

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.334.01
(Д 212.148.02) НА БАЗЕ ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОСБИОТЕХ)»

Аттестационное дело №__

Решение диссертационного совета от 28 декабря 2023 г. № 10
о присуждении Крахмалеву Олегу Николаевичу, гражданину России ученой
степени доктора технических наук.

Диссертационная работа «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» принята к защите «13» сентября 2023 (Протокол заседания №06) диссертационным советом 24.2.334.01 (Д 212.148.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11, утверждённого приказом от 11.04.2012 г. № 105/нк.

Соискатель Крахмалев Олег Николаевич, 1964 года рождения. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Методы построения и анализа динамических моделей манипуляционных систем роботов» защитил в 2013 г. в диссертационном совете Д 212.105.01, созданном при Юго-Западном государственном университете (г. Курск). В настоящее время работает в должности доцента кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)».

Представленная к защите диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)».

Научный консультант: Благовещенский Иван Германович доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника пищевых производств» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

Официальные оппоненты:

- Никитина Марина Александровна доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий» ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН;

- Шкапов Павел Михайлович доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Московский

государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»;

- Кайченев Александр Вячеславович доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Кафедра автоматики и вычислительной техники» ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА – Российский технологический университет» (г. Москва) в своем положительном заключении, подписанном заведующим кафедрой промышленной информатики кандидатом технических наук, доцентом Владимиром Анатольевичем Холоповым и утверждённым первым проректором РТУ МИРЭА доктором химических наук, профессором Николаем Ивановичем Прокоповым,

указала, что диссертационная работа «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования» является законченным научным исследованием, в котором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение имеющее теоретическое значение и практическую ценность, отвечает критериям, изложенным в п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (редакция 11.09.2021), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Крахмалев Олег Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Соискателем по теме диссертации опубликовано более 60 печатных работ, в том числе 5 монографии, 13 статей, индексируемых в Scopus и WoS, 18 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 2.3.3, зарегистрировано 3 электронных ресурса и 2 компьютерные программы. Все публикации отражены в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также в международных наукометрических базах, таких как Scopus, Web of Science (WoS) и др.

Автором опубликовано 72 статьи с отражением в РИНЦ, из них в ядре РИНЦ – 21. Ссылок на опубликованные автором работы из публикаций, включенных в РИНЦ – 431, а из публикаций, включенных в ядро РИНЦ – 74. Основное содержание диссертации представлено:

в рецензируемых изданиях из перечня ВАК:

1. **Крахмалев, О.Н.** Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами / О.Н. Крахмалев, Л.И. Блейшмидт // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – №1. – С. 29–36.
2. **Крахмалев, О.Н.** Оптимизация законов движения при моделировании динамики манипуляционных роботов / О.Н. Крахмалев, Д.М. Медведев, Д.И. Петрешин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №1. – С. 27–30.
3. **Крахмалев, О.Н.** Исследование рабочих зон манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №2. – С. 31–37.
4. **Крахмалев, О.Н.** Собственные частоты колебаний в манипуляционных системах с упругими звеньями / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – №4 (306). – С. 59–65.
5. **Крахмалев, О.Н.** Анализ сил инерции, возникающих при движении двух связанных тел / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2014. – №2(29). – С. 81–87.
6. **Крахмалев, О.Н.** Моделирование движения промышленных роботов в программном комплексе «Универсальный механизм» на основе 3D-моделей / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №4. – С. 46–51.
7. **Крахмалев, О.Н.** Первичные отклонения геометрических параметров многозвенных механических систем промышленных роботов и станков с ЧПУ / О.Н. Крахмалев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №4. – С. 52–57.
8. **Крахмалев, О.Н.** Исследование движения манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №10. – С. 3–6.
9. **Крахмалев, О.Н.** Математическое обеспечение систем управления промышленными роботами и многокоординатными станками для коррекции влияния на их движение геометрических отклонений / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №3. – С. 28–35.
10. **Крахмалев, О.Н.** Обеспечение точности многокоординатных станков и промышленных роботов методом коррекции геометрических отклонений / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // СТИН. – 2016. – №11. – С. 7–11.

