

## ОТЗЫВ

**официального оппонента по диссертационной работе Лазовского Эдуарда Николаевича на тему «Математические модели асинхронной машины как компонента электропривода в полярных координатах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы**

**1. Актуальность диссертационной работы.** Как показывает практика, трехфазная асинхронная электрическая машина это один из основных типов электромеханического преобразователя энергии, а управляемые электроприводы на ее основе – один из основных типов промышленного привода.

Основу построения современных систем управления асинхронными электроприводами составляют, как правило, математические модели асинхронной машины, характеризующие ее как элемент системы электропривода, в которых трехфазные переменные представлены декартовыми координатами результирующих векторов. Данные математические модели асинхронной машины достаточно хорошо описаны в технической литературе, их свойства достаточно глубоко исследованы и они нашли широкое применение в практике создания автоматизированных асинхронных электроприводов.

По утверждению автора, декартовы координаты – это не единственно возможная форма представления результирующих векторов обобщенной электрической машины. Вектор в трехмерном пространстве можно характеризовать кроме декартовых координат еще и цилиндрическими координатами, а вектор на плоскости – полярными, которые хорошо вписываются в геометрию электрической машины. Математические модели асинхронной машины с использованием в качестве переменных состояния полярных координат результирующих векторов в литературе освещены мало, а свойства таких моделей изучены недостаточно.

Математические модели в полярных координатах расширяют возможности исследования процессов в асинхронных машинах и обеспечивают возможность создания новых структур систем автоматического управления асинхронными электроприводами.

Таким образом, автор решает научно-техническую задачу изучения системных свойств и связей, физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем, в виде разработки, исследования и применении математических моделей асинхронной машины как компоненты автоматизированного электропривода в полярных координатах.

Автором доказана возможность представления в общем случае линейно независимой плоской трехфазной системы сигналов при описании процессов в

асинхронной машине пространственным результирующим вектором. Предложена модернизация обобщенной электрической машины, которая позволила учесть нулевую составляющую трехфазных переменных. Предложена методика преобразования векторно-матричных уравнений обобщенной электрической машины к системе уравнений в полярных координатах на основе математического аппарата комплексных функций. Раскрыты особенности предлагаемых моделей в сравнении с моделями в декартовых координатах относительно их структуры и организации вычислительного процесса. Необходимость исследований в данной предметной области не вызывает сомнения.

**Общая характеристика работы:** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 123 наименований на 186 страницах и 7 приложений на 21 странице. Основная часть изложена на 174 страницах текста и содержит 92 рисунка и 12 таблиц в приложениях.

**2. Содержание работы.** Во *введении* на основании аналитического обзора литературных источников обоснована актуальность тематики диссертационной работы, определены, цели и задачи исследования. Также сформулированы метод, научная новизна, практическая ценность исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* приведены двумерные векторно-матричные уравнения электромагнитных контуров обобщенной электрической машины. Применение этих уравнений для анализа электромагнитных процессов в трехфазных электрических машинах ограничено условием линейной взаимосвязи между фазными переменными. Для устранения этого ограничения введено и обосновано понятие пространственного обобщенного вектора плоской линейнонезависимой системы сигналов.

Для однозначного определения вектора напряжения мгновенными значениями трехфазных сигналов установлена аналитическая зависимость между ними и координатами вектора напряжения. Для этого автор задает взаимное расположение плоскости трехфазных сигналов и трехмерной системы координат.

Для трехфазной электрической машины трехмерность результирующего вектора трехфазной линейно независимой системы сигналов определяет рассмотрение обобщенной электрической машины трехмерным объектом, содержащим три взаимно ортогональных обмотки на статоре и роторе.

Векторно-матричные дифференциальные уравнения электромагнитных контуров статора и ротора и векторно-матричные уравнения связи между магнитными и электрическими переменными такой обобщенной машины свидетельствуют о том, что уравнения, связывающие между собой координаты результирующих векторов по продольной оси машины, являются полностью автономными. Эти координаты не зависят от других координат векторных переменных и на них не влияют.

Во *второй главе* обоснована процедура получения дифференциальных уравнений асинхронной машины в полярной системе координат. Все промежуточные выкладки выполняются с использованием показательной формы представления комплексных переменных математической модели асинхронной машины. На этапе разделения уравнений асинхронной машины на вещественную и мнимую составляющие переходят к тригонометрической форме записи.

В результате разработан набор математических моделей асинхронной машины в виде систем дифференциальных уравнений и структурных схем для различных комбинаций векторных переменных.

Анализ моделей в полярных координатах показывает удобство практического применения только при синхронизации скоростей вращения координатной системы и векторных переменных. С целью устранения указанного неудобства предложено ввести в рассмотрение в качестве переменных состояния асинхронной машины вместо аргументов векторных переменных (угол между вектором и полярной осью) разность аргументов векторных переменных (угол между соответствующими векторами). Разработана, обоснована и реализована методика выполнения такой замены. В результате, для различных комбинаций векторных переменных, получен набор математических моделей асинхронной машины инвариантных к скорости вращения системы координат.

