в применении ВД с гладким якорем и «плюской» обмоткой, которая вставлена в воздушный зазор между статором и ротором, что значительно упрощает технологию изготовления электродвигателя. Другая, что разработанное устройство управления электродвигателем и компрессором (управляющий контроллер) выполнено с малыми габаритами (печатная плата диаметром 38 мм и высотой 5 мм) и встроено непосредственно в корпус компрессора. Указанные особенности позволили снизить стоимость изделия при одновременном увеличении функционала. В аналогичном устройстве Microjammer фирмы Ametek, с которым сравнивался разработанный компрессора, внутренний контроллер отсутствует и приобретается как внешнее устройство. При испытании у КВМ-1 был отключен встроенный режим стабилизации скорости, так как он отсутствует у Ametek. Проведенные испытания показали высокую энергетическую эффективность предложенных методов управления. При открытом выходном отверстии компрессора потребляемый устройством ток составил 2,5 А для КВМ-1 и

2,6 А для Ametek. Испытания в других режимах также показали преимущество разработанного компрессора.

Модернизация электроприводов АИВЛ Фаза-7 и MV 200 ZisLine заключалась в замене ВД производства Махон (Швеция) и ременной передачи от двигателя к компрессору электродвигателем ДБ-70, разработанным ОАО «Миассэлектроаппарат», с прямым приводом на вал компрессора, и разработке нового управляющего контроллера для ВД. Исключение ременной передачи позволило значительно увеличить межремонтный интервал для электропривода и повысить его надежность. В процессе экспериментальных исследований проверялись пульсации потока, создаваемого компрессором АИВЛ, при минимальной частоте вращения ВД (10 мин^{-1}), сравнивались токи, потребляемые приводом до и после модернизации, а также исследовались динамические возможности модернизированного привода при изменении частоты вращения ВД. В результате исследований установлено, что с использованием разработанных алгоритмов управления пульсации частоты вращения ВД, обусловленные технологическими разбросами и наличием реактивного момента, при минимальной частоте вращения составляют не более $0,1 \text{ с}^{-1}$, что обеспечивает заданный уровень пульсаций потока компрессора не более 1 л/мин. Сравнение потребляемых токов показало, что модернизированный электропривод потребляет, в среднем, на 5,3 % меньше энергии, чем исходный. Проверка динамических возможностей модернизированного привода позволила определить время разгона и торможения ВД при изменении частоты вращения от 10 до 1000 мин^{-1} , которое составило не более 38 мс, что полностью удовлетворяет требованиям (время разгона и торможения не более 50 мс), предъявляемым к электроприводу АИВЛ.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические положения, сформулированные в данной работе. Использование предложенных алгоритмов управления позволило без усложнения аппаратной части АИВЛ обеспечить за счет изменения программной части выполнение требований, предъявляемых к электроприводу. Более того, применение разработанных алгоритмов позволило исключить из конструкции электроприводов АИВЛ Фаза-7, MV 200 ZisLine инкрементальный датчик положения ротора ВД (энкодер), снизив, стоимость привода и повысив его надежность.

На рис.2 представлен высокоскоростной турбинный компрессор для АИВЛ, а на рис.3, 4 показаны его составные элементы. На рис. 5 представлен поршневой низкоскоростной компрессор, а на рис.6 плата управления для него.

