

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертационную работу Хабарова Андрея Игоревича  
«АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С  
СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

### **На отзыв представлены:**

- диссертационная работа, состоящая из введения, шести глав с выводами, заключения, библиографического списка из 96 наименований. Полный объем работы составляет 159 страниц;
- автореферат диссертации с общей характеристикой работы, кратким изложением основного содержания и результатов исследования.

### **Актуальность темы диссертации**

Комплекс преобразователь частоты - асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (ПЧ – АДКЗ), является сегодня наиболее распространенным электротехническим комплексом преобразования электроэнергии. Эффективность преобразования электрической энергии в механическую, в том числе, определяется законами управления выходными переменными электрической машины, реализацию которых обеспечивает преобразователь частоты.

Известны ставшие классическими постановки задачи эффективного управления АДКЗ. Однако для практического применения законов эффективного управления требуется наличие алгоритмов такого управления, разработка которых является самостоятельной научной и инженерной задачей.

Другим аспектом проблемы управления комплексом ПЧ-АДКЗ является реализация алгоритмов управления в преобразователях частоты с различными способами управления – скалярным, векторным, прямого управления моментом. Важным также является выбор способа ШИМ.

Учитывая, что ПЧ со скалярным способом управления являются, возможно, наиболее простыми в реализации, такой тип ПЧ должен быть рассмотрен в первую очередь при реализации алгоритмов эффективного управления.

Поэтому исследование Хабарова А. И. по разработке законов и алгоритмов эффективного управления АДКЗ при работе в комплексе с преобразователем частоты со скалярным управлением, структурного и параметрического синтеза системы управления выходными переменными электродвигателя на базе скалярного способа регулирования частоты вращения ротора, является актуальным.

### **Новизна исследований и полученных результатов**

Новизна исследований и полученных результатов заключается в следующем.

1. В работе приведена постановка известной задачи экстремального управления моментом электродвигателя при наличии ограничений на выходные координат – ток и напряжение статора. Очевидно, что тогда можно выделить три области значений выходных координат: предельное значение тока и вариация напряжения статора, предельное значение напряжения и вариация тока статора, вариация тока и напряжения статора. Соответственно, для вычисления момента используют модели электрической машины по каналам «напряжение статора – потокосцепление ротора» и «ток статора - потокосцепление ротора».

Автором исследованы зависимости аргументов целевой функции максимума момента электродвигателя: тока и напряжения статора, потокосцепления ротора и абсолютного скольжения, в диапазоне изменения угловой частоты ротора от -1,5 до 1,5 номинального значения, при допустимом значении тока статора, равном удвоенному номинальному току. Зависимости получены с помощью предложенного автором «алгоритма расчета законов экстремального управления, обеспечивающих оптимизацию по выбранному критерию в заданной области моментов двигателя, отличающийся автоматическим определением зон частотного регулирования».

Решение задачи экстремального управления моментом и определение, по терминологии автора, предельного закона управления, позволило предложить структурную схему блока реализации предельного закона управления в скалярной системе регулирования, в состав которого входят функциональные преобразователи сигнала задания угловой скорости ротора в требуемые значения напряжения статора и скольжения, что позволяет определить заданную угловую частоту напряжения статора.

2. Автором предложена двухканальная структурная схема скалярной системы оптимального управления. Первый, условно, канал управления реализует закон экстремального управления моментом, второй – управление в установившихся, или статических, режимах работы электропривода. Закон управления в статическом режиме работе автор предлагает определять в предположении, что наиболее вероятным режимом работы электродвигателя будет работа при номинальном токе статора. Система управления автоматически определяет квадрант механической характеристики, в котором работает электродвигатель, и режим работы – переходный или статический. Данное свойство системы используется для выбора закона управления.

3. Разработана «оригинальная система токоограничения, обеспечивающая четырехквadrантный режим работы электропривода, включающий рекуперативное электрическое торможение», при наличии в преобразователе частоты соответствующих блоков, в частности, активного выпрямителя. Система токоограничения, как указано в диссертации, выполняет функцию формирования таких предельных значений тока, которые соответствуют экстремальному закону управления.