*Третья глава* посвящен разработке и исследованию уточненных математических моделей асинхронной машины в полярных координатах, учитывающих насыщение главной магнитной цепи и эффект вытеснения тока ротора.

Результаты проведенных исследований с помощью предлагаемых моделей свидетельствует о том, что они могут использоваться для выявления взаимосвязей между переменными и для численных расчетов процессов в системах, содержащих трехфазные асинхронные машины.

Результаты моделирования совпадают с данными, полученными с помощью подобных моделей в декартовых координатах, и хорошо согласуются с результатами анализа влияния насыщения главной магнитной цепи и эффекта вытеснения тока ротора на характеристики асинхронной электрической машины.

В *четвертой главе* рассмотрен пример практического использования разработанных математических моделей асинхронной машины в полярных координатах для исследования режимов работы систем транспортирования жидкостей и газов.

Объект исследования здесь представлен структурой, состоящей из питающей сети, дополнительной нагрузки, пускорегулирующего устройства, электромеханического преобразователя энергии, трубопровода.

Для иллюстрации практического использования разработанных математических моделей выполнено моделирование процессов прямого и плавного пуска асинхронного электропривода насоса транспортной системы при подключении его к сети ограниченной мощности. Для этого разработана матема-

тическая модель сети ограниченной мощности, в которой, согласно принятому в работе подходу, трехфазные переменные представлены полярными координатами соответствующих результирующих векторов.

**Заключение** содержит выводы по работе, которая представляет собой законченный труд, посвященный методике получения математических моделей в полярных координатах асинхронных электрических машин, других электротехнических объектов, содержащих трехфазные электрические цепи и характеризующихся трехфазными сигналами; использовать эти модели в полярных координатах для исследования процессов в электротехнических комплексах и системах. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные математические модели асинхронных машин в полярных координатах и модели инвариантные к скорости вращения системы координат для использования в инженерной и научной практике наряду с моделями в декартовых координатах.

Порядок изложения материалов исследования позволяет рассматривать диссертацию как единое целое.

**3. Основные научные результаты и их новизна.** Диссертационная работа Лазовского Эдуарда Николаевича углубляет и расширяет теоретические и практические представления в области математического моделирования асинхронных машин, в области исследования свойств и эффективности применения математических моделей асинхронной машины, как компоненты электропривода, в полярных и цилиндрических координатах. В работе представлены разработанные автором, научно обоснованные, технические решения, направленные на совершенствование и развитие общей теории электротехнических комплексов и систем. Эти результаты определяют научную новизну диссертации.

Наиболее значимыми научными результатами, полученными соискателем являются следующие:

- впервые введено и обосновано понятие результирующего пространственного вектора для трехфазной плоской линейнонезависимой системы сигналов, что позволило развить понятие обобщенной электрической машины, дополнив ее перпендикулярными к плоскости поперечного сечения магнитонесвязанными обмотками на статоре и роторе;
- разработаны и исследованы математические модели асинхронной машины, в которых векторные переменные состояния представлены их полярными, а в случае линейнонезависимых трехфазных сигналов цилиндрическими координатами и модели инвариантные к скорости вращения системы координат при условии постоянства ее параметров, а также учитывающие насыщение главной магнитной цепи и эффект вытеснения тока ротора;
- с помощью предлагаемых моделей изучены характеристики асинхронного электропривода, ненаблюдаемые при моделировании в декартовых координатах.



**4. Основные практические результаты и реализация работы.** Разработанный комплекс математических моделей асинхронной машины в полярных координатах позволяет воспроизводить переменные, не наблюдаемые в моделях в декартовых координатах. Это определяет область практического использования разработанных математических моделей при анализе динамических и установившихся режимов электроприводов.

Предлагаемые математические модели отличаются другим набором переменных состояния асинхронной машины и, следовательно, могут быть рекомендованы для практического использования при проектировании асинхронных электроприводов, в которых регулируемы переменными являются модули и аргументы (разности аргументов) результирующих векторов.

На основе предлагаемых подходов сформулированы предложения по применению моделей при проектировании электроприводов, позволяющие осуществить обоснованный выбор системы плавного пуска асинхронных электроприводов насосов канализационных, водоперекачивающих, турбокомпрессорных станций и режимы работы.

**5. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям.** Диссертация Лазовского Э.Н. полностью отвечает критериям, которые предусмотрены для научно-квалификационных работ в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842. В ней соблюдены следующие принципы соответствия.

5.1. Указанная диссертантом *цель работы* – разработка, исследование свойств и иллюстрация эффективности применения в научной и инженерной практике математических моделей асинхронной машины как компоненты электропривода, использующих в качестве переменных состояния полярные координаты результирующих векторов трехфазной системы сигналов – *реализована в рамках представленной диссертационной работы.*

5.2. *Автореферат* диссертации Лазовского Э.Н. *соответствует диссертационной работе* по всем квалификационным признакам: по цели, задачам исследования, основным положениям, актуальности, научной значимости, новизны, практической ценности.