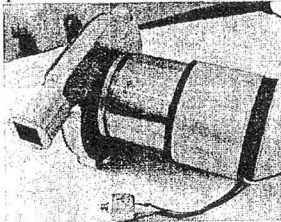


Рис. 2 Компрессор турбинного АИВЛ с ВД

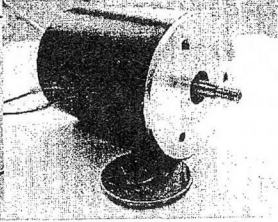


Рис. 3 Двигатель турбинного компрессора АИВЛ

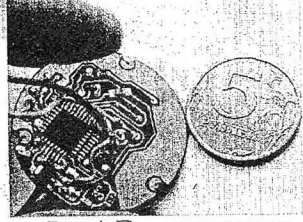


Рис. 4 Плата управления турбинного компрессора

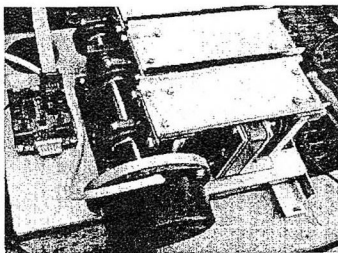


Рис. 5 Электропривод компрессора АИВЛ поршневого типа

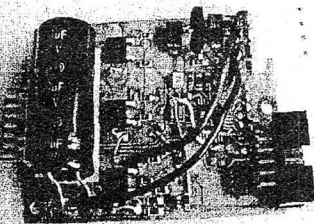


Рис. 6 Плата управления электроприводом компрессора АИВЛ поршневого типа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе заложены теоретические основы и предпосылки для создания общих методов проектирования электроприводов для аппаратов искусственной вентиляции лёгких (ИВЛ). При этом решены вопросы обеспечения заданного быстродействия и равномерности вращения электропривода, непрерывной диагностики в рабочем режиме и повышения энергетических показателей привода.

Конкретные научные и практические результаты работы выражаются в следующем.

1. В результате анализа требований к электроприводу дано обоснование, что в большинстве случаев наиболее предпочтительным для аппаратов ИВЛ компрессорного типа оказывается применение электропривода, построенного на основе вентильных электродвигателей (ВД) с векторным управлением.

2. Методом математического моделирования, определены условия, в виде соотношения электромагнитной и электромеханической постоянных, при которых динамическая модель ВД с возбуждением от постоянных магнитов с достаточной степенью точности соответствует динамической модели классического коллекторного двигателя постоянного тока.

3. Путём анализа физических процессов и математического моделирования установлено, что при определённом соотношении параметров электродвигателя дискретная 120-градусная коммутация по энергетическим показателям не проигрывает векторному управлению и с этой точки зрения может оказаться даже более предпочтительной, при этом угол коммутации, соответствующий максимальному к.п.д. равен 0 эл.град.

4. На основе исследований динамических процессов двигателя в управляемом синхронном режиме разработан упрощённый, с точки зрения объёма используемого вычислительного ресурса, алгоритм векторного управления ВД, обеспечивающий неравномерность частоты вращения не более 5% при низкой частоте вращения, равной 10% от номинальной, при стабильной нагрузке.

5. Теоретически обосновано, что для оценки величины сопротивления между фазными обмотками и корпусом двигателя эффективно использование измерения величины его ёмкостной составляющей. При этом удаётся опреде-

лить не только состояние изоляции на момент контроля, но оценить тенденции её изменения и предотвратить возникновение аварийного режима.

6. Представлен новый метод оценки электромагнитного момента двигателя по измеряемым электрическим координатам, который позволяет одновременно осуществлять диагностику механической части ИВЛ и решать вопросы управления электроприводом с обеспечением заданных статических характеристик динамических свойств.

7. Разработаны и внедрены в производство электроприводы, по техническим характеристикам и эксплуатационным свойствам не уступающие лучшим современным отечественным и зарубежным образцам и превосходящие их по энергетическим показателям на 5,3%, и ниже по стоимости в 1,5–2 раза.

Список работ по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Электромагнитный момент и момент сопротивления на валу синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, Д.В. Коробатов, П.О. Шабуров, А.С. Кульмухаметова // Электротехника. – М: Знак, 2012. – № 2. – С.2–5.
2. Кульмухаметова, А.С. Оперативная диагностика вентильного двигателя / А.С. Кульмухаметова // Вестник ЮУрГУ. серия «Энергетика». – 2012. – вып. № 37(296). – С. 129–131.
3. Воронин, С.Г. Сравнительная оценка различных способов управления коммутацией вентильных двигателей по энергетическим показателям и регулировочным свойствам / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, А.С. Кульмухаметова // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2013 – т. 13, № 1. – С. 96–103.
4. Воронин, С.Г. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, А.С. Кульмухаметова // Электротехника. – М: Знак, 2013. – № 10. – С. 50–54.

