

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.173.04,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 14 марта 2019 г. № 1

О присуждении Балковому Николаю Николаевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

**Диссертация** «Разработка и исследование системы управления динамическим моментом двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата» по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» принята к защите 10 января 2019 г., протокол № 1 диссертационным советом Д.212.173.04, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, приказ о создании диссертационного совета №105/нк от 11.04.2012 г.

**Соискатель** Балковой Николай Николаевич 1988 года рождения, в 2009 году получил степень бакалавра по направлению «Электроника и микроэлектроника» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» Министерства науки и высшего образования РФ. В 2011 году соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет

систем управления и радиоэлектроники» Министерства науки и высшего образования РФ, получив степень магистра по направлению «Электроника и микроэлектроника», специализации «Промышленная электроника и микропроцессорная техника». В 2014 году завершил обучение в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» Министерства науки и высшего образования РФ по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». Соискатель работает в Акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полюс» (г. Томск), Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» с 2009 г. и в настоящее время занимает должность ведущего инженера-конструктора.

Диссертация выполнена на кафедре «Промышленная электроника» Факультета электронной техники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» Министерства науки и высшего образования РФ и в Акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полюс», Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос».

**Научные руководители** – доктор технических наук, профессор, заместитель главного конструктора Акционерного общества «Научно-производственный центр «Полюс» **Казанцев Юрий Михайлович**; доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» **Михальченко Геннадий Яковлевич**, профессор.

**Официальные оппоненты:**

**Гарганеев Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное



учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ), профессор Инженерной школы энергетики;

**Мурыгин Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева), заведующий кафедрой Информационно-управляющих систем, профессор

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), г. Красноярск **в своем положительном отзыве**, составленном Пантелеевым Василием Ивановичем, доктором технических наук, профессором, директором Политехнического института СФУ, заведующим кафедрой «Электротехнические комплексы и системы», и утвержденном исполняющим обязанности ректора, доктором биологических наук, профессором Колмаковым Владимиром Иннокентьевичем, **указала, что** диссертация Балкового Н.Н. является законченным научным исследованием, выполненным самостоятельно с получением новых научных результатов, имеющих существенное значение для развития методов разработки, структурного и параметрического синтеза электроприводов управляющих двигателей-маховиков (УДМ), а также разработки алгоритмов эффективного управления для цифровых систем. Диссертация соответствует критериям, установленным п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» для ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», а ее автор, Балковой Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук. Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на расширенном научно-техническом семинаре кафедры

«Электротехнические комплексы и системы» 22 января 2019 г., протокол №6(109).

Соискатель имеет 16 опубликованных работ по теме диссертации, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, и 12 публикаций в прочих изданиях (в том числе в материалах международных и всероссийских конференций). Соискателем получены 2 патента на изобретения. Общий объем публикаций составляет 5,9 п.л., авторский вклад соискателя не менее 80 %. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах отсутствуют.

**Наиболее значимые работы по теме диссертации:**

1. Балковой, Н.Н. Эталонная цифровая модель управляющего двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата / Н.Н. Балковой, Г.Я. Михальченко // Доклады ТУСУР. – 2014. – №3(33) – С. 161–167.

2. Балковой, Н.Н. Цифровой астатический электропривод систем ориентации и стабилизации космических аппаратов / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург, Г.Я. Михальченко // Докл. Том. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2014. – № 3 (33). – С. 168 – 175.

3. Балковой, Н.Н. Анализ особенностей применения двигателей-маховиков с компенсацией собственных помеховых моментов / Н.Н. Балковой // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т.25. №3 – С. 203 – 210.

4. Поляков, М.В. Современное состояние и перспективы развития управляющих двигателей-маховиков / М.В. Поляков, А.С. Дмитриенко, О.Ю. Завьялова, В.П. Лянзбург, Г.Н. Гладышев, Н.Н. Балковой // Доклады ТУСУР. – 2018. – №3(21) – С. 109–114.

К наиболее значимым работам также относятся выданные соискателю патенты на объекты интеллектуальной собственности:



5. Пат. 2521617 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/28. Способ управления динамическим моментом двигателя-маховика / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин; патентообладатель ОАО "НПЦ "Полюс"; опубл. 10.07.2014.