Автор указывает, что синтез регулятора тока выполнен при условии пренебрежения внутренними обратными связями по ЭДС двигателя и перекрестными связями по току статора, и делает заключение, что степень влияния

неучтенных факторов на реальную величину тока зависит от соотношения параметров силовой и регулирующей части, а именно момента инерции механической системы и некомпенсируемой постоянной времени контура регулирования тока. При этом автор не учитывает, что данное положение справедливо при условии линейности замкнутого контура тока, и ограничения тока путем ограничения задающего воздействия.

Нелинейные системы, в которых нелинейность входит в замкнутый контур тока, например системы с задержанной отрицательной обратной связью по току, обладают известным свойством компенсации параметрических возмущений. Учитывая тот факт, что в предлагаемой автором системе токоограничения нелинейность также входит в замкнутый контур тока как последовательное корректирующее устройство, можно предположить незначительное влияние указанных факторов на значение тока в переходных режимах.

4. В работе предложен электромеханический показатель качества как отношение момента электродвигателя к току статора. По физическому смыслу критерий выражает эффективность электромеханического преобразования энергии, и поэтому качественно повторяет форму зависимости КПД от скольжения и частоты вращения ротора, что подтверждают графики, представленные в диссертации. Показано, что электромеханический критерий имеет максимум, поэтому автор использует его в качестве показателя качества при синтезе законов управления электроприводом.

#### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы состоит в разработке структурных, алгоритмических и программных решений для создания преобразователей частоты со скалярной системой управления, обеспечивающих реализацию эффективных законов управления электроприводом, доставляющих экстремум комплексному показателю качества, в том числе универсальных решений токоограничения для электроприводов со скалярной и векторной системами управления.

Результаты работы следует использовать в организациях и на предприятиях, занимающихся разработкой и испытаниями систем управления и управляемых преобразователей для питания электродвигателей переменного тока.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность научных положений подтверждается:

корректным применением классических методов теории автоматического управления, численных методов решения нелинейных уравнений, апробированных математических моделей асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в различных системах координат и по различным каналам;

результатами исследования типовых режимов работы электропривода переменного тока для трёх марок электродвигателей мощностью 4, 22 кВт общепромышленного исполнения и мощностью 40 кВт взрывозащищенного исполнения, полученных с использованием моделей, реализованных в математическом пакете *Matlab*, и экспериментальных данных, полученных на

испытательном стенде и действующем самоходном вагоне для транспортировки горной массы в условиях подземного рудника;

метрологическим обеспечением и точностью измерительной аппаратуры для получения и обработки результатов экспериментальных исследований.

### **Подтверждение опубликования основных результатов работы**

Согласно представленным в автореферате сведениям, основные научные положения диссертации опубликованы в печатных работах, которые включают три статьи в двух журналах из перечня рекомендованных ВАК и аттестационным советом УрФУ им. Б. Н. Ельцина для публикации результатов научных исследований, один из которых индексируется в международной реферативной базе *Scopus*, два доклада на международных конференциях, две статьи в международном сборнике научных трудов.

### **Соответствие работы научной специальности**

Работа соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 *Электротехнические комплексы и системы* в части разработки, структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов и систем, и разработки алгоритмов эффективного управления.

### **Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы**

1. В обзоре литературных источников по теме диссертации не представлены результаты выполненных ранее исследований по количественной оценке эффективности законов оптимального управления, что не позволяет сопоставить известные и полученные автором результаты оптимизации режимов работы асинхронных машин путем формирования законов оптимального управления.

2. Следует пояснить, почему в постановке (1.1) задачи комплексной оптимизации выполняется поиск оптимального управления, доставляющего максимум «моменту нагрузки  $m$ », который является моментом внешних сил, действующих на электропривод, и, в общем случае, не зависит от закона управления.

3. При каких значениях показателя степени  $n$  в выражении для вычисления механических потерь в электродвигателе (2.49) получены результаты, представленные в работе, и как обоснован выбор значения  $n$ ?

4. Выражение (2.47) для вычисления потерь в стали является одним из нескольких, описанных в литературе. Например, Радин В. И. и др. рекомендуют использовать для определения магнитных потерь различные выражения для машин мощностью до 100 кВт и выше 100 кВт, в которых частота поля статора входит в уравнения со степенным коэффициентом 1,5, в то время как Ключев В. И. рекомендует значение показателя степени 1,3. Опыт выбора наиболее точного выражения для вычисления потерь в стали в машинах постоянного тока свидетельствует, что имеются уравнения, обладающие погрешностью не более 15% по сравнению с опытными данными, в то время как другие уравнения дают погрешность более 50%.