В других изданиях:

5. Динамические модели вентильного двигателя при различных сочетаниях параметров / С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, Р.Т. Киякпаев, А.С. Кульмухаметова // Известие Академии электротехнических наук. – 2011. – С. 58–63
6. Метод контроля параметров изоляции электрооборудования в рабочих режимах / Н.В. Клиначев, Д.В. Коробатов, А.И. Согрин, А.С. Кульмухаметова // Сборник научных трудов «Механика и процессы управления» по материалам XXXXI Всероссийского симпозиума по механике и процессам управления. – М:РАН. – 2011 – Т. 2. – С. 201–207.
7. Система контроля параметров изоляции электрооборудования в рабочих режимах / Д.В. Коробатов, Н.В. Клиначев, А.И. Согрин, А.С. Кульмухаметова // Межвузовский научный сборник «Электромеханика, электромеханические

комплексы и системы». – Уфа: Редакционно-издательский комплекс УГАТУ. – 2011 – С. 63–68.

8. Electromagnetic and resistance torque on a synchronous motor shaft with permanent magnet excitation / S.G. Voronin, D.A. Kurnosov, D.V. Korobotov, P.O. Shaburov, A.S. Kul'mukhametova // Russian Electrical Engineering. – 2012. – V. 83. – Issue 2. – P. 61-63.

9. Коробатов, Д.В. Динамические модели и определение электромагнитного момента вентильного двигателя / Д.В. Коробатов, А.С. Кульмухаметова // «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии»: сборник трудов IV международной научно-практической конференции в 2 ч. – Тольятти: Издательство ТГУ. – 2012. – Ч. 1.– С. 58–63.

10. Оперативная диагностика электропривода запорной арматуры / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, Д.В. Коробатов, П.О. Шабуров, А.С. Кульмухаметова // «Измерения: состояние, перспективы развития»: тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ. – 2012. – Т. 1.– С. 70–72.

11. Коробатов, Д.В. Управляемый синхронный режим в аппарате искусственной вентиляции легких / Д.В. Коробатов, А.С. Кульмухаметова, А.А. Шевченко // «Электротехнические комплексы и системы»: сборник научных трудов. – 2012.– № 20.– С. 79–82.

12. Математическая модель динамических процессов в электроприводе запорной арматуры / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, П.О. Шабуров, А.С. Кульмухаметова // «Электротехнические комплексы и системы»: сборник научных трудов. – 2012.– № 20.– С. 132–140.

13. Кульмухаметова, А.С. Реализация векторного управления и синхронный режим вентильного электродвигателя / А.С. Кульмухаметова, Д.В. Коробатов // сборник трудов конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии»: материалы международной научно-технической конференции в 3 т. – Иваново, ИГЭУ им. В.И. Ленина. – 2013 г. – Т. 3. – С. 111–113.

14. Коробатов, Д.В. Программа диагностики параметров вентильного электродвигателя в рабочем режиме / Д.В. Коробатов, А.С. Кульмухаметова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013616934 от 26.07.2013 г.

15. Voronin, S.G. Vector control of permanent-magnet synchronous motors / S.G. Voronin, D.A. Kurnosov, A.S. Kul'mukhametova // Russian Electrical Engineering. – 2013. – V. 84. – Issue 10. – pp. 581–585.

Диссертант



А.С. Кульмухаметова

КУЛЬМУХАМЕТОВА Александра Сериковна

ЭЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ДЛЯ АППАРАТА ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЁГКИХ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.02.2014. Формат 60×84 1/16.
Бумага офисная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Суг.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ №107.
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. Карла Маркса, 12.