6. Пат. 2609673 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 6/08. Способ регулирования частоты вращения электродвигателя / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург; патентообладатель АО "НПЦ "Полюс"; опубл. 02.02.2017.

**На диссертацию и автореферат поступило 8 положительных отзывов из следующих организаций:**

**1. ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»**, отзыв подписал доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» по научной работе **Чивенков А.И.** Замечания по поводу некорректного использования фразы «дозирование выходного момента»; отсутствия в автореферате информации по данным испытательного оборудования; отсутствия исследований нелинейных движений, описываемых цифровой системой управления и представления частотных характеристик для линеаризованной модели электропривода; вопрос о характере момента сопротивления, когда температура окружающей среды близка к абсолютному нулю.

**2. ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»**, отзыв подписал профессор, доктор технических наук, профессор кафедры управления в технических системах Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике **Ефимов А.А.** Замечание по поводу отсутствия в автореферате вопросов повышения надежности системы, хотя в четвертом положении, выносимом на защиту, заявлено, что полученные новые научные результаты «позволяют проектировать надежные системы управления динамическим и кинетическим моментами СДПМ».



**3. АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»**, отзыв подписали кандидат технических наук, начальник сектора 542-1 **Лихачев В.Н.**, начальник отдела 542 **Федотов В.П.**, утвердил доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе **Шевченко С.Н.** Замечание касается линейного характера момента сопротивления при моделировании, хотя последний обладает нелинейными формами и имеет скачкообразное возмущение.

**4. ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»**, отзыв подписал доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 604 **Малышев В.В.** Замечание по поводу перегруженности первой главы теорией работы систем ориентации и стабилизации, а также известными сведениями о характере нагрузки электроприводов; реальные уравнения динамики космического аппарата обладают значительной сложностью, задача улучшения динамических характеристик космического аппарата (КА) обширна и определяется типом КА и его целевыми задачами, рекомендовано рассматривать влияние возмущений от УДМ при подробном моделировании режимов стабилизации и ориентации КА с учетом геометрии и расположения центров масс аппарата.

**5. АО «Научно-исследовательский институт командных приборов»**, отзыв подписал кандидат технических наук, начальник отдела **Якимовский Д.О.** Замечания связаны с отсутствием пояснения, каким образом вычисляется погрешность динамического момента и для каких значений входного сигнала проводится сравнение различных систем управления; не приведены результаты испытаний (или моделирования) системы в режимах втягивания в синхронизм, работы в линейной зоне частотно-фазового дискриминатора, изменения знака динамического момента и скорости вращения; не указаны дискретность и погрешность применённого датчика положения ротора, не показано, как влияет изменение указанных параметров на работу системы; не указаны программно-



аппаратные требования к элементной базе (число вентиляей, размер памяти, быстродействие и т.п.), на которой может быть реализована предложенная система.

**6. АО «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения»**, отзыв подписали кандидат технических наук, главный научный сотрудник отделения 4 **Абезяев И.Н.**, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь научно-технической секции **Точилев Л.С.**, утвердил заместитель генерального директора, заместитель генерального конструктора **Широков П.А.** Замечания касаются отсутствия данных о современном состоянии разработок в области систем автоматического управления УДМ за рубежом; неверной записи значения кода управления на листе 19 автореферата, должно быть «... $N_u = \pm 10$  (250 мкНм...)», наличия опечаток «элеткропривод» (л. 12), «диссертационно» (л. 22); рекомендовано фразу на л. 20 в последнем абзаце «..погрешность крутизны регулировочной характеристики УДМ по результатам испытаний составила не более 0,5%» дополнить диапазоном рабочих температур; указанная мощность потребления 0,4 Вт воспринимается, как мощность потребления прибора с  $M_d=0,05 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $N=2 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ , что не является реалистичным.

