

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук

Глазырина Александра Савельевича на диссертационную работу

Филюшова Юрия Петровича на тему «Вопросы теории и основы построения энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

### **1. Актуальность избранной темы**

Диссертационная работа Ю.П. Филюшова посвящена решению крупной научно-технической проблемы разработки и совершенствования методов энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока.

Актуальность избранной темы исследования обусловлена рядом следующих факторов:

1. Для построения современного микропроцессорного электропривода переменного тока имеется развитая элементная база. В состав силовой части электропривода активно внедряются активные (рекуперативные) выпрямители для рекуперации энергии в электрическую сеть; матричные конверторы для непосредственного управления обмотками двигателя; автономные инверторы на основе быстродействующих электронных ключей на основе IGBT, MOSFET, HEXFET, в том числе в составе интеллектуальных силовых модулей, что позволяет получать полосу пропускания самых быстродействующих контуров электропривода – контуров тока и момента – в пределах сотен герц и даже в отдельных случаях до единиц килогерц. Стандартом становится применение специализированных высокопроизводительных цифровых сигнальных процессоров, имеющих всю необходимую для управления электроприводом переменного тока периферию, такую как АЦП, ШИМ-генераторы, модули квадратурного захвата сигнала и т.п. Всё вышеперечисленное предоставляет разработчику возможность реализовать на практике сложнейшие алгоритмы управления, в том числе направленные на повышение быстродействия и энергоэффективности электроприводов переменного тока.

2. Дальнейший рост промышленного производства в ближайшем будущем столкнётся как с проблемой ввода дополнительных энергогенерирующих мощностей, так и с вопросами энергосбережения. Электрические машины, работающие в составе электроприводов, являются основными элементами, преобразующими электрическую энергию в полезную работу, при этом электропривод потребляет свыше 60% всей вырабатываемой электроэнергии. В связи с этим не вызывает сомнения необходимость уделять пристальное внимание вопросам теории построения энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока, а значит представленная работа является своевременной и актуальной.

### **2. Научная новизна, достоверность и обоснованность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе решена научная проблема энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока.

**Научная новизна** работы сформулирована следующим образом:

1. Сформулировано правило выбора решений многокритериальной оптимизации, отличающееся использованием аналитических связей силовых и энергетических характеристик, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя.

2. Разработана методология комплексного подхода к синтезу многомерного управления, отличающегося тем, что при апериодическом характере формирования электромагнитного момента обладает способностью регулировать основные свойства электропривода.

3. Определены условия изменения состояния электрической машины за минимальное время при формировании выходных величин. Решение отличается применением вариационных методов при синтезе многомерного управления электроприводом методом обратной модели с линеаризацией по выходу.

4. Предложен метод формализации задачи эффективного управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода в рамках установленных ограничений. В качестве ограничений могут выступать характеристики основных свойств электропривода, связанные в явном виде посредством показателей качества:

- ✓ коэффициент полезного действия;
- ✓ показатель интенсивности процессов преобразования энергии;
- ✓ показатель эффективности использования напряжения;
- ✓ показатель эффективности использования мощности.

5. Предложен метод интегральной оценки эффективности управления электроприводом различного типа в переходных режимах, отличающийся применением функций энергетического состояния, связывающих силовые и энергетические характеристики электрической машины.

6. Получена динамическая модель системы многомерного управления электроприводом, отличающегося способностью наряду с формированием электромагнитного момента, учитывая нелинейность характеристики намагничивания и потери в стали, регулировать динамические и энергетические свойства электропривода в условиях существующих ограничений.

7. Разработана стратегия многомерного управления различными типами машин переменного тока, отличающегося формированием электромагнитного момента при одновременном регулировании энергетических свойств в функции скорости или нагрузки быстродействующего электропривода.

### **3. Научная (теоретическая) и практическая значимость результатов работы**

#### **Теоретическая значимость полученных результатов:**

1. Концептуальные положения комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводом методом обратной модели с линеаризацией по выходу, в совокупности с применением вариационных методов, могут быть использованы для решения нелинейных задач современной теории управления многомерными объектами.

2. Связи силовых и энергетических характеристик электрической машины, представленные в явном виде, дают возможность получить новые знания в теории электромеханического преобразования энергии, на основании которых выбираются решения многокритериальной оптимизации электрической машины электропривода переменного тока для реализации тех или иных требований технологического процесса.

3. Установленная аналитическая зависимость показателей качества основных свойств электропривода от аргументов, характеризующих положение векторов, определяет новые знания теории электропривода, на основании которых становится возможным formalизовать задачу управления, обеспечивающую желаемую производительности технологических процессов при максимально возможном снижении потребления энергии.