5.3. *Основные выводы и результаты* диссертации *соответствуют поставленным задачам* исследований и сформулированы автором четко и ясно.

5.4. Научные *публикации* Лазовского Э.Н., изданные в период с 2010 по 2015 гг., *соответствуют диссертационной работе* и с достаточной полнотой отражают ее основные результаты и выводы.

5.5. *Тема и содержание* диссертации Лазовского Э.Н. *соответствуют паспорту* научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» (далее курсивом по тексту паспорта):

- по направлению исследований, связанных комплексом математических моделей асинхронной машины – компоненты электропривода, в полярных ко-

ординатах как «...развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем...»;

- по области исследования как «...разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем...»;

- по объекту исследования – как «...исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...».

Диссертация Лазовского Э.Н. написана доступным языком, корректным в научном и техническом отношении. Материалы и результаты исследования изложены в необходимом объеме на достаточном квалификационном уровне.

В работе показана обоснованность и результативность применяемых автором подходов к научным исследованиям.

Результаты, полученные диссертантом, являются вкладом в решение задачи изучения системных свойств и связей, физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем.

**6. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Основные научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, получены Лазовским Э.Н. на основе разработанных корректных математических моделей; подтверждены сопоставимостью полученных результатов с положениями электромеханики, а также совпадением результатов моделирования процессов в асинхронного электроприводе на предлагаемых моделях с результатами, полученными на широко используемых в практике моделях в декартовых координатах и с результатами экспериментальных исследований режимов плавного пуска асинхронного электропривода, приводимых в литературных источниках.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, находится на уровне требований достаточном для кандидатской диссертации.

**7. Апробация работы публикации.** Результаты работы доложены и обсуждены на ряде научных конференций и семинарах:

- IV международной научно-практической конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии» (Липецк, 2010);
- V юбилейной международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, 2011);
- Всероссийской научно-технической конференции «Управление и информатика в технических системах» (Красноярск, 2013);
- XIII международной научно-практической конференции «Современные

концепции научных исследований» (Москва, 2015).

Основные результаты работы, полученные автором в ходе исследований, приняты к использованию в проектной практике при выборе электроприводов и проектировании систем автоматики ОАО «Сибцветметниипроект», а также внедрены в учебный процесс кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Политехнического института ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». По теме диссертации автором опубликовано 7 работ из них 3 – в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**8. Замечания и дискуссионные положения.** Вместе с тем, работа не свободна от недостатков. В качестве замечаний следует отметить:

1. В тексте диссертации имеются незначительные опечатки и неточности: Н: отсутствует рис. 2.29 на стр. 90. Допускается отрыв заголовков от текста Н: п. 1.5 (Стр. 38). Имеется несоответствие страниц текста в содержании. В экземпляре диссертации отсутствуют страницы 2-10.
2. Нет рекомендаций, при каких условиях автор предлагает применять для математического анализа аппарат комплексных функций, где уравнения, связывающие проекции результирующих векторов на ось  $\gamma(z)$  не учитываются, либо учитываются отдельно (вывод 4 по главе 1 стр. 47).
3. Как можно оценить возможность применения результатов работы на асинхронные машины серий АИР, 5А, 6А или специальных серий, если исследования проводились с использованием «...большого количества асинхронных машин серии 4А...» (Стр. 71, 79, Приложение В диссертации)?
4. Почему автор использовал для анализа режимов работы в главе 4 диссертации возможности и эффективности использования математических моделей асинхронной машины в полярных координатах при моделировании процессов в сложных технических системах на примере «...одного класса турбомеханизмов...» рассматривает модели устройств «плавного пуска» асинхронных двигателей 0,4 кВ на неполностью управляемых вентилях с большим искажением формы тока? Хотя в настоящее время разработаны эффективные устройства «плавного пуска» на полностью управляемых ключах с синусоидальным законом потребляемого из сети тока.

**Общее заключение по диссертации.** Диссертация Лазовского Эдуарда Николаевича соответствует специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», имеет внутреннее единство и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, содержится решение задачи – разработки, исследовании свойств и эффективности применения математических моделей асинхронной машины, как компоненты электропривода, в полярных и цилиндрических координатах, и содержащей совокупность результатов, представляющих новое

решение актуальной научно-технической задачи, имеющей существенное значение при анализе и синтезе электротехнических комплексов и систем.

Считаю, что диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – **Лазовский Эдуард Николаевич** – достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой  
Электропривода и электрооборудования  
Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
почетный работник высшего  
профессионального образования РФ,  
Ph. D., канд. тех. наук (специальность – 05.09.03),  
доцент

Дементьев Юрий Николаевич

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
e-mail: [dementev@tpu.ru](mailto:dementev@tpu.ru), [dementiev@mail2000.ru](mailto:dementiev@mail2000.ru)

Подпись Ю.Н. Дементьева заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
04 апреля 2016 г.



О.А. Ананьева