

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№3(23)
2023

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

Выходит 4 раза в год

ISSN 2658-4727

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И
ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-
ПРИБОРОСТРОЕНИИ**
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Севастополь, 2023

Главный редактор

Копп В.Я., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Заместитель главного редактора

Филипович О.В., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Научный редактор

Бохонский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Ответственный секретарь

Балакин А.И., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Варганов М.В., д.т.н., проф.

(г. Москва)

Греков Н.А., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Доронина Ю.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Жмудь В.А., д.т.н., проф.,

(г. Новосибирск)

Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Моисеев Д.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Песчанский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Петрешин Д.И., д.т.н., проф.

(г. Брянск)

Прейс В.В., д.т.н., проф.

(г. Тула)

Щенятский А.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н., доц

(г. Севастополь)

Майстришин М.М., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Рапацкий Ю.Л., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Прейс В.В.** Моделирование надежности роторной системы автоматической загрузки с нагруженным резервом при ненадежном переключателе 3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Асанов А.З., Веркнер А.С.** Моделирование динамики подвески большегрузного автомобиля в процессе преодоления препятствий 11
- Кабанов А.А.** Выбор параметризации матриц нелинейной системы для методов state-dependent управления 23
- Оглоблин Д.И., Трудоношин В.А., Князева С.Ю.** Сквозное проектирование цифрового приемника в simulink 38
- Моисеев Д.В., Шокин А.Г.** Математическая модель оптимизации информационной логистики 50
- Бохонский А.И., Чалая Е.С.** Методы сопротивления материалов в модели токарной обработки нежесткого вала 63

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Крамарь В.А., Крамарь О.А., Кабанов А.А.** Контроль самостолкновения манипуляторов на основе решения задачи классификации с помощью нейронной сети 71
- Васютенко А.П., Балакин А.И.** Роботизированный самоподнастраивающийся измерительный модуль 84
- Филипович О.В.** Модель процесса одновариантной однопараметрической селективной сборки двух элементов с учетом погрешностей измерения при их сортировке 93

Подписной индекс сборника 85768 по интернет-каталогу «Пресса России».

Научный журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ производствами (технические науки);

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды производствами (технические науки);

2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 610:641

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ С НАГРУЖЕННЫМ РЕЗЕРВОМ ПРИ НЕНАДЕЖНОМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕ

Прейс В.В.

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования надежности роторной системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в автоматические роторные линии, резервированной (методом замещения) с нагруженным резервом, при ненадежном механическом переключателе подсистемы управления отказом от питания рабочих позиций. На основе теории графов разработаны аналитические модели, позволяющие на стадии проектирования дать сравнительную оценку коэффициентов готовности роторных систем автоматической загрузки для стратегий обслуживания с накоплением отказов рабочих позиций. Установлено предельное значение вероятности отказа механического переключателя, выше которого резервирование роторной системы автоматической загрузки становится неэффективным.

Ключевые слова. Роторная система автоматической загрузки, штучный предмет обработки, автоматическая роторная линия, методы резервирования замещением, нагруженный резерв, надежность, моделирование, коэффициент готовности.

Введение. Роторные системы автоматической загрузки (САЗ), применяемые для загрузки в автоматические роторные линии (АРЛ) с производительностью от 300 до 1200 шт./мин штучных предметов обработки, представляющих собой осесимметричные тела вращения (классы 71-72 по классификатору ЕСКД), имеют в своей структуре подсистему управления отказом от питания рабочих позиций [1,2].

Подсистема управления отказом от питания рабочих позиций роторной САЗ состоит из механических переключателей, установленных на рабочих позициях роторной САЗ, электромеханического устройства для управления переключателями, установленного стационарно вне роторной САЗ, и электронного блока управления с датчиками наличия (отсутствия) загружаемых предметов обработки на выходе роторной САЗ [3].

Наличие подсистемы управления отказом от питания рабочих позиций роторной САЗ особенно важно в АРЛ для сборки многоэлементных изделий, в которых установлено несколько роторных

САЗ по числу собираемых элементов, поскольку автоматическое управление отказом от питания рабочих позиций АРЛ последующими собираемыми элементами при отсутствии в них предыдущих (вследствие отказа соответствующих роторных САЗ) обеспечивает минимизацию потерь комплектующих элементов при сборке [4].

Применение роторных САЗ в АРЛ для сборки многоэлементных изделий предъявляет повышенные требования к их надежности. Существенное повышение надежности роторных САЗ, применяемых в сборочных АРЛ, возможно на основе создания систем, резервированных методами замещения с ненагруженным или нагруженным резервом [5,6].

В работах автора [7-9] на основе теории графов были построены аналитические модели надежности резервированных роторных САЗ при условии, что механические переключатели подсистемы управления питанием рабочих позиций САЗ имеют абсолютную надежность. Практика же эксплуатации резервированных роторных САЗ в структуре АРЛ для сборки многоэлементных изделий показала, что в действительности имеют место отказы механических переключателей, которые приводят к росту потерь комплектующих элементов при сборке.

В данной статье рассматриваются аналитические модели надежности резервированной роторной САЗ с нагруженным резервом для стратегий обслуживания с накоплением отказов рабочих позиций и с учетом возможных отказов механических переключателей подсистемы управления питанием рабочих позиций САЗ.

Модели надежности роторной САЗ с нагруженным резервом при различных стратегиях обслуживания. Модель надежности резервированной роторной САЗ для стратегии обслуживания с накоплением отказов при достижении суммарного числа отказавших рабочих позиций $k=2$ может быть представлена в виде замкнутого графа состояний (Рис.1).

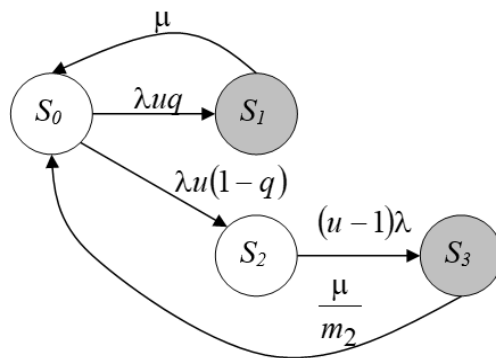


Рис.1 – Граф состояний роторной САЗ с нагруженным резервом при достижении суммарного числа отказавших позиций $k=2$

Предположим, что время срабатывания переключателя мало по сравнению с наработкой на отказ одной рабочей позиции. Состояние системы: S_0 – все позиции роторной САЗ работоспособны; S_1 – происходит отказ одной из рабочих позиций и переключателя, при этом происходит отказ в выдаче загружаемого элемента; S_2 – происходит отказ в одной из рабочих позиций, но переключатель срабатывает, отказ в выдаче загружаемого элемента не происходит; S_3 – происходит отказ в любой из работающих позиций, при этом на выходе САЗ может появиться отказ в выдаче загружаемого элемента, если отказавшая позиция входит в пересекающийся маршрут с ранее отказавшей позицией САЗ. Если отказавшая позиция не входит в пересекающийся маршрут, то отказа на выходе САЗ нет, но суммарное число отказов достигло двух и САЗ останавливается на ремонтное обслуживание. Интенсивности отказов и восстановлений показаны на соответствующих ветвях графов.

Составим матрицу переходов системы из одного состояния в другое и решая ее для установившегося режима, получим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -u\lambda P_0 + \mu P_1 + \frac{\mu P_3}{m_2}; \\ 0 = u\lambda q P_0 - \mu P_1; \\ 0 = u\lambda(1-q) - (u-1)\lambda P_2; \\ 0 = (u-1)\lambda P_2 - \frac{\mu P_3}{m_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где $P_0, \dots, P_3$ – предельные состояния нахождения резервированной роторной САЗ в состояниях $S_0, \dots, S_3$; u – число рабочих позиций САЗ; λ – интенсивность отказа одной рабочей позиции, с^{-1} ; μ – интенсивность восстановления одной рабочей позиции, с^{-1} ; m_2 – коэффициент совмещения восстановлений для двух отказавших рабочих позиций; q – вероятность отказа механического переключателя.