4. Разработанная методология многокритериального синтеза многомерного управления электрической машиной переменного тока вносит новые знания в развитие теории управления электроприводом переменного тока, на основании которых формируется управление, обеспечивающее наряду с формированием электромагнитного момента регулирование основных свойств электропривода переменного тока различного назначения. Новые решения синтеза управления, обеспечивающего апериодический характер формирования электромагнитного момента, определяют прогнозируемость процессов управления и преемственность синтеза внешних контуров способами подчиненного регулирования систем воспроизведения движения, повышая точность

регулирования. Разработанная методология синтеза управления способствует решению практически важных задач энергосбережения высокодинамичных систем воспроизведения движения большой и малой мощности в условиях технологических ограничений.

**Практическая значимость** результатов работы характеризуется следующим:

1. Разработанная методология многокритериального синтеза многомерного управления электрическими машинами (синхронных с электромагнитным возбуждением, явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронных машин с короткозамкнутым ротором) быстродействующего электропривода позволяет повысить точность регулирования и улучшить интегральную оценку КПД за время переходного процесса на 6 - 8%. Такое управление значительно расширяет потребительские свойства электропривода переменного тока.

2. Аналитический метод интегральной оценки энергетической эффективности работы электропривода позволяет на стадии проектирования сопоставить основные свойства различных систем воспроизведения движения в статических и динамических режимах.

3. Разработанные теоретические положения в совокупности с практическими результатами создают объективные предпосылки для внедрения в практику электроприводов нового поколения. Областью применения разработанных алгоритмов управления могут быть электроприводы металлургической, металлообрабатывающей промышленности, электроприводы подвижного состава железнодорожного транспорта, где к технологическим процессам предъявляются высокие динамические и энергетические требования в условиях существенного изменения нагрузки.

#### **4. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям**

Диссертация Филюшова Ю.П., представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, полностью отвечает принципам соответствия, установленным нормативным документом «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 30.07.2014 N 723, от 21.04.2016 N 335, от 02.08.2016 N 748, от 29.05.2017 N 650, с изм., внесенными Решением Верховного Суда РФ от 21.04.2014 N АКПИ14-115).

1. Декларируемая диссидентом цель работы, которая заключается в создание теории и структур энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока, которое отличается наиболее полным использованием электрической машины и источника питания для реализации технологических требований – полностью реализована в проведенных исследованиях и отражена в полученных результатах.

2. Автореферат диссертации Филюшова Ю.П. соответствует диссертационной работе по всем квалифицируемым признакам, а именно: по цели, задачам и основным положениям, определениям актуальности, новизны и достоверности, научной и практической значимости и др.

3. Оппонент подтверждает, что результаты, полученные Филюшовым Ю.П., опубликованы в печати в течение последних десяти лет и с исчерпывающей полнотой отражают существо оппонируемой работы.

4. Как следует из паспорта научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», которая объединяет «...изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем» (п.1), «... структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизацию, а также разработку алгоритмов эффективного управления» (п.3) – соответствие темы диссертации научной области исследований по специальности сомнений не вызывает.

5. Диссертация написана логически последовательно, корректным с научной и технической точки зрения языком.

6. Структурное построение и редакционное оформление диссертации и автореферата серьезных замечаний не вызывает. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав основного текста, заключения, списка используемой литературы, включающего 186 наименований. Диссертация изложена на 310 страницах основного текста, содержит 122 рисунков, 5 таблиц, 5 приложений на 34 страницах.

Оппонент отмечает, что выводы по работе, сформулированные Филошовым Ю.П., оформлены структурно-содержательно. В них убедительно продемонстрирована результативность проведенных исследований, предложена методология синтеза и управления, обеспечивающего эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации различных технологических задач в рамках установленных ограничений.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

### **5. Замечания и дискуссионные положения**

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Все известные математические модели регулируемых электрических машин не отражают всё многообразие процессов, происходящих в электрической машине. Математическая модель необходимого уровня сложности выбирается исходя из специфики решаемой задачи, при этом в обязательном порядке следует указать все принятые при математическом моделировании допущения. В диссертации отсутствует обоснование выбора математических моделей и принятых допущений.

2. Не понятно как автором при математическом моделировании электрических приводов переменного тока учитывались такие объективно существующие явления и эффекты как:

2.1. Непостоянство индуктивностей статорных и роторных обмоток, вызванное насыщением магнитопровода и влиянием преобразователя частоты (наличие частных петель гистерезиса).

2.2. Скин-эффект, наличие паразитной ёмкости обмоток статора при высокой частоте коммутации электронных ключей автономного инвертора напряжения.

2.3. Изменение эквивалентного момента инерции, приведённого к валу двигателя, что часто наблюдается при преобразовании вращательного движения в поступательное в кривошипно-шатунных механизмах; при изменении диаметра и массы намотанного троса в барабане лебёдки в подъёмно-транспортных механизмах; изменение диаметра и массы деталей в процессе обработки в электроприводах главного движения токарных станков и т.п.