11. **Крахмалев, О.Н.** Объектно-ориентированное моделирование динамики манипуляционных систем на основе матриц преобразования однородных координат /О.Н. Крахмалев// Робототехника и техническая кибернетика. – 2017. – №2(15).–С.32–36.
12. **Крахмалев, О.Н.** Математические модели систем управления для калибровки базы промышленных роботов / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // СТИН. – 2017. –№6. – С. 23–29.
13. **Крахмалев, О.Н.** Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, Г.Н. Крахмалев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. –№10 (18). – С. 664–668.
14. **Крахмалев, О.Н.** Методы объектно-ориентированного моделирования манипуляционных систем роботов / О.Н. Крахмалев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. –№1 (327). – С. 96–105.
15. **Крахмалев, О.Н.** Объектно-ориентированное моделирование манипуляционных систем роботов / О.Н. Крахмалев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – №4(21). – С. 41–47.
16. **Крахмалев, О.Н.** Алгоритмизация параллельных вычислений в динамической модели манипуляционных систем роботов/ О.Н. Крахмалев // Информационные технологии. – 2020. – №6. – Т. 26. – С. 354–359.
17. **Крахмалев, О. Н.** Объектное моделирование в кинематике манипуляционных роботов / О.Н. Крахмалев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2022. – №5. – С. 55–66. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202205-06>
18. **Крахмалев, О.Н.** Генетическое программирование и объектное моделирование манипуляционных роботов // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 2. С. 22–31. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-2-22-31.

В международных наукометрических базах Scopus и WoS:

1. **Krakhmalev, O.N.** Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges / O.N. Krakhmalev, L.I. Bleyshmidt // Allerton Press, Inc., New York: Journal of Machinery Manufacture and Reliability. –2014. –Vol.43. –No. 1. – pp. 22–28.
2. **Krakhmalev, O.N.** Provision of Controlled Motion Accuracy of Industrial Robots and Multiaxis Machines by the Method of Integrated Deviations Correction / O.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin, O.N. Fedonin // MEACS2015

- IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124. – 2016. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012067
3. **Krakhmalev, O.N.** Dynamic Models of Robots with Elastic Hinges / O.N. Krakhmalev // MEACS2015 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124. – 2016. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012068
 4. **Krakhmalev O.N.**, Petreshin D.I., Fedonin O.N. Mathematical Models for Base Calibration in Industrial Robots/ Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37. – No. 11. – pp. 995–1000.
 5. **Krakhmalev, O. N.** Improving the Precision of Multicoordinate Machine Tools and Industrial Robots / O.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin, O.N. Fedonin // Allerton Press, Inc., New York: *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37. – No. 5. – pp. 434–437.
 6. **Krakhmalev, O.N.** Methods of Calibrating the Orientation of the Industrial Robot Tool / O.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin, G.N. Krakhmalev // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 3–4 Oct. 2018, Publisher: IEEE Xplore. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602519
 7. **Krakhmalev, O.N.** Use of Structural Mutations in Object-Oriented Mathematical Models of Robot Manipulation Systems / O.N. Krakhmalev // Springer Nature Switzerland AG. Mathematical Models and Computer Simulations. – 2020. – Vol. 12. – No 1. – pp. 90–98.
 8. **Krakhmalev, O.** Designing Object Diagrams and the Method of Structural Mutations in Models of Robots' Manipulation Systems/ O. Krakhmalev // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Springer, Singapore. Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – pp. 209–221.
 9. **Krakhmalev, O.**; Krakhmalev, N.; Gataullin, S.; Makarenko, I.; Nikitin, P.; Serdechnyy, D.; Liang, K.; Korchagin, S. Mathematics Model for 6-DOF Joints Manipulation Robots// Mathematics. – 2021. – Vol 9, 2828. <https://doi.org/10.3390/math9212828>.
 10. **Krakhmalev, O.**; Korchagin, S.; Pleshakova, E.; Nikitin, P.; Tsibizova, O.; Sycheva, I.; Liang, K.; Serdechnyy, D.; Gataullin, S.; Krakhmalev, N. Parallel Computational Algorithm for Object Oriented Modeling of Manipulation Robots // Mathematics. – 2021. – Vol 9, 2886. <https://doi.org/10.3390/math9222886>.
 11. **Krakhmalev, O.**; Gataullin, S.; Boltachev, E.; Korchagin, S.; Blagoveshchensky, I.; Liang, K. Robotic Complex for Harvesting Apple Crops // Robotics. – 2022. – Vol 11, 77. <https://doi.org/10.3390/robotics11040077>
 12. Karabanov, G., Selyukov, A., **Krakhmalev, O.** (2022). Numerical Solution of the Inverse Kinematics Problem on the Example of a 6-DOF Robot. In:

- Ronzhin, A., Meshcheryakov, R., Xiantong, Z. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13719. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9_14
13. Kang Liang, Zhang Xiukai, **Oleg Krakhmalev**. Quantum-behaved particle swarm optimization with short-lived swarm layers. *SoftwareX*, 2023, 24, 101536, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101536>.

В монографиях:

1. **Крахмалев, О.Н.** Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ. – 2012. – 200 с.
2. **Крахмалев, О.Н.** Точность управляемого движения промышленных роботов и многокоординатных станков: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ. – 2015. – 236 с.
3. Крахмалев, О.Н. Влияние параметров инерции на движение манипуляционных роботов / О.Н. Крахмалев // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2014. – 57 с. ISBN 978-3-659-57477-1
4. **Крахмалев, О.Н.** Математическое обеспечение управления манипуляционными роботами: монография / О.Н. Крахмалев // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2016. – 113 с. ISBN 978-3-659-53110-1
5. **Крахмалев О.Н.** Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования: монография / О.Н. Крахмалев, И.Г. Благовещенский. – М: РОСБИОТЕХ, 2023. – 311с.

на электронных ресурсах:

1. **Крахмалев, О.Н.** Метод построения геометрических моделей манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Свид. о рег. электронного ресурса № 20898 (зарегистрировано в ИУО РАО ОФЭРНиО 07.05.2015).
2. **Крахмалев, О.Н.** Методика параметризации геометрических (математических) моделей манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Свид. о рег. электронного ресурса № 20899 (зарегистрировано в ИУО РАО ОФЭРНиО 07.05.2015).

3. **Крахмалев, О.Н.** Метод коррекции интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Свид. о рег. электронного ресурса № 20900 (зарегистрировано в ИУО РАО ОФЭРНиО 07.05.2015).
4. **Крахмалев, О.Н.** Геометрическая модель манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев // Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ №2015661029 от 01.09.2015.
5. **Крахмалев, О.Н.** Вычисление кинематических параметров манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев // Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ №2016617509 от 10.05.2016.
6. Kang, Liang and **Krakhmalev, Oleg and Blagoveshchensky, Ivan** and Krakhmalev, Nikita and Beiresh, Andrew, Object Modeling in Kinematic Problems of Manipulation Robots. Available at SSRN, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4445299>

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов. Все отзывы положительные и содержат замечания, не снижающие научной и практической значимости представленных в диссертационной работе результатов.

1. И. о. директора СПб ФИЦ РАН, д.т.н., профессор, профессор РАН Ронжин Андрей Леонидович дал положительный отзыв, отметив замечания:

- в автореферате декларируется, что предложенная методология математического моделирования позволяет учитывать разного рода отклонения и возмущения, однако примеров возмущений и количественных характеристик не приводится;

- из автореферата не ясно, как осуществлять интеграцию предложенных методов с встраиваемыми системами управления нижнего уровня, как практически применять методы калибровки для анализа кинематической структуры манипуляционных систем роботов.