**7. ФГУП «Московское опытно-конструкторское бюро «Марс»**, отзыв подписали кандидат технических наук, доцент, начальник направления 1 **Шатский М.А.**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заместитель генерального конструктора **Соколов В.Н.** Замечания по поводу математической модели силовой цепи УДМ, где не учтен гармонический закон формирования фазных токов и не проведена оценка корректности данного упрощения; отсутствия графиков изменения скоростей вращения роторов, что мешает полному соотнесению «прохождения нулевой угловой скорости ротора по каналу Z» и показанных скачков на графиках изменения угловых рассогласований; отсутствия информации о законе управления, используемого в системе ориентации и



стабилизации (СОиС) КА при эксперименте, а также данных о количестве и схеме установки УДМ, что не позволяет получить полное представление о влиянии предлагаемой системы на динамику контура стабилизации.

**8. АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнёва»**, отзыв подписали главный конструктор проектирования и испытаний систем ориентации и коррекции КА, начальник отделения **Якимов Е.Н.**, доктор технических наук, профессор, главный ученый секретарь НТС, Действительный член Российской и Международной инженерных академий, Заслуженный инженер России, Заслуженный создатель космической техники, лауреат премий Правительства РФ **Головёнкин Е.Н.** Замечание связано с тем, что проведено моделирование и макетирование УДМ с максимальным кинетическим моментом  $2 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  и управляющим моментом  $0,05 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , однако в настоящее время наряду с микро и мини спутниками растет использование КА на геостационарной орбите и применение управления динамическими моментами для соответствующих УДМ (с кинетическими моментами от  $15$  до  $150 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  и максимальными управляющими воздействиями до  $0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) наиболее актуально.

**Выбор официальных оппонентов** обосновывается тем, что доктор технических наук, профессор **Гарганеев А.Г.** является известным ученым и изобретателем в области исследования и проектирования различных электромеханических систем и в частности гироскопических приборов; доктор технических наук, профессор **Мурыгин А.В.** является ведущим специалистом в области систем автоматического управления, экспериментальных исследований характеристик УДМ, теоретического анализа влияния возмущающих воздействий на работу системы ориентации и стабилизации космического аппарата. Выбор ведущей организации (**СФУ**) обосновывается наличием специалистов, имеющих общепризнанные достижения в области исследования электромеханических комплексов космического применения, которые способны объективно оценить научный и практический уровень диссертационной работы соискателя. Квалификация и



практический опыт оппонентов и ведущей организации подтверждены публикациями по теме исследования.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** новая научная концепция построения электроприводов УДМ с управлением по динамическому моменту, позволившая уменьшить шаг задания управляющего воздействия с  $0,1 \text{ мН}\cdot\text{м}$  до  $0,025 \text{ мН}\cdot\text{м}$  и уменьшить погрешность с 10-20 % до 0,5 %,

**предложена** оригинальная структура электропривода УДМ, в основе которой лежит принцип фазовой автоподстройки частоты и замыкание контура управления по углу с созданной эталонной цифровой моделью движения ротора-маховика с ускорением,

**доказана** перспективность применения УДМ с новой системой управления в составе высокоточной системы ориентации и стабилизации космического аппарата,

новых понятий и терминов **не введено**.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** возможность обеспечения линейной формы моментно-скоростных и стабильность крутизны моментно-регулирующей характеристик УДМ, то есть получения пропорциональной зависимости динамического момента от сигнала задания во всем диапазоне изменения кинетического момента и тем самым компенсации влияния момента сопротивления на процесс ориентации и стабилизации КА; полученные результаты справедливы и могут быть применены для УДМ с различными номинальными значениями кинетических и управляющих моментов; также доказано, что предложенный способ сложения частот пилообразных сигналов позволяет перейти от операций с тригонометрическими функциями (4 умножения, 2 сложения) к суммированию пилообразных функций и реализовать этот процесс аппаратно-программными средствами, упростив при этом структуру системы управления.