Решением системы уравнений (1) с учетом условия нормировки $\sum_{i=0}^3 P_i = 1$ будут величины предельных вероятностей P_i нахождения резервированной роторной САЗ в состояниях $S_i (i = 0, \dots, 3)$. Коэффициент сохранения производительности резервированной роторной САЗ эквивалентен коэффициенту готовности при отсутствии потерь загружаемых элементов в момент их передачи из выдающего устройства

роторной САЗ в транспортное устройство АРЛ, что при использовании транспортного конвейера практически допустимо.

Коэффициент сохранения производительности роторной САЗ с нагруженным резервом для значения суммарного числа отказавших рабочих позиций $k=2$ равен сумме предельных вероятностей P_0, P_2 нахождения ее в состояниях S_0, S_2 :

$$K_{c(k=2)} = \frac{1}{1 + \frac{q + (1-q)m_2 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right) u}{1 + \frac{u(1-q)}{u-1}}} \quad (2)$$

Аналитическая модель надежности резервированной роторной САЗ для стратегии обслуживания с накоплением отказов при достижении суммарного числа отказавших позиций $k=3$ может быть представлена в виде замкнутого графа состояний (**Рис.2**).

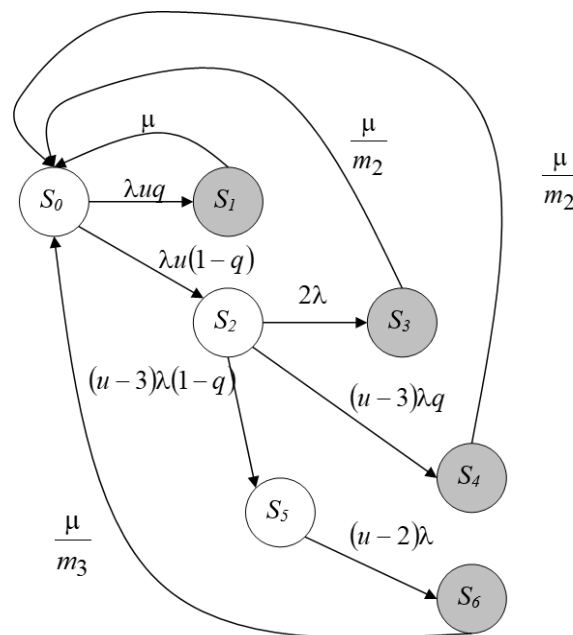


Рис.2 – Граф состояний роторной САЗ с нагруженным резервом для суммарного числа отказавших рабочих позиций $k=3$

Состояние системы: S_0 – все позиции роторной САЗ работоспособны; S_1 – происходит отказ рабочей позиции и переключателя, при этом происходит отказ в выдаче загружаемого элемента; S_2 – происходит отказ в одной из рабочих позиций, а переключатель срабатывает, поэтому отказ в выдаче загружаемого элемента не

происходит; S_3 – происходит отказ в одной из двух рабочих позиций, входящих в пересекающиеся маршруты с ранее отказавшей позицией, что приводит к появлению отказа в выдаче загружаемого элемента на выходе роторной САЗ и она останавливается на ремонтное обслуживание; S_4 – происходит отказ в одной из рабочей позиции и отказ переключателя, поэтому происходит отказ в выдаче загружаемого элемента; S_5 – происходит отказ в любой из рабочих позиций, не входящих в пересекающиеся маршруты, а переключатель срабатывает, поэтому на выходе САЗ отказов в выдаче элемента нет; S_6 – происходит отказ в любой из позиций, не входящих в пересекающиеся маршруты, однако суммарное число отказавших рабочих позиций достигло трех и САЗ останавливается на ремонтное обслуживание.

Составляя матрицу переходов системы из одного состояния в другое и решая ее для установившегося режима, получим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda u P_0 + \mu P_1 + \frac{\mu}{m_2} P_3 + \frac{\mu}{m_2} P_4 + \frac{\mu}{m_2} P_6; \\ 0 = \lambda u q P_0 - \mu P_1; \\ 0 = \lambda u (1 - q) P_0 - [2\lambda + (u - 3)\lambda] P_2; \\ 0 = 2\lambda P_2 - \frac{\mu}{m_2} P_3; \\ 0 = (u - 3)\lambda q P_2 - \frac{\mu}{m_2} P_4; \\ 0 = (u - 3)\lambda (1 - q) P_2 - (u - 2)\lambda P_5; \\ 0 = (u - 2)\lambda P_5 - \frac{\mu}{m_3} P_6, \end{cases} \quad (3)$$

где m_3 – коэффициент совмещения восстановлений для трех отказавших рабочих позиций САЗ.

Решением системы уравнений (3) с учетом условия нормировки $\sum_{i=0}^6 P_i = 1$ будут величины предельных вероятностей P_i нахождения резервированной роторной САЗ в состояниях $S_i (i = 0, \dots, 6)$.

Коэффициент сохранения производительности роторной САЗ с нагруженным резервом для значения суммарного числа отказавших рабочих позиций $k = 3$ равен сумме предельных вероятностей P_0, P_2, P_5 нахождения ее в состояниях S_0, S_2, S_5

$$K_{c(k=3)} = \frac{1}{1 + \frac{[2 + (u-3)q]m_2 + (u-3)(1-q)m_3 + \frac{u-1}{1-q}q \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^u}{\frac{u-1}{1-q} + \left[1 + \frac{(u-3)(1-q)}{u-2}\right]u}}. \quad (4)$$

В работе [10] была рассмотрена аналитическая модель надежности резервированной роторной САЗ с нагруженным резервом при ненадежном переключателе для стратегии обслуживания с накоплением отказов при достижении суммарного числа отказавших позиций $k=4$, однако проведенный анализ показал неэффективность данной стратегии.

Заключение. Сравнительный анализ коэффициентов сохранения производительности (2), (4) роторной САЗ с нагруженным резервом и ненадежным переключателем для суммарного числа отказавших позиций $k=2, 3$ и различных значений параметра надежности (λ/μ) одной рабочей позиции САЗ показал, что:

1. Так же как и в случае надежного переключателя граничные значения коэффициентов совмещения восстановлений, при которых резервирование достаточно эффективно: $m_2 \leq 1,25$; $m_3 \leq 1,5$.

2. При указанных граничных значениях коэффициентов совмещения восстановлений более эффективна стратегия обслуживания для $k=3$.

3. Снижение коэффициента сохранения производительности резервированной роторной САЗ с учетом возможных отказов механического переключателя подсистемы управления отказом от питания рабочих позиций по сравнению с резервированной роторной САЗ, имеющей абсолютно надежный переключатель, может достигать 20 %.

4. Величина вероятности отказа механического переключателя $q=0,3$ является предельным значением, выше которого резервирование роторной САЗ методом замещения с нагруженным резервом становится неэффективным.

Библиографический список

1. Прейс В.В. Роторные системы автоматической загрузки штучных предметов обработки / В.В. Прейс // Автоматизация и современные технологии. – 2002. – №9. – С. 3-8.
2. Прейс В.В. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в роторные и роторно-конвейерные линии / В.В. Прейс // Вестник машиностроения. – 2002. – № 12. – С. 16-19.
3. Авт. свид. № 872191 SU. МПК³ B23Q 7/02/ Роторный автомат питания: № 2844654/25-08: заявл. 29.11.1979: опубл. 15.10.1981 /

-
- В.В. Прейс. – 4 с.: ил. – Текст: непосредственный.
4. Прейс, В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий / В.В. Прейс // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 10. – С. 17-22.
 5. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
 6. Сугак Е. Надёжность техники. Часть 1. Теоретические основы / Е. Сугак. – ИД «LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co», 2014. – 408 с.
 7. Прейс В.В. Резервирование систем автоматической загрузки роторных и роторно-конвейерных линий / В.В. Прейс // Кузнечно-штамп. пр-во. – 1990. – № 6. – С. 18-21.
 8. Прейс В.В. Резервированные роторные системы автоматической загрузки штучных предметов обработки / В.В. Прейс // Известия Тульского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2000. – № 5. – С. 248-257.
 9. Прейс В.В. Моделирование надежности резервированных роторных систем автоматической загрузки штучных предметов обработки / В.В. Прейс // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2022. – №2(18). – С. 52-62.
 10. Прейс В.В. Надежность роторных систем автоматической загрузки / В.В. Прейс. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 120 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Prejs V.V. Rotornye sistemy avtomaticheskoy zagruzki shtuchnyh predmetov obrabotki / V.V. Prejs // Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii. – 2002. – №9. – S. 3-8.
2. Prejs V.V. Sistemy avtomaticheskoy zagruzki shtuchnyh predmetov obrabotki v rotnnye i rotnno-konvejernye linii / V.V. Prejs // Vestnik mashinostroeniya. – 2002. – № 12. – S. 16-19.
3. Avt. svid. № 872191 SU. MPK3 B23Q 7/02/ Rotornyj avtomat pitaniya: № 2844654/25-08: zayavl. 29.11.1979: opubl. 15.10.1981 / V.V. Prejs. – 4 s.: il. – Tekst: neposredstvennyj.
4. Prejs, V.V. Nadezhnost' avtomaticheskikh rotnno-konvejernyh linii dlya sborki mnogielementnyh izdelij / V.V. Prejs // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2003. – № 10. – S. 17-22.
5. Polovko A.M. Osnovy teorii nadezhnosti / A.M. Polovko, S.V. Gurov. – SPb.: BHV-Peterburg, 2006. – 702 s.
6. Sugak E. Nadyozhnost' tekhniki. CHast' 1. Teoreticheskie osnovy / E. Sugak. – ID «LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co», 2014. – 408 s.