2. Заведующий кафедрой РК6 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Баумана (национальный исследовательский университет)», д.ф.-м.н., профессор Карпенко Анатолий Павлович дал положительный отзыв, отметив замечания:

- в автореферате не конкретизировано как связаны первичные (линейные и угловые) геометрические отклонения, используемые в представленных методах модификации геометрических моделей манипуляционных систем с измеряемыми геометрическими параметрами, такими как прямолинейность, параллельность, плоскостность и др.;

- недостаточно полно представлен формализм объектного моделирования. Описано только составление объектных схем, соответствующих матричным алгебраическим уравнениям, но не описан способ моделирования дифференциальных и интегральных уравнений, часто используемых в задачах кинематики и динамики;

- из схем образования классов *Geometric_model* (рис. 16) и *Inertial_model* (рис. 29) не очевидна наследственная цепочка, так как геометрическая и инерционная модели описаны в работе как множества соответствующих матриц, таким образом структура описывающих их классов должна содержать массивы матриц, а не отдельные матрицы.

3. Профессор кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН», д.т.н., профессор Подураев Юрий Викторович дал положительный отзыв, отметив замечания:

- постановку обратной задачи кинематики по скоростям, представленной уравнением (4), необходимо было бы дополнить формулировкой этой задачи и по положениям, например, путем перехода к дискретной постановке этой задачи заменой дифференциального уравнения (4) конечноразностным;

- концептуальная схема построения управления, представленная на рис. 8, отражает традиционный подход, используемый при построении алгоритмов управления компенсационного типа, тогда как в работе описан алгоритм управления (12) с соответствующей ему структурной схемой (рис. 6), в котором не используются вычисления на основе модели управляемого объекта.

4. Начальник научно-инженерной и образовательной лаборатории Цифровых компьютерных систем и автоматизации «НИКИМТ-Атомстрой» (предприятие госкорпорации «Росатом»), д.т.н., профессор Ковшов Евгений Евгеньевич дал положительный отзыв, отметив замечания:

- на стр. 5 отмечено, что «... предложен научно обоснованный подход к адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенных на основе объектного описания их математических моделей, путём декомпозиции соответствующих математическим моделям объектных схем в результате применения генетического алгоритма ...», однако в автореферате не приведены параметры и результаты работы генетического алгоритма с различными по своему составу векторами входных данных, не указано, что используется в качестве критерия остановки работы алгоритма;

- на стр. 29 (рис. 41) приводятся «Уровни алгоритма параллельных вычислений динамической модели», но в тексте не отражаются результаты вычислительных экспериментов, подтверждающие или опровергающие эффективность работы алгоритма по уровням выполняемых вычислений;

- в основных результатах и выводах по диссертационной работе (стр. 33) в качестве рекомендаций следовало бы привести выявленные ограничения на разработанные математические модели и область предпочтительного применения алгоритмического обеспечения при реализации распределённых систем управления промышленными роботами, предназначенными для выполнения различных технологических операций.

5. Профессор, научный сотрудник лаборатории «Фундаментальных и прикладных исследований» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», д.т.н., профессор Усанов Константин Михайлович дал положительный отзыв, отметив вопросы и замечания:

- как обозначена разрешаемая автором в работе научная проблема, определяющая научную гипотезу для преодоления существующего противоречия и позволяющая оценить верность сформулированных цели и задачи исследования;

- некоторые из представленных в тексте положений имеют, на наш взгляд, неоднозначную формулировку и вносят неоднозначность в оценку заявленного результата: «получен» - «может быть получен» (см., например, с. 12 «... на основе ...могут быть составлены ...», с. 13 «... звено ... может быть представлено ...», с. 14 «... могут быть положены ...» и др.); другие представляются декларативными без количественного подтверждения показателя (см., например, с. 33, Основные результаты и выводы, п. 2).

6. Профессор кафедры «Электронные вычислительные машины» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», д.т.н. (05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами), профессор Матвеев Юрий Николаевич дал положительный отзыв, отметив, что автором затронута проблема параллельных вычислений (стр. 28) при моделировании динамики манипуляционных систем роботов, но из текста автореферата неясно апробировал ли автор параллельные алгоритмы для моделирования динамики в реальном программно-техническом базисе.

7. Профессор кафедры вычислительной и прикладной математики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», д.т.н., доцент Пруцков Александр Викторович дал положительный отзыв, отметив замечания:

- в тексте автореферата не используется единая терминология. На стр. 11 встречается словосочетание «Разработанная методика». Что это за методика из предыдущего текста автореферата не ясно. В положении 4, выносимом на защиту, указан «Метод параметризации номинальных геометрических моделей». Далее по тексту автореферата это словосочетание не встречается. Понять, где в автореферате описан этот метод можно с трудом;

- количественные характеристики методов сняли бы сомнения в результативности этих методов. Например, насколько методология математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов сократила время интеграции роботов в автоматизированные системы управления технологических процессов.