2.4. Стохастический характер момента сопротивления на валу регулируемого двигателя переменного тока, что часто связано с объективной спецификой технологического процесса?

3. Предлагаемые в диссертационной работе решения в настоящее время можно реализовать только на основе микропроцессорного электропривода. Следует пояснить: как на показатели качества разрабатываемых систем управления электропривода влияют эффекты квантования по уровню и дискретизации по времени? Как в условиях повышенных требований по быстродействию выполняются требования, сформулированные в известной теореме Котельникова-Шеннона-Найквиста о частоте дискретизации?

4. При решении задач оптимизации в первом случае важно проводить проверку целевых функций на унимодальность, т.е. наличие только одного экстремума, тогда для решения экстремальной задачи существует множество проверенных и относительно не сложных методов. Во втором случае, когда целевая функция не является унимодальной, существует риск преждевременного схождения решения задачи к локальному экстремуму, приходится применять гораздо более сложные методы глобальной оптимизации.

Проводилось ли исследование на унимодальность предложенных в третьей главе в виде показателей качества электропривода функций энергетического состояния? Чем гарантируется нахождение глобального (наилучшего) экстремума целевой функции оптимизации?

5. Какие имеются принципиальные преимущества и недостатки у решений, полученных соискателем, в отличие от решений в области теории и основ построения энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока, содержащихся в известных научных публикациях и докторских диссертациях Веселова Геннадия Евгеньевича (г. Таганрог, ЮФУ) и Полякова Владимира Николаевича (г. Екатеринбург, УрФУ)?

и замечания по оформлению, содержанию и представлению работы:

1. Многие иллюстрации, такие как рис. 2.2, 5.28, 5.34, 6.30, 7.2 а), 7.7...7.12, 7.15, 7.25...7.28 и др. с целью улучшения качества прочтения следовало бы выполнить в векторном формате.

2. Рисунки переходных процессов, полученные в результате математического моделирования, должны иметь более чётко выраженные подписи по осям абсцисс и ординат.

3. В последние два десятилетия в практике настройки, монтажа и диагностики получили широкое распространение цифровые осциллографы. Приведение осциллограмм, полученных на основе аналоговых осциллографов, является в настоящее время в некоторой степени анахронизмом.

4. Не понятно с какой целью в приложении А к диссертационной работе соискатель привёл текст общезвестного государственного стандарта ГОСТ 50369-92?

5. При записи математической операции скалярного произведения векторов в форме с круглыми скобками пропущена запятая, разделяющая между собой перемножаемые вектора. Это может ввести читателя в заблуждение.

Указанные критические замечания не снижают высокий научный уровень работы и значимость полученных результатов.

### **Заключение**

Диссертационная работа Филюшова Юрия Петровича является завершенным научным исследованием, разработанные теоретические положения, объединенные общей концепцией комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводом переменного тока, имеют важное теоретическое и практическое значение.

Полученные результаты обладают бесспорной научной новизной, как в постановке актуальных задач, так и в предложенных решениях и соответствуют паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Личный вклад докторанта в решение всех научных положений представленной к защите работы подтвержден многочисленными публикациями в рецензируемых научных журналах, патентом на изобретение и тремя свидетельствами на регистрацию программ для ЭВМ. Внедрение результатов диссертационного исследования, несомненно, будет способствовать решению задач развития производства отечественных быстродействующих энергосберегающих электроприводов переменного тока на инновационной основе.

В соответствии с п. 9 названного «Положения...» можно констатировать, что диссертация Филюшова Ю.П. на соискание ученой степени доктора технических наук является завершенной научно-квалификационной работой, в которой автором дано решение крупной научно-технической проблемы энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока. На основании выполненных исследований, автором предложена методология синтеза управления, обеспечивающего эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации различных технологических задач в рамках установленных ограничений. Разработанные теоретические положения, объединенные общей концепцией комплексного подхода к

синтезу многомерного управления электроприводом переменного тока, имеют важное теоретическое и практическое значение.

Считаю, что диссертационная работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Филюшов Юрий Петрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы.

**Официальный оппонент:**

Доктор технических наук, доцент  
отделения электроэнергетики и электротехники  
Инженерной школы энергетики Национального  
Исследовательского Томского политехнического  
университета 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
[asglazyrin@tpu.ru](mailto:asglazyrin@tpu.ru) тел. 8 (3822) 60-62-91  
Специальность по докторской Диссертации  
05.09.03. – Электротехнические комплексы  
и системы

Александр Савельевич Глазырин

Подпись Глазырина А.С. заверяю  
Ученый секретарь ТПУ

О.А. Ананьева