7. Prejs V.V. Rezervirovanie sistem avtomaticheskoy zagruzki rotornyh i rotno-konvejnyh linij / V.V. Prejs // Kuznechno-shtamp. pr-vo. – 1990. – № 6. – С. 18-21.
8. Prejs V.V. Rezervirovannye rotornye sistemy avtomaticheskoy zagruzki shtuchnyh predmetov obrabotki / V.V. Prejs // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie. – 2000. – № 5. – С. 248-257.
9. Prejs V.V. Modelirovanie nadezhnosti rezervirovannyh rotornyh sistem avtomaticheskoy zagruzki shtuchnyh predmetov obrabotki / V.V. Prejs // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2022. – №2(18). – С. 52-62.
10. Prejs V.V. Nadezhnost' rotornyh sistem avtomaticheskoy zagruzki / V.V. Prejs. – Tula: Izd-vo TulGU, 2012. – 120 s.

Пре́йс Владимир Викторович, д.т.н., профессор, работа-preys@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

SIMULATION OF THE RELIABILITY OF A ROTOR AUTOMATIC FEEDING SYSTEM WITH A LOADED RESERVE WITH AN UNRELIABLE SWITCH

V.V. Prejs

The article deals with the issues of modeling the reliability of a rotor automatic feeding system for automatic loading of piece processing items into automatic rotor lines, backed up by the replacement method with a loaded reserve, with an unreliable mechanical switch of the power failure subsystem of working positions. Based on graph theory, analytical models have been developed that allow at the design stage to give a comparative assessment of the availability coefficients of rotor automatic feeding systems for maintenance strategies with the accumulation of failures of working positions. The limit value of the probability of failure of the mechanical switch has been established, above which the redundancy of the rotor automatic feeding system becomes ineffective.

Keywords: rotor automatic feeding system, piece processing item, automatic rotor line, replacement redundancy methods, unloaded reserve, loaded reserve, reliability, modeling, availability factor.

Preis Vladimir Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, , работа-preys@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 681.5.015.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОДВЕСКИ БОЛЬШЕГРУЗНОГО АВТОМОБИЛЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ

Асанов А.З.¹, Веркнер А.С.²

Аннотация. Разработана математическая числовая модель четырёхточечной подвески большегрузного автомобиля. Проведено численное моделирование работы подвески автомобиля при наездах колеса на различные дорожные препятствия. Дан спектральный анализ реакций поддрессоренных масс автомобиля. Результаты исследований могут быть использованы при разработке и испытаниях систем управления подвеской автомобиля, а также в учебно-методических целях.

Ключевые слова. Математическая модель, четырехточечная подвеска, компьютерная модель, спектральный анализ, переходные характеристики.

Введение. Одной из важнейших подсистем автомобиля является ее подвеска, призванная накапливать и рассеивать энергию, нацеленная на достижение определенного уровня компромисса между несущей способностью, управляемостью на дороге и комфортом езды [1]. Пассивная система подвески, состоящая, как правило, из пружины и демпфера, накапливает энергию через пружину и рассеивает ее через демпфер, чем и достигается приемлемое соотношение между жесткостью конструкции, управляемостью на дороге и комфортом езды [2,3]. Активная подвеска автомобиля способна накапливать, подавать и рассеивать энергию в системе подвески в зависимости от условий эксплуатации через изменение параметров подвески. Система активной подвески собирает информацию о рабочих режимах и условиях работы системы и управляет своими параметрами для улучшения работы системы подвески [4].

Система активной подвески, состоящая из исполнительного механизма, соответствующих датчиков и блока управления, создает воздействия на систему подвески, регулирующие свойства активной подвески в соответствии с изменениями в режиме реального времени дорожных данных и состояния транспортного средства, тем самым максимально устраняя влияние дороги на транспортное средство.

В последние годы для управления системой активной подвески было предложено большое число различных стратегий (алгоритмов) управления,

такие как адаптивное управление, нечеткое управление, управление H_∞ и оптимальное управление [5-8]. В них, как правило, рассматриваются режимы настройки параметров и алгоритмов управления активной подвески для некоторых обобщенных (усредненных) условия дорожной обстановки и применительно к одноточечной модели (Quarter-Car Model) подвески автомобиля. Вместе с тем представляет интерес управление параметрами подвески не только для усредненных условий, но и для случаев возникновения резко выделяющихся препятствий движения. Это весьма актуально для обеспечения движения большегрузных автомобилей (БГА) и, особенно, для транспорта специального назначения.

Другой перспективной задачей является конструирование многосвязной системы управления [9] активной подвеской БГА, учитывающей взаимовлияние всех входных воздействий (препятствия, воздействующие на все четыре колеса БГА) на все точки опоры платформы БГА. Для большегрузных автомобилей и аналогичных транспортных средств – это очевидная особенность системы. Для решения этих задач необходимы соответствующие математические (компьютерные) модели объекта управления (транспортной платформы).

Целью данной работы является построение и исследование модели четырёхточечной подвески транспортного средства на примере большегрузного автомобиля для решения задачи синтеза управления адаптивной подвеской. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что подобные транспортные средства – платформы могут быть специализированы для решения самых различных задач с различными требованиями по скорости и устойчивости движения, плавности хода, по допустимым продольным или поперечным – вертикальным перегрузкам и т.д.

Математическая (вибрационная) модель платформы при четырёхточечной подвеске. При использовании методологии математического моделирования объектов и систем управления [10] для построения математической вибрационной модели платформы БГА при четырёхточечной подвеске были приняты следующие допущения:

1. Транспортная платформа (кузов автомобиля) – твердое тело, имеющее продольную плоскость симметрии, т.е. деформации рамы не учитываются;
2. Контакт колес (шин) с дорогой постоянный и точечный;
3. Колебания платформы и колес малые;
4. Движение транспортного средства прямолинейное и равномерное;
5. Силы сопротивления качению и сопротивления воздуха не учитываются;

6. Массы передних колес $m_1 = m_2 = m_f$, массы задних колес $m_3 = m_4 = m_r$;
7. Демпфирование шин не учитываются, т.к. оно незначительно в сравнении с демпфированием подвески;
8. Подвески правого и левого колес зеркальные, совпадающие по жёсткости и демпфированию.

Общая вибрационная модель транспортного средства называется полной моделью автомобиля. Такая модель, показанная на **Рис.1**, включает в себя вертикальное перемещение кузова x , крен кузова ϕ , тангаж кузова θ , отклонения колес x_1, x_2, x_3 и x_4 и независимые дорожные кинематические возбуждения y_1, y_2, y_3 , и y_4 .