8. Профессор кафедры «Управление и защита информации» ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта», д.т.н. (05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами), профессор Сидоренко Валентина Геннадьевна дала положительный отзыв, отметив ряд пожеланий:

- представляется неудачным наименование «Рис. 8. Концептуальная схема построения управления». Одновременно стоит заметить, что в диссертации в главе 1 формат нумерации рисунков отличается от формата, принятого в других главах.

- основу предложенной автором диссертации методологии составляет математическое моделирование. Было бы интересно понимать, могут ли и каким образом в этой методологии найти свое место широко применяемые на сегодняшний день понятия «цифровой двойник» и «цифровая тень»;

- автор опирается на такие понятия, как К-управление и Д-управление. Было бы уместно показать, существует ли связь этих понятий с традиционными для теории управления понятием ПИД-регулятора, а если существует, то какая;

- в автореферате не нашли отражения имеющиеся в диссертации результаты моделирования;

- непонятно использование фрагмента «(ММ)» в фразе на стр. 33 автореферата: «В такой постановке задача генетического программирования может формулироваться как задача поиска оптимальной объектной схемы (ММ) на основе генетического алгоритма.»;

- одним из основных инструментов достижения поставленной цели заявлено генетическое программирование, однако в автореферате ему уделено очень мало внимания, а обращение к п. 4.2. «Генетическое программирование в задачах моделирования манипуляционных систем роботов» диссертации также не позволило найти подробного представления результатов.

9. Профессор кафедры механического оборудования заводов черной металлургии им. проф. В.Я. Седуша ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», д.т.н., профессор Сотников Алексей Леонидович дал положительный отзыв, отметив замечания:

- на стр. 19 отмечается, что «Исследованы методы диагностики кинематического состояния манипуляционных систем роботов», однако в тексте не были перечислены рассмотренные методы диагностики и не приведены обобщённые результаты данных исследований;

- при этом на стр. 33, при формулировке основных результатов и выводов диссертационной работы, соискатель отмечает, что разработанные три метода калибровки центра инструмента (ТСР), два метода калибровки ориентации инструмента и три метода калибровки базы представляют из себя разработанные в ходе работы методы «самодиагностики» кинематических структур манипуляционных систем роботов. Не понятно, почему диагностика и калибровка рассматриваются соискателем, как синонимы;

- на стр. 27 указывается, что объектные схемы математических моделей представляют собой описание соответствующих математических моделей, выполненное по правилам некоторого языка объектно-ориентированного моделирования. При этом примеров такого языка не приведено.

10. Главный научный сотрудник сектора «Прикладное программное обеспечение» научно-исследовательской части ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», д.э.н., к.ф.-м.н., профессор Гатаулин Тимур Малютович дал положительный отзыв, отметив, что по данным многочисленных исследований, опубликованных иностранными авторами, экономический эффект от внедрения робототехники в действующие производства носит U-образный характер. Т.е. на начальном этапе компании внедряющие робототехнику несут существенные затраты и имеют низкую окупаемость, однако затем наблюдается существенный рост дохода, обусловленный снижением издержек, повышением производительности труда и качества выпускаемой продукции. Возможно автор не знаком с этими исследованиями. Поскольку наличие экономического эффекта от использования робототехники при автоматизации производственных процессов, по существу, является доказанным на основе многочисленных данных, и с учетом острой проблемы, связанной с необходимостью замещения иностранного оборудования, попавшего под санкционные ограничения, сделанное замечание не является критическим и не снижает практической ценности полученных автором результатов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их квалификацией, достижениями и наличием публикаций в соответствующих областях науки, и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

представлена методология создания систем управления движением манипуляционных роботов в условиях динамически изменяющейся окружающей среды;

разработаны научно-обоснованные подходы к созданию концептуальных схем математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов, позволяющие путём выделения базовых

классов в структуре данных и алгоритмов, создавать на их основе сложные математические объекты и составлять из этих объектов математические модели манипуляционных систем роботов, выполнять параллельные вычисления отдельных частей математических моделей, а также при автоматизации составления математических моделей реализовать возможность их визуального программирования. Математическое объектное моделирование открывает возможности изменения математических моделей путём модификации объектных схем, соответствующих этим математическим моделям.