Следовало провести обзор литературных источников по расчету магнитных потерь и выбрать наиболее точные формулы.

5. Исходя из того, что момент машины формирует активный ток, следует пояснить, почему на функциональной схеме скалярной системы управления с системой токоограничения (рис. 4.15) в качестве сигнала нелинейной обратной связи по току использован сигнал, пропорциональный току статора машины, а не активному току, что может привести к более раннему началу действия ОС, и не полному использованию машины по моменту.

6. Номинальные данные рассматриваемого в работе двигателя АИУЕ225М6 взрывозащищенного исполнения, представленные в табл. 5.1, не соответствуют естественной механической характеристике двигателя (рис. 5.3). Вероятно, кратность пускового момента равна 0,87, а не 1,87, как указано в таблице.

7. Следует пояснить, почему на графиках на рис. 5.10 и 5.11 продолжительность разгона до частоты вращения 0,5 от номинальной одинакова и составляет 2 с, а момент, развиваемый электродвигателем при модернизированной системе управления (рис. 5.10), на 25% превышает момент в типовой скалярной системе (рис. 5.11). Тогда, согласно второму закону Ньютона, при одинаковом моменте инерции продолжительность разгона при модернизированной системе должна быть на 25% меньше по сравнению с классической системой.

8. В уравнения математической модели (2.50) «напряжение статора - потокосцепление ротора» (Модель 1), и уравнения модели (2.51) «ток статора - потокосцепление ротора» (Модель 2), не включено выражение для определения электромагнитного момента двигателя  $m$ . По какому из трех, отличающихся друг от друга уравнений, представленных в работе, производится расчет значения  $m$ : (2.7), (2.26), (2.32)?

9. В приложении не представлена справка о внедрении результатов работы «в производство серийного самоходного вагона В17К Копейского машиностроительного завода» (с.11 диссертации).

10. Редакционные замечания.

- a) В работе следовало использовать термин *угловая* скорость, или частота вращения, ротора двигателя.
- b) Перечень литературы должен быть составлен в алфавитном порядке, перечень использованной иностранной литературы приводится в конце списка.
- c) Обозначение коэффициента уравнения  $g_i$  в блоке формул (2.24), выражениях (2.38), (2.40) не является общепринятым в данном контексте и требует расшифровки. Из контекста следует, что, возможно, это обозначение коэффициентов степенного полинома.
- d) В работе сделаны ссылки на рукописные источники, в частности, ссылки на полные тексты диссертаций. Рукописный источник не проходит рецензирование, в нем могут содержаться субъективные выводы автора, текст рукописного источника может иметь несколько редакций, не ясно, на какой результат, полученный в диссертации, сделана ссылка. Следовало делать ссылки на опубликованные в научных изданиях работы авторов.

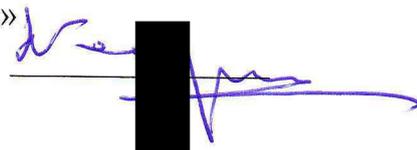
### **Заключение**

Диссертация написана с использованием общепринятой научной и технической терминологии. Изложенный материал представлен последовательно и аргументировано. Оформление диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к научным квалификационным работам.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические разработки в области разработки законов и алгоритмов эффективного управления асинхронным электродвигателем при работе в комплексе с преобразователем частоты со скалярным управлением, структурного и параметрического синтеза системы управления выходными координатами электродвигателя на базе скалярного способа регулирования частоты вращения ротора, имеющие существенное значение для экономики отрасли.

По содержанию и по форме работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Хабаров Андрей Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,  
заведующий кафедрой электрификации горных предприятий  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»  
Карякин Александр Ливиевич



09 ноября 2020 г.

### **Полное наименование организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет»

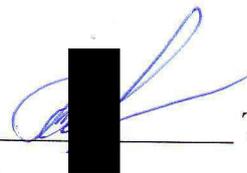
### **Юридический адрес:**

620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30

Тел.: +7 (343) 251-48-38

Е-mail: [office@ursmu.ru](mailto:office@ursmu.ru)

Подпись Карякина Александра Ливиевича заверяю.  
Начальник отдела кадров



Т. Б. Сабанова