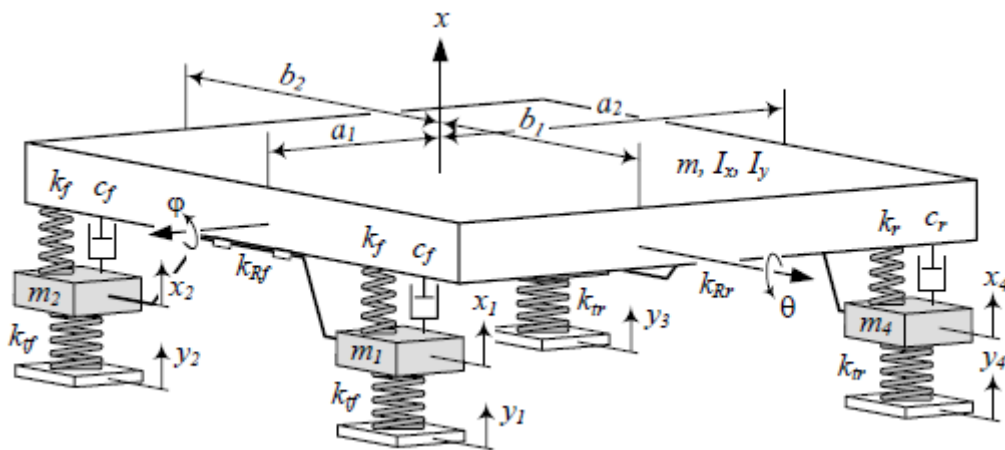


Рис.1 – Четырёхточечная модель платформы

Моменты инерции

$$I_x = mb_1b_2, \quad I_y = ma_1a_2,$$

I_x – продольный момент инерции массы, I_y – поперечный момент инерции массы, m – масса кузова, a_1 – расстояние от центра тяжести автомобиля до передней оси, a_2 – расстояние от центра тяжести автомобиля до задней оси, b_1 – расстояние от центра тяжести автомобиля до левого борта, b_2 – расстояние от центра тяжести автомобиля до правого борта.

Жесткость передних и задних шин k_{f1} и k_{tr} соответственно. Подвеска автомобиля имеет жесткость k_f и демпфирование c_f в передней части и жесткость k_r и демпфирование c_r в задней части.

Полная вибрационная модель поддресоренной части платформы с четырёхточечной подвеской имеет семь степеней свободы (в системе координат: вертикальное перемещение, угол крена, угол тангажа) и может

быть описана следующими уравнениями, полученными на основе общих теорем динамики системы:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + c_f(\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) + c_f(\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) + \\
 + c_r(\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1\dot{\varphi} + a_2\dot{\theta}) + \\
 + c_r(\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2\dot{\varphi} + a_2\dot{\theta}) + k_f(x - x_1 + b_1\varphi - a_1\theta) + \\
 + k_f(x - x_2 - b_2\varphi - a_1\theta) +
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 + k_r(x - x_3 - b_1\varphi + a_2\theta) + k_r(x - x_4 + b_2\varphi + a_2\theta) = 0, \\
 I_x\ddot{\varphi} + b_1c_f(\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) - b_2c_f(\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) - \\
 - b_1c_r(\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1\dot{\varphi} + a_2\dot{\theta}) + \\
 b_2c_r(\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2\dot{\varphi} + a_2\dot{\theta}) + b_1k_f(x - x_1 + b_1\varphi - a_1\theta) - \\
 - b_2k_f(x - x_2 - b_2\varphi - a_1\theta) -
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 b_1k_r(x - x_3 - b_1\varphi + a_2\theta) + b_2k_r(x - x_4 + b_2\varphi + a_2\theta) = 0, \\
 I_y\ddot{\theta} - a_1c_f(\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) - a_1c_f(\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) + \\
 + a_2c_r(\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1\dot{\varphi} + a_2\dot{\theta}) \\
 + a_2c_r(\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2\dot{\varphi} + a_2\dot{\theta}) - a_1k_f(x - x_1 + b_1\varphi - a_1\theta) - \\
 - a_1k_f(x - x_2 - b_2\varphi - a_1\theta) +
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 + a_2k_r(x - x_3 - b_1\varphi + a_2\theta) + a_2k_r(x - x_4 + b_2\varphi + a_2\theta) = 0, \\
 m_f\ddot{x}_1 - c_f(\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) - k_f(x - x_1 + b_1\varphi - a_1\theta) + \\
 + k_{t_f}(x_1 - y_1) = 0,
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 m_f\ddot{x}_2 - c_f(\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2\dot{\varphi} - a_1\dot{\theta}) - k_f(x - x_2 - b_2\varphi - a_1\theta) + \\
 + k_{t_f}(x_2 - y_2) = 0,
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 m_r\ddot{x}_3 - c_r(\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1\dot{\varphi} + a_2\dot{\theta}) - k_r(x - x_3 - b_1\varphi + a_2\theta) + \\
 + k_{t_r}(x_3 - y_3) = 0,
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$m_r \ddot{x}_4 - c_r (\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2 \dot{\varphi} + a_2 \dot{\theta}) - k_r (x - x_4 + b_2 \varphi + a_2 \theta) + k_{tr} (x_4 - y_4) = 0 \quad (7)$$

Математические преобразования и введение замен переменных позволяют представить математическую модель подвески в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{-2c_f - 2c_r}{m} x_2 + \frac{-c_f b_1 + c_f b_2 + c_r b_1 - c_r b_2}{m} \varphi_2 + \frac{2c_f a_1 - 2c_r a_2}{m} \theta_2 + \\ &+ \frac{c_f}{m} x_{12} + \frac{c_f}{m} x_{22} + \frac{c_r}{m} x_{32} + \frac{c_r}{m} x_{42} + \frac{-2k_f - 2k_r}{m} x_1 + \\ &+ \frac{-k_f b_1 + k_f b_2 + k_r b_1 - k_r b_2}{m} \varphi_1 + \frac{2k_f a_1 - 2k_r a_2}{m} \theta_1 + \\ &+ \frac{k_f}{m} x_{11} + \frac{k_f}{m} x_{21} + \frac{k_r}{m} x_{31} + \frac{k_r}{m} x_{41}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1 &= \varphi_2 \\ \dot{\varphi}_2 &= \left(\frac{-c_f + c_r}{mb_2} + \frac{c_f - c_r}{mb_1} \right) x_2 + \left(\frac{-c_f b_1 - c_r b_1}{mb_2} + \frac{-c_f b_2 - c_r b_2}{mb_1} \right) \varphi_2 + \\ &+ \left(\frac{c_f a_1 + c_r a_2}{mb_2} + \frac{-c_f a_1 - c_r a_2}{mb_1} \right) \theta_2 + \frac{c_f}{mb_2} x_{12} - \frac{c_f}{mb_1} x_{22} - \frac{c_r}{mb_2} x_{32} + \\ &+ \frac{c_r}{mb_1} x_{42} + \left(\frac{-k_f + k_r}{mb_2} + \frac{k_f - k_r}{mb_1} \right) x_1 + \left(\frac{-k_f b_1 - k_r b_1}{mb_2} + \frac{-k_f b_2 - k_r b_2}{mb_1} \right) \varphi_1 + \\ &+ \left(\frac{k_f a_1 + k_r a_2}{mb_2} + \frac{-k_f a_1 - k_r a_2}{mb_1} \right) \theta_1 + \frac{k_f}{mb_2} x_{11} - \frac{k_f}{mb_1} x_{21} - \frac{k_r}{mb_2} x_{31} + \frac{k_r}{mb_1} x_{41}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \theta_2, \\ \dot{\theta}_2 &= \left(\frac{2c_f}{ma_2} - \frac{2c_r}{ma_1} \right) x_2 + \left(\frac{c_f b_1 - c_f b_2}{ma_2} + \frac{c_r b_1 - c_r b_2}{ma_1} \right) \varphi_2 + \\ &+ \left(\frac{-2c_f a_1}{ma_2} - \frac{2c_r a_2}{ma_1} \right) \theta_2 - \frac{c_f}{ma_2} x_{12} - \frac{c_f}{ma_2} x_{22} + \frac{c_r}{ma_1} x_{32} + \\ &+ \frac{c_r}{ma_1} x_{42} + \left(\frac{2k_f}{ma_2} - \frac{2k_r}{ma_1} \right) x_1 + \left(\frac{k_f b_1 - k_f b_2}{ma_2} + \frac{k_r b_1 - k_r b_2}{ma_1} \right) \varphi_1 + \\ &+ \left(\frac{-2k_f a_1}{ma_2} - \frac{2k_r a_2}{ma_1} \right) \theta_1 - \frac{k_f}{ma_2} x_{11} - \frac{k_f}{ma_2} x_{21} + \frac{k_r}{ma_1} x_{31} + \frac{k_r}{ma_1} x_{41}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{11} &= x_{12}, \\
 \dot{x}_{12} &= \frac{c_f}{m_f} x_2 - \frac{c_f}{m_f} x_{12} + \frac{c_f b_1}{m_f} \varphi_2 - \frac{c_f a_1}{m_f} \theta_2 + \frac{k_f}{m_f} x_1 + \frac{-k_f - k_{tf}}{m_f} x_{11} + \\
 &\quad + \frac{k_f b_1}{m_f} \varphi_1 - \frac{k_f a_1}{m_f} \theta_1 + \frac{k_{tf}}{m_f} y_1, \\
 \dot{x}_{21} &= x_{22},
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{22} &= \frac{c_f}{m_f} x_2 - \frac{c_f}{m_f} x_{22} - \frac{c_f b_2}{m_f} \varphi_2 - \frac{c_f a_1}{m_f} \theta_2 + \frac{k_f}{m_f} x_1 + \frac{-k_f - k_{tf}}{m_f} x_{21} - \\
 &\quad - \frac{k_f b_2}{m_f} \varphi_1 - \frac{k_f a_1}{m_f} \theta_1 + \frac{k_{tf}}{m_f} y_2, \\
 \dot{x}_{31} &= x_{32},
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{32} &= \frac{c_r}{m_r} x_2 - \frac{c_r}{m_r} x_{32} - \frac{c_r b_1}{m_r} \varphi_2 + \frac{c_r a_2}{m_r} \theta_2 + \frac{k_r}{m_r} x_1 + \\
 &\quad + \frac{-k_r - k_{tr}}{m_r} x_{31} - \frac{k_r b_1}{m_r} \varphi_1 + \frac{k_r a_2}{m_r} \theta_1 + \frac{k_{tr}}{m_r} y_3, \\
 \dot{x}_{41} &= x_{42},
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{42} &= \frac{c_r}{m_r} \dot{x}_2 - \frac{c_r}{m_r} \dot{x}_{42} + \frac{c_r b_2}{m_r} \dot{\varphi}_2 + \frac{c_r a_2}{m_r} \dot{\theta}_2 + \frac{k_r}{m_r} x_1 + \\
 &\quad + \frac{-k_r - k_{tr}}{m_r} x_{41} + \frac{k_r b_2}{m_r} \varphi_1 + \frac{k_r a_2}{m_r} \theta_1 + \frac{k_{tr}}{m_r} y_4.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Вибрационная модель платформы БГА при четырехточечной подвеске. Исходными данными для численного моделирования взяты технические характеристики и параметры БГА класса КамАЗ-5490 [11].