научно обоснованы и экспериментально подтверждены теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, заключающееся в разработке математических моделей и методов моделирования манипуляционных роботов, позволяющих учитывать и анализировать влияние разного рода отклонений и возмущений и основывающихся на единой методологии и объектно-ориентированном подходе, составляющих основу специального математического обеспечения для решения функциональных задач управления манипуляционными роботами, как составных элементов АСУТП, реализующего параллельные вычисления и синтез управления путём реконфигурации модели управления на основе процедур самодиагностики и оптимизации;

разработана концепция адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенных на основе объектного описания их математических моделей, путём декомпозиции соответствующих математическим моделям объектных схем в результате применения генетического алгоритма, и метод структурных мутаций, позволяющий распространить возможности генетического алгоритма на задачи модификации объектных схем, соответствующих математическим моделям манипуляционных систем роботов. Использование генетического алгоритма для поиска оптимальных структур составляет основу концепции генетического программирования;

представлены методологические основы диагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов, включающие методы калибровки по положению характерной точки их конечного звена и по ориентации этого звена, а также методы калибровки базы, содержащей описание рабочего пространства манипуляционных систем, реализующие функции самодиагностики в системах управления манипуляционными роботами, позволяющими осуществлять коррекцию, возникающих в кинематических структурах роботов геометрических отклонений, и реконфигурацию систем управления, в случае возникновения существенных изменений в их кинематических структурах;

предложены способы управления манипуляционными роботами на основе использования метода параметризации номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов, представляющих собой математические модели, описывающие кинематические структуры манипуляционных систем, соответствующие их конструкторской документации, на основе первичных геометрических отклонений звеньев, вызванных неточностью изготовления и сборки деталей и узлов, составляющих звенья, а также отклонений позиционирования звеньев, возникающих в шарнирах, отличающийся тем, что параметризация номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов производится путём воздействия на них специальным модификатором, учитывающим такие геометрические отклонения.

представлены результаты цифрового моделирования управления движением манипуляционных роботов с использованием численных методов коррекции интегральных отклонений движения МС роботов, учитывающий отклонения размеров и формы звеньев (первичные геометрические отклонения), а также отклонения позиционирования звеньев, вызванные, в том числе, упругой податливостью шарниров, позволяющий на основе движения, заданного для номинальной модели робота, соответствующей данным конструкторской документации (3D-модели), получить скорректированное движение конкретного образца с учётом его первичных геометрических отклонений, определяемых современными методами измерений;

разработаны методы прогнозирования, позволяющие адаптировать управление роботом путём выбора соответствующего диапазона регулирования управляемых координат с применением моделирования линейных и угловых отклонений в динамике манипуляционных систем роботов, в кинематической структуре которых могут быть использованы шарниры с различной степенью подвижности, позволяющие определять, как упругие, так и не упругие отклонения и проводить оценку точности выполняемого движения;

разработаны методы и программное обеспечение алгоритма выполнения параллельных вычислений динамической модели манипуляционных систем роботов, с использованием матричных алгоритмов, в котором распараллеливание вычислений выполняется на нескольких уровнях, получаемых путём декомпозиции исходной динамической модели.