**применительно к проблематике диссертации результативно** использован комплекс существующих базовых методов исследования, в том числе математическое и имитационное моделирование, методы структурного и объектно-ориентированного программирования, элементы линейной алгебры, методы теории автоматического управления, теории электрических машин и электропривода, методы физического эксперимента,

**изложены** положения и идеи, направленные на разработку эталонной цифровой модели движения ротора-маховика с ускорением, имитационной математической модели трехконтурной системы управления УДМ,

**раскрыто** противоречие в виде цели линеаризации выходных характеристик УДМ и невозможности практической реализации системы управления электропривода УДМ с обратной связью по динамическому моменту (ускорению), а также проблемы влияния момента сопротивления и момента трогания с разнообразными скачкообразными возмущениями при реализации косвенного способа управления динамическим моментом путем регулирования тока в фазах двигателя,

**изучены** особенности формирования управляющих воздействий УДМ во всем диапазоне рабочих частот вращения ротора-маховика и в различных режимах работы, а также исследована связь с точностными характеристиками системы ориентации стабилизации космического аппарата,

**проведена модернизация** существующих математических моделей электропривода УДМ, предложена трехконтурная структура и алгоритмы переключения контуров в системе управления УДМ, внесено уточнение в математическую модель моментов нагрузки электродвигателя в части дополнения характера изменения момента трогания по экспоненциальному закону при остановке и после начала движения ротора.



**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены** методика расчета эталонной цифровой модели движения ротора-маховика с ускорением, способ сложения частот пилообразных сигналов, способ и устройство регулирования динамического момента, программно-аппаратный комплекс моделирования динамических режимов работы УДМ в рамках многочисленных договорных работ АО «НПЦ «Полюс» с ведущими предприятиями авиационно-космической отрасли, а также в учебном процессе в ФГБОУ ВО «ТУСУР»,

**определены** перспективы дальнейшего практического использования результатов диссертационного исследования при проектировании и конструировании УДМ с различными кинетическими и динамическими моментами,

**создана** система практических рекомендаций по исследованию основных выходных характеристик УДМ с новым алгоритмом управления, разработаны программа и методики испытаний,

**представлены** рекомендации для дальнейшего применения УДМ с управлением по динамическому моменту в составе прецизионных систем ориентации и стабилизации, а также дальнейшему совершенствованию алгоритмической части системы управления с целью компенсации технологических погрешностей электродвигателя и датчика положения ротора.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** использовано сертифицированное, прошедшее своевременную поверку, измерительное и испытательное оборудование АО «НПЦ «Полюс», а также контрольно-проверочная аппаратура, разработанная специально для УДМ с новой системой управления и прошедшая полный цикл предъявительских и приемосдаточных испытаний; показана воспроизводимость результатов исследований выходных характеристик УДМ при различных климатических

условиях, при испытаниях на электромагнитную совместимость, а также после механических испытаний,

**теория** построена на известных положениях математического анализа, электрических цепей и основ электротехники, математического, имитационного и физического моделирования, опубликованных теоретических и экспериментальных данных по теме диссертации, также теория согласуется с авторскими и другими опубликованными ранее экспериментальными данными,

**идея базируется** на анализе и обобщении результатов исследования принципов работы современных прецизионных электроприводов, передового опыта в их программно-алгоритмическом обеспечении,

**использованы** сведения о проектировании систем управления УДМ в других работах, которые оценены с критической точки зрения и сравнены с предлагаемым решением, причем отмечены как преимущества, так и недостатки всех систем,

**установлено** качественное и количественное совпадение результатов, полученных автором с использованием разработанных математических и имитационных моделей с результатами, полученными при проведении физического эксперимента, что дает основание считать разработанные модели пригодными для дальнейшего проектирования прецизионных систем управления УДМ,

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации, результатов измерений при моделировании и экспериментальных исследованиях.

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии при постановке задач, обосновании и разработке всех положений, определяющих научную новизну и практическую значимость, изложении и обобщении теоретических и практических результатов работы, разработке математических и имитационных моделей, разработке структурной и функциональной схем системы управления УДМ на основе эталонной



цифровой модели и электропривода с фазовой синхронизацией, разработке способа сложения частот пилообразных сигналов, создании макетных образцов, в проведении экспериментальных исследований, а также интерпретации полученных данных, подготовке основных публикаций и патентов по выполненной работе.

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для развития электротехнической и космической отраслей Российской Федерации, и соответствует п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании 14 марта 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Балковому Н.Н. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введенных на разовую защиту нет, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Заместитель председателя  
диссертационного совета



С.А. Харитонов

Ученый секретарь  
диссертационного совета

М.А. Дыбко

14 марта 2019 г.