На **Рис.2** представлена компьютерная модель четырехточечной пассивной подвески БГА в инструментальной системе Matlab.

Результаты моделирования при типовом единичном воздействии приведены на **Рис.3**.

На **Рис.4** изображено моделирование наезда на препятствие (бордюр) правыми колесами, и дальнейшее движение по этому препятствию правыми колесами, в то время как другие колеса едут по идеально ровной поверхности. В качестве имитации препятствия использовано ступенчатое воздействие, моделирующее препятствие высотой 10 сантиметров.

Скорость автомобиля при имитационном моделировании составляет 16 (м/с), что соответствует 57 (км/ч).

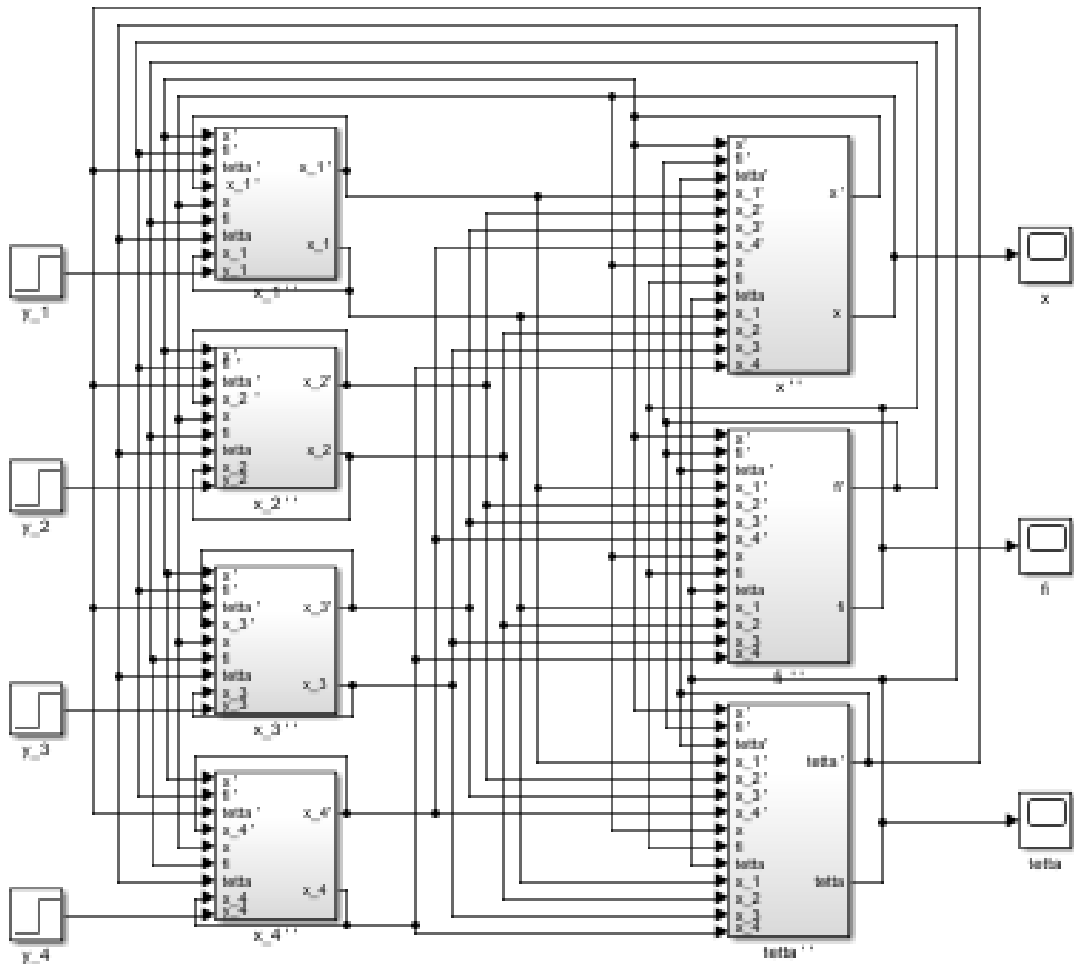


Рис.2 – Компьютерная модель четырехточечной пассивной подвески БГА

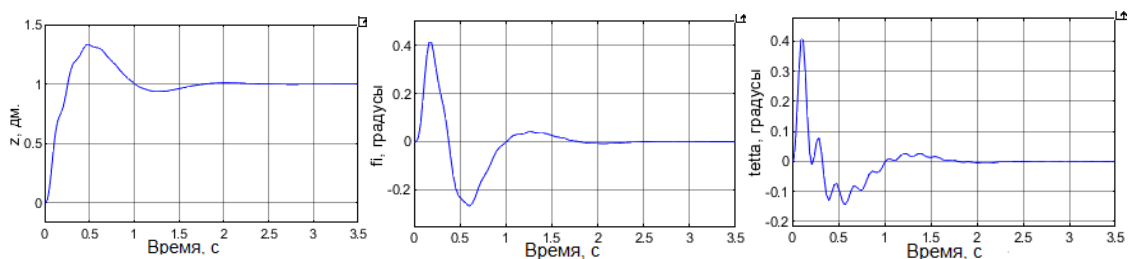


Рис.3 – Реакции платформы по вертикали, углу крена и углу тангажа

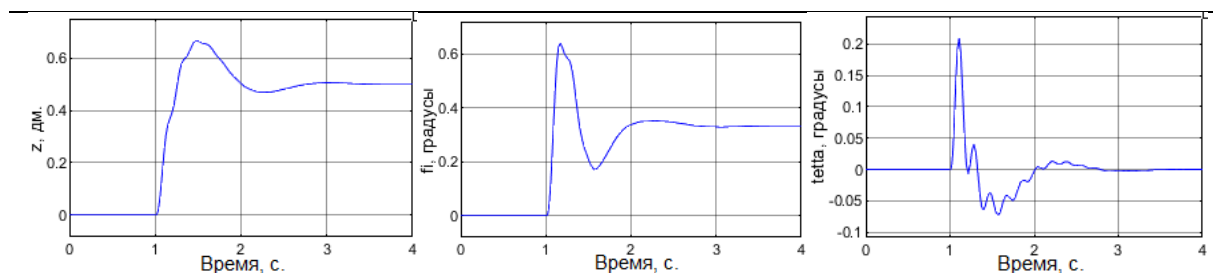


Рис.4 – Реакции платформы по вертикали, углу крена и углу тангажа на наезд на бордюр правыми колесами

На **Рис.5** представлены результаты моделирования наезда на препятствие (кочку) правыми колесами, в то время как другие колеса едут по идеально ровной поверхности. Скорость автомобиля при моделировании составляет 16 (м/с), что соответствует 57 (км/ч). В качестве имитации кочки был использован единичный импульс, моделирующий кочку высотой 4 сантиметра и шириной 6 сантиметров.

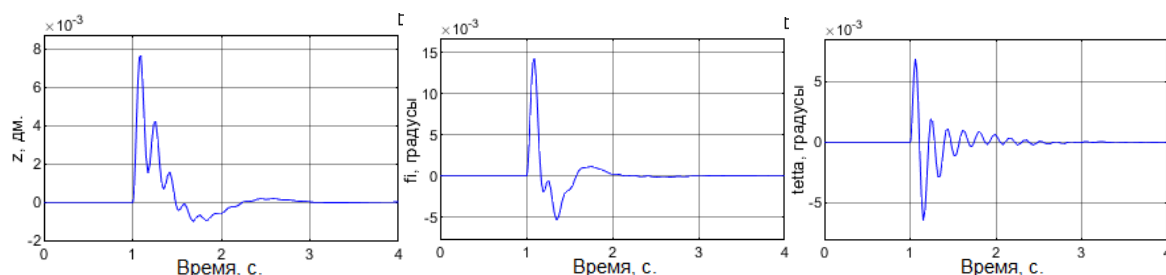


Рис.5 – Реакции платформы по вертикали, углу крена и углу тангажа на наезд на кочку правыми колесами

Моделирование езды по абсолютно не ровной поверхности изображено на **Рис.6**. В качестве имитации профиля дороги, были использованы случайные сигналы, имитирующие абсолютно неровную поверхность с амплитудой, не превышающей 4 сантиметра. Скорость автомобиля при имитационном моделировании составляет 16 (м/с), что соответствует 57 (км/ч).

Из графиков переходных процессов очевидны числовые параметры переходных процессов; система четырехточечной пассивной подвески БГА сглаживает колебания платформы, обусловленные внешними воздействиями (неровностями дорожного покрытия).

Предварительный спектральный анализ колебаний платформы. Спектральные характеристики вертикального перемещения поддрессоренной части четырехточечной пассивной подвески БГА представленные на **Рис.7-10**, демонстрируют изменение спектральной характеристики при различных входных воздействиях.

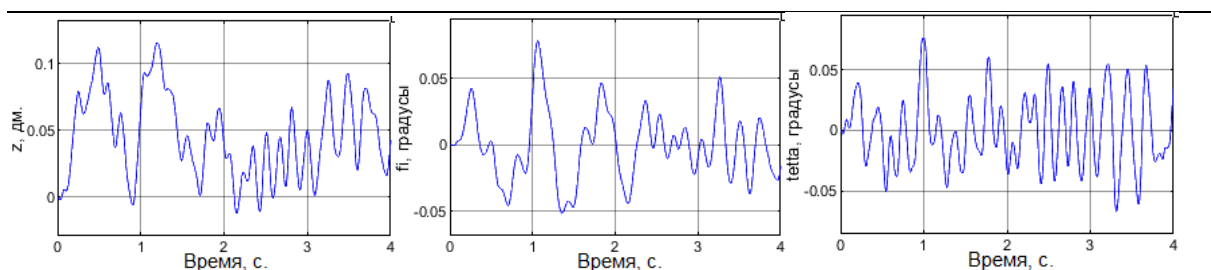


Рис.6 – Реакции платформы по вертикали, углу крена и углу тангажа при движении по абсолютно не ровной поверхности

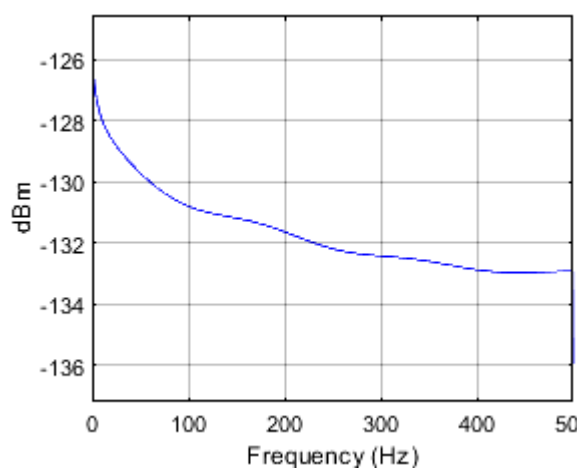


Рис.7 – Спектральная характеристика при типовом ступенчатом воздействии

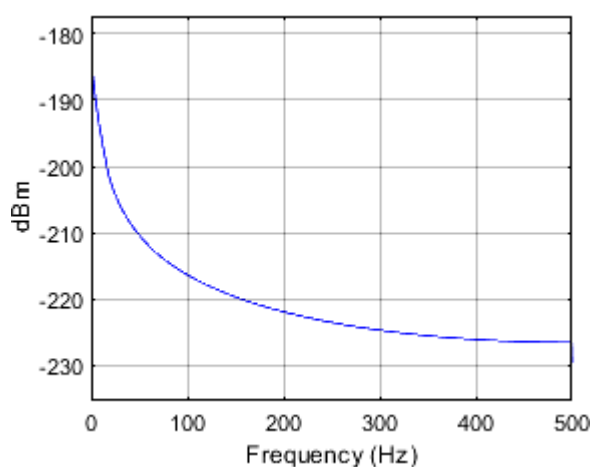


Рис.8 – Спектральная характеристика при наезде на бордюр правыми колесами

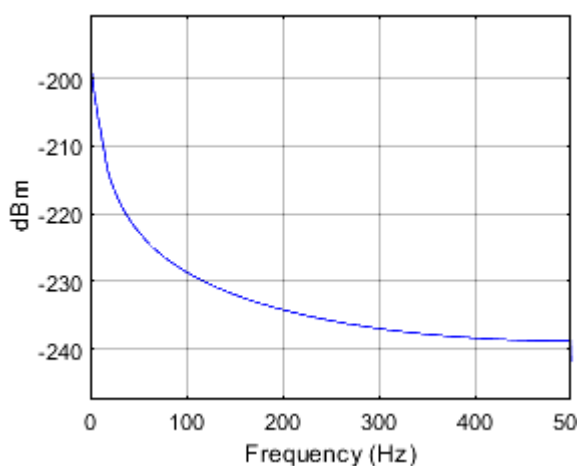


Рис.9 – Спектральная характеристика при наезде на кочку правыми колесами

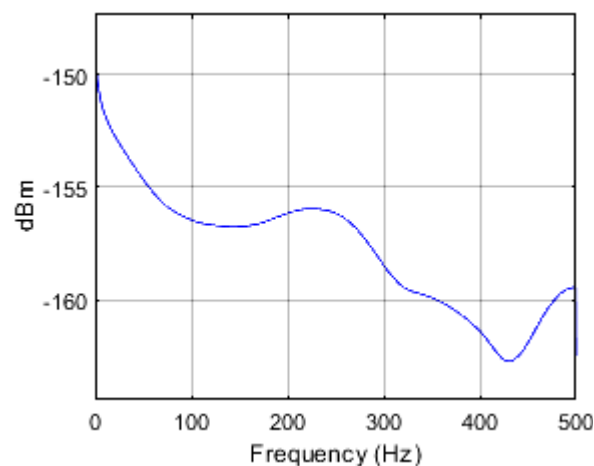


Рис.10 – Спектральная характеристика при движении по абсолютно не ровной поверхности

Из сравнения графиков спектральной характеристики видно, что изменение типа и величины входного воздействия сказывается на колебательности поддрессоренной части платформы БГА – изменяется амплитуда колебаний (вибрации) поддрессоренной части БГА, изменяется частотный диапазон колебаний и т.д.