Теоретическая значимость исследований состоит в разработке теоретических положений, отражающих современный уровень развития АСУ манипуляционными роботами, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области моделирования робототехнических систем как объектов управления, и расширяющих возможности АСУТП, существующих в настоящее время.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

- **разработана** модель процесса функционирования автоматизированных систем управления манипуляционными роботами;
- **разработаны** научные основы и формализованные методы математического объектного моделирования функциональных задач управления манипуляционными роботами, составляющими автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП);
- **представлена** методология математического объектного моделирования манипуляционных систем роботов, позволяющей путём выделения базовых классов в структуре данных и алгоритмов, создавать на их основе сложные математические объекты и составлять из этих объектов математические модели манипуляционных систем роботов, выполнять параллельные вычисления отдельных частей математических моделей, а также при автоматизации составления математических моделей реализовать возможность их визуального программирования. Это позволяет создавать универсальные системы управления для манипуляционных роботов различных моделей, а также роботов, конструкция которых может собираться из различных модулей, в зависимости от выполнения той или иной технологической операции;
- **разработан** научно-обоснованный подход к адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенных на основе объектного описания их математических моделей, путём декомпозиции соответствующих математическим моделям объектных схем в результате применения генетического алгоритма. Описан метод структурных мутаций, позволяющий распространить возможности генетического алгоритма на задачи модификации объектных схем, соответствующих математическим моделям манипуляционных систем роботов. Метод позволяет проводить модификации объектных схем математических моделей путём замены выбранных частей схемы на альтернативные им объекты. Использование генетического алгоритма для поиска оптимальных структур составляет основу метода генетического программирования. Предложенный подход к адаптации позволяет создавать реконфигурируемые системы управления, в которых учитываются и анализируются влияния не только разного рода отклонений и возмущений, но и структурные изменения в управляемой системе;
- **разработаны** для автоматизированных систем управления манипуляционными роботами методы диагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов, включающие методы калибровки по положению характерной точки их конечного звена и по ориентации этого звена, а также методы калибровки базы, содержащей описание рабочего пространства манипуляционных систем. Методы позволяют реализовать функции самодиагностики в системах управления манипуляционными

роботами и на их основе осуществлять коррекцию, возникающих в кинематических структурах роботов геометрических отклонений, и реконфигурацию систем управления, в случае возникновения существенных изменений в их кинематических структурах;

- **разработан** метод параметризации номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов, представляющих собой математические модели, описывающие кинематические структуры манипуляционных систем, соответствующие их конструкторской документации, на основе первичных геометрических отклонений звеньев, вызванных неточностью изготовления и сборки деталей и узлов, составляющих звенья, а также отклонений позиционирования звеньев, возникающих в шарнирах. Метод отличается тем, что параметризация номинальных геометрических моделей манипуляционных систем роботов производится путём воздействия на них специальным модификатором, учитывающим такие геометрические отклонения;

- **разработан** численный метод коррекции интегральных отклонений движения манипуляционных систем роботов, учитывающего отклонения размеров и формы звеньев (первичные геометрические отклонения), а также отклонения позиционирования звеньев, вызванные, в том числе, упругой податливостью шарниров. Метод позволяет на основе движения, заданного для номинальной модели робота, соответствующей данным конструкторской документации (3D-модели), получить скорректированное движение конкретного образца с учётом его первичных геометрических отклонений, определяемых современными методами измерений;

- **разработан** метод моделирования манипуляционных систем с упругими шарнирами при малых деформациях, возникающих в направлении изменения основных обобщённых координат, отвечающих за программные движения манипуляционных роботов. Метод позволяет разделить вычисления медленно изменяющихся квазистатических упругих отклонений и высокочастотных упругих колебаний;

- **разработан** комплекс новых эффективных методов моделирования линейных и угловых отклонений в динамике манипуляционных систем роботов, в кинематической структуре которых могут быть использованы шарниры с различной степенью подвижности, позволяющие определять, как упругие, так и не упругие отклонения и проводить оценку точности выполняемого движения. На основе использования данных методов может быть получен прогноз, позволяющий адаптировать управление роботом путём выбора соответствующего диапазона регулирования управляемых координат;

- **разработан** алгоритм параллельных вычислений динамической модели манипуляционных систем роботов, с использованием матричных алгоритмов, в котором распараллеливание вычислений выполняется на нескольких уровнях, получаемых путём декомпозиции исходной динамической модели;

- **обоснована** возможность применения метода генетического программирования при разработке программно-математического обеспечения для анализа манипуляционных систем роботов и синтеза новых манипуляционных систем.

Достоверность полученных в работе результатов обусловлена применением классических положений теории автоматического управления, строгостью математической постановки задач и подтверждается сопоставлением результатов теоретических исследований с результатами моделирования на многочисленных тестовых примерах, а также с результатами, полученными на основе методов, разработанных другими авторами.

Практическая значимость полученных соискателем результатов заключается в следующем:

разработанная методология позволит создавать универсальные системы управления манипуляционными роботами различных моделей, а также роботами, конструкция которых может собираться из различных модулей, в зависимости от выполнения той или иной технологической операции;

заложены принципы разработки перспективной системы управления, которая позволит выполнять адаптацию к существенно изменяющимся внешним условиям путём учёта не только возмущающих факторов, но и путём изменения структуры самой управляемой модели. При этом структурная адаптация будет осуществлять предварительную грубую настройку к изменившимся условиям, а последующая параметрическая адаптация - выполнять окончательную тонкую настройку. Такая система управления позволит обеспечить управление роботами-трансформерами, в которых изменение кинематической структуры может выполняться не только на основе заранее подготовленных вариантов, но и случайным образом. При этом должны быть выполнены процедуры самодиагностики и калибровки. Это позволит получить необходимые данные о новой структуре робота и с учётом этих данных модифицировать управляемую модель;

разработанные в диссертации объектно-ориентированные методы моделирования могут обеспечить решение задачи синтеза оптимальных структур МС роботов на основе использования генетического алгоритма, представляющего собой стохастический метод оптимизации, реализованный по аналогии с эволюционными процессами, протекающими в природе. В генетическом алгоритме, виртуально реализующем эволюционный процесс, изменения, происходящие в сотне поколений, протекают за доли секунд. Использование генетического алгоритма в адаптивной системе управления позволит определять кинематическую структуру МС робота, наиболее подходящую для выполнения конкретной задачи.

разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать кинематику и динамику манипуляционных роботов и решать на основе получаемых моделей различные прикладные задачи, например, определять разного рода отклонения и проводить оценку точности выполняемых движений.

составлены динамические модели некоторых промышленных роботов, на основе которых могут создаваться модели робототехнических комплексов, разрабатываться системы автоматического управления движением роботов и их совместным взаимодействием.

разработанные модели и методы могут быть использованы в организации образовательных процессов при подготовке бакалавров и магистров по профильным направлениям, таким как, например, «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах» и «Мехатроника и робототехника».

Результаты диссертационных исследований внедрены и используются компанией ООО «ТД Русская броня» (ТМ АМОТЕК), специализирующейся на автоматизации и роботизации предприятий пищевой промышленности, располагающей научно-исследовательской лабораторией робототехники, собственным конструкторским бюро и производственными мощностями, группой компаний «Черкизово», являющейся крупнейшим производителем мясной продукции в России, а также Холдингом «Объединенные кондитеры», включающим 18 крупных кондитерских предприятий по всей России («Красный Октябрь», «Рот Фронт», «Бабаевская» и др.). На основе изданных автором монографий разработаны и внедрены в учебные процессы конспекты лекций и методические указания в университетах ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» на кафедре «Автоматизированные технологические системы» и в ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» на кафедре «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами».

Представленные в диссертации и автореферате результаты являются обобщением научных исследований, проведенных **лично автором** в период с 2014 по 2023 гг. Опубликованные автором статьи содержат ссылки по тематике его диссертационных исследований на работы других авторов, опубликованные в течении последних пяти лет. Это убеждает в хорошей апробированности результатов диссертационной работы и высокой актуальности проведенных исследований, что подтверждается также высокой цитируемостью работ автора.

На заседании 28 декабря 2023 г. Диссертационный совет принял решение присудить Крахмалеву О.Н. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 11 докторов наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, и 1 кандидат наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 9, против 1, недействительных бюллетеней 2.

Председатель

Диссертационного Совета

24.2.334.01 (Д 212.148.02)



Благовещенская Маргарита Михайловна

Ученый секретарь

Диссертационного Совета

24.2.334.01 (Д 212.148.02)

Мокрушин Сергей Александрович

29 декабря 2023 г.