Закключение. Построена математическая и компьютерная (числовая вибрационная) модели платформы транспортного средства с четырехточечной подвеской. Проведенное компьютерное моделирование с использованием реальных числовых параметров конкретного транспортного средства – большегрузного автомобиля показало работоспособность и адекватность разработанных моделей.

В целом, полученные результаты могут быть использованы при исследованиях и аналитическом конструировании систем адаптивной подвески транспортных средств, проектировании перспективных большегрузных автомобилей и автомобилей специального назначения.

Библиографический список

1. Асанов А.З. Архитектура бортовых информационно-управляющих систем, роботизированных большегрузных магистральных автомобилей // Российский технологический журнал. – 2017. – Том 5, № 3. – С.106–113.
2. Wong J.Y. Theory of ground vehicles. Third Edition / J.Y. Wong. – Ottawa: John Wiley & Sons, Inc, 2001. – 528p.
3. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control / R. Rajamani. – State Minnesota: Springer, 2006. – 472 p.
4. Gohrle C. Design and vehicle implementation of preview active suspension controllers / C. Gohrle, A. Schindler, A. Wagner, O. Sawodny // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – vol.22, no.3. – pp. 1135–1142.
5. Chen H.Y. Adaptive Control for Active Suspension System / H.Y. Chen, S.J. Huang // International Conference on Control and Automatic. June 2005. Budapest, Hungary.
6. Aldair A. Design an Intelligent Controller for Full Vehicle Nonlinear Active Suspension Systems / A. Aldair, W.J. Wang // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2011. – vol.4, no.2 – pp. 224-243.
7. Jamshidi F. Robust Control of an Active Suspension System Using H_2 & H_∞ Control Methods / F. Jamshidi, A. Shaabany // Journal of American Science. – 2011. – №7(5). – pp. 1-5.

8. Ghazaly N.M. Sliding Mode Controller for Different Road Profiles of Active Suspension System for Quarter-Car Model / N.M. Ghazaly, M. Makrahy, A.O. Moaaz // American Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – vol.7, no.4. – pp.151-157.
9. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем / В.Н. Буков. – Калуга: Изд-во научн. лит. Н. Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
10. Асанов А.З. Введение в математическое моделирование систем управления / А.З. Асанов. – М.: МИРЭА–Российский технологический университет, 2019. – 198 с.
11. Сайт Серийные автомобили КАМАЗ [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://kamaz.ru/production/serial/>

Bibliograficheskij spisok

1. Asanov A.Z. Arhitektura bortovyh informacionno-upravlyayushchih sistem, robotizirovannyh bol'shegruznyh magistral'nyh avtomobilej // Rossijskij tekhnologicheskij zhurnal. – 2017. – Tom 5, № 3. – S.106–113.
2. Wong J.Y. Theory of ground vehicles. Third Edition / J.Y. Wong. – Ottawa: John Wiley & Sons, Inc, 2001. – 528p.
3. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control / R. Rajamani. – State Minnesota: Springer, 2006. – 472 p.
4. Gohrle C. Design and vehicle implementation of preview active suspension controllers / C. Gohrle, A. Schindler, A. Wagner, O. Sawodny // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – vol.22, no.3. – pp. 1135–1142.
5. Chen H.Y. Adaptive Control for Active Suspension System / H.Y. Chen, S.J. Huang // International Conference on Control and Automatic. June 2005. Budapest, Hungary.
6. Aldair A. Design an Intelligent Controller for Full Vehicle Nonlinear Active Suspension Systems / A. Aldair, W.J. Wang // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2011. – vol.4, no.2 – pp. 224-243.
7. Jamshidi F. Robust Control of an Active Suspension System Using H₂ & H_∞ Control Methods / F. Jamshidi, A. Shaabany // Journal of American Science. – 2011. – №7(5). – pp. 1-5.
8. Ghazaly N.M. Sliding Mode Controller for Different Road Profiles of Active Suspension System for Quarter-Car Model / N.M. Ghazaly, M. Makrahy, A.O. Moaaz // American Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – vol.7, no.4. – pp.151-157.

-
9. Bukov V.N. Vlozhenie sistem. Analiticheskij podhod k analizu i sintezu matrichnyh sistem / V.N. Bukov. – Kaluga: Izd-vo nauchn. lit. N. F. Bochkarevoj, 2006. –720 s.
 10. Asanov A.Z. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie sistem upravleniya / A.Z. Asanov. – M.: MIREA–Rossijskij tekhnologicheskij universitet, 2019. –198 s.
 11. Sajt Serijnye avtomobili KAMAZ [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://kamaz.ru/production/serial/>

¹Асанов Асхат Замилович, д.т.н, профессор, a.z.asanov@yandex.ru, Россия, Москва, Институт искусственного интеллекта, МИПЭА

²Веркнер Алексей Сергеевич, ассистент, aleksverk@mail.ru, Россия, Москва, Институт искусственного интеллекта, МИПЭА

MODELING THE DYNAMICS OF THE SUSPENSION OF A HEAVY-DUTY VEHICLE IN THE PROCESS OF OVERCOMING OBSTACLES

A.Z. Asanov, A.S. Verkner

A mathematical numerical model of a four-point suspension of a heavy-duty vehicle has been developed. Numerical simulation of the car suspension operation when the wheel hits various road obstacles is carried out. A spectral analysis of the reactions of the sprung masses of the car was carried out. The research results can be used in the development and testing of vehicle suspension control systems, as well as for educational and methodological purposes.

Key words: mathematical model, four-point suspension, computer model, spectral analysis, transient characteristics.

Asanov Askhat Zamilovich, doctor of technical sciences, professor, a.z.asanov@yandex.ru, Russia, Moscow, Institute of synthetic Intelligence, MIREA

Verkner Alexey Sergeevich, assistant, aleksverk@mail.ru, Russia, Moscow, Institute of synthetic Intelligence, MIREA

ВЫБОР ПАРАМЕТРИЗАЦИИ МАТРИЦ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МЕТОДОВ STATE-DEPENDENT УПРАВЛЕНИЯ

Кабанов А.А.

Аннотация. Исследование посвящено применению методов, зависящих от состояния коэффициентов (*state-dependent coefficient, SDC*), для решения нелинейных задач оптимального управления. Важным этапом применения методов SDC является параметризация (также говорят о факторизации) исходной нелинейной системы к SDC виду. В прошлых исследованиях показано, что для многомерных систем число таких параметризаций бесконечно. Выбор правильной параметризации может обеспечить лучшую сходимость и качества соответствующего SDC метода. В данной статье представлен ряд критериев, которые можно использовать для выбора подходящей параметризации. На примере задачи моделирования крупномасштабных муссонных внутрисезонных колебаний на основе синтеза оптимального управления на конечном интервале времени проведен анализ влияния выбора соответствующего критерия параметризации для решения задачи, показана работоспособность метода.

Ключевые слова. Зависящий от состояния коэффициент, *state-dependent coefficient*, факторизация, параметризация, оптимальное управление, нелинейная система.

Введение. Методы нелинейной теории управления, несмотря на их существенную сложность в реализации, сегодня все чаще встречаются в реальных приложениях. С одной стороны, это обусловлено развитием компьютерной техники и вычислительными возможностями, с другой – стороны сами методы и их численные процедуры также постоянно совершенствуются, достигая улучшенных характеристик сходимости, точности, длительности вычислительных итераций. Примером одного из таких подходов к синтезу нелинейных систем управления является подход, основанный на представлении нелинейных систем в линейной форме пространства состояний с коэффициентами, зависящими от состояния (далее State-Dependent Coefficients техника или SDC-техника).

SDC-техника успешно применяется уже на протяжении более чем двадцати лет, постоянно расширяя спектр методов и набор решаемых с их помощью задач. Широкое применение SDC-техника нашла в задачах оптимального управления с квадратическим критерием качества. Причем тут рассматриваются задачи оптимального управления на бесконечном интервале времени [1,2], конечном интервале времени (задачи терминального управления) [3-5], задачи синтеза следящих систем [6],

задачи построения оптимальных нелинейных наблюдателей [7-9]. Во всей совокупности SDC методов решения указанного спектра задач отдельно выделяют метод SDRE (State-Dependent Riccati Equation – уравнение Риккати, зависящее от состояния) и ASRE (Approximated Sequence of Riccati Equations - приближенная последовательность уравнений Риккати) [1,2,10]. Есть и модификации этих методов, учитывающие их некоторые преимущества [11,12].

Важным нюансом в применении SDC методов, влияющим на качество их работы, является параметризация исходной нелинейной системы с целью приведения ее к псевдолинейному виду с зависящими от состояния матрицами. Сложность состоит в том, что для многомерного случая всегда существует бесконечное число SDC параметризации [13]. Теме параметризации (или еще говорят факторизации) нелинейных систем с целью приведения к SDC-форме посвящено ряд исследований, в которых авторы предлагают некоторые пути по выбору лучшей с позиции некоторого заданного критерия параметризации. Так в [14] вводится категория родительских матриц для параметризации системы параметром α . В [15] представлен случай для k параметризации в общем виде.

Кроме выбора способа параметризации важным является вопрос какую из бесконечного множества параметризаций выбрать. В качестве критериев в разных исследованиях рассматривались такие варианты как максимизация минимального сингулярного числа Грамиана управляемости [11], минимизация критерия качества [14], обеспечение условия разрешимости SDRE [15,16].

В настоящей работе предлагается развитие идей, представленных в [11], где предложено использовать сингулярные значения Грамиана управляемости. Это положительные действительные числа, которые можно использовать вместо собственных значений. На простых примерах было показано, что наибольшее значение минимального сингулярного числа Грамиана управляемости предполагает наилучшее (т.е. наименьшее) значение функционала качества и наименьшее число итераций для метода ASRE. Учитывая нелинейную динамику, выбор матрицы состояния с коэффициентами, зависящими от состояния, представляет собой степень свободы, которую можно использовать для обеспечения наилучших характеристик с точки зрения сходимости алгоритма и усилий по управлению.

В настоящей работе рассматривается несколько метрик, которые можно использовать в качестве критерия для выбора конкретной параметризации матрицы состояния. Так в качестве альтернативе Грамиана управляемости предлагается использовать сингулярные

значения некоторой матрицы, о невырожденности которой можно судить об управляемости системы [17]. Как дополнительный критерий предлагается рассмотреть не сингулярные значения матрицы, а ее число обусловленности. Кроме того, предлагается анализировать и саму матрицу состояния системы, поскольку ее обусловленность влияет на возможность разрешения возникающих матричных уравнений Ляпунова.

Постановка задачи оптимального управления в SDC форме. Рассматриваем нелинейную систему аффинного типа

$$\frac{d}{dt}x = f(x) + g(x)u, \quad x(t_0) = x_o, \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния, $u \in R^r$ – r -вектор управления, $f(x)$, $g(x)$ – матричные функции с отображением вида.

Для применения SDC техники систему (1) необходимо представить в SDC форме путем факторизации $f(x) = A(x)x$, откуда, обозначая $g(x) = B(x)$, для (1) получим

$$\frac{d}{dt}x = A(x)x + B(x)u, \quad x(t_0) = x_o, \quad (2)$$

где $A(x)$, $B(x)$ – матрицы соответствующих размерностей, с коэффициентами, зависящими от состояния.

Задача оптимального управления (ОУ) на конечном интервале времени для системы (2) с заданным конечным состоянием заключается в минимизации критерия качества

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T Q(x)x + u^T R(x)u) dt, \quad Q(x) \geq 0, \quad R(x) > 0. \quad (3)$$

$$y(t_f) = Cx(t_f) = x_f, \quad (4)$$

где C — матрица постоянных коэффициентов, а $x(t_f)$ — вектор конечных состояний.

SDRE техника решения задачи ОУ. Решение задачи (2)–(4) в форме обратной связи на основе метода SDRE можно записать в виде (зависимость от x опустим для упрощения записи) [5]:

$$u = -R^{-1}B^T K - R^{-1}B^T W^T C^T M^{-1}(CWx - y(t_f)), \quad (5)$$

где

$$-\dot{K}(t, x) = A^T K + KA + Q - KBR^{-1}B^T K, \quad K(t_f, x_f) = 0. \quad (6)$$

$$\dot{W}(t, x) = -W(A - BR^{-1}B^T K), \quad W(t_f, x_f) = I, \quad (7)$$

$$\dot{M}(t, x) = -CWBR^{-1}B^T W^T C^T, \quad M(t_f, x_f) = 0. \quad (8)$$

Для вычисления оптимального управления (5) необходимо выполнить интегрирование в обратном времени уравнений (6), (7) и (8). Основная трудность при этом заключается в том, что значения матриц $A(x)$, $B(x)$ системы (2) неизвестны при интегрировании справа на лево.

Общепринятым здесь подходом стало применение гипотезы «замороженных» коэффициентов [3], и фиксации значений матриц A, B, Q, R для каждого $x(t)$, $\forall x(t)$, $t \in [t_0, t_f]$. Условие существования этого решения – поточечная управляемость для пары $(A(x), B(x))$.

Построение управления (5)-(10) с применением гипотезы «замораживания» коэффициентов [3], согласно которой обозначим через нижний индекс «s» значения матриц A, B, Q, R для текущего значения вектора состояния x

$$A_s \equiv A(x)|_{x=x(t)}, B_s \equiv B(x)|_{x=x(t)}, Q_s \equiv Q(x)|_{x=x(t)}, R_s \equiv R(x)|_{x=x(t)} \quad (9)$$

и будем считать их постоянными для текущей численной итерации метода. Тогда для матрицы K решения уравнения (6) согласно [3]

$$K(x, t) = P^{-1}(x, t) + P_{ss}, P(x, t) = e^{A_{ss}(t-t_f)}(P_{ss}^{-1} - D_{ss})e^{A_{ss}^T(t-t_f)} + D_{ss}, \quad (10)$$

где D_{ss} является решением алгебраического уравнения Ляпунова

$$A_{ss}D_{ss} + D_{ss}A_{ss}^T - B_s R_s^{-1} B_s^T = 0, A_{ss} = A_s - B_s R_s^{-1} B_s^T P_{ss} \quad (11)$$

матрица P_{ss} – решение алгебраического уравнения Риккати

$$A(x)^T P_{ss}(x) + P_{ss}(x) A(x) + Q(x) - P_{ss}(x) B(x) R(x)^{-1} B(x)^T P_{ss}(x) = 0 \quad (12)$$

Для матрицы W получим

$$W(x, t) = e^{A_{cl}(t_f-t)}, A_{cl} = A_s - B_s R_s^{-1} B_s^T K(t, x) \quad (13)$$

Для матрицы M следует такие соотношения

$$M(x, t) = -C \left(\int_{t_f}^t \frac{d}{d\tau} (W D W^T) d\tau \right) C^T = C (e^{A_{cl}(t_f-t)} D e^{A_{cl}^T(t_f-t)} - D) C, \quad (14)$$

где D является решением алгебраического уравнения Ляпунова (11), где вместо A_{ss} нужно подставить A_{cl} .

Зависимость от факторизации. Для многомерной системы (1) всегда существует бесконечное число параметризаций в SDC форме (2) [14.]. Этот факт демонстрируется достаточно простыми выкладками.

В многомерном случае вектор состояния по определению имеет по крайней мере две компоненты (обозначим их x_1 и x_2). Предположим, что в одном из уравнений состояния существует нелинейный скалярный член $f_i(x)$. Тогда в этом уравнении состояния можно найти по крайней мере два представления, соответствующие $f_i(x)/x_1$ и $f_i(x)/x_2$. Используя любые два

допустимых SDC-представления $A_1(x)$ и $A_2(x)$, можно построить бесконечное число параметризаций из выпуклого множества

$$A(x, \alpha) = \alpha A_1(x) + (1 - \alpha) A_2(x), \alpha \in [0, 1]$$

В общем случае для k параметризаций имеем [20]

$$A(x, \alpha) = \prod_{j=1}^k (1 - \alpha_j) A_1(x) + \sum_{i=2}^k \alpha_{i-1} \left[\prod_{j=1}^k (1 - \alpha_j) \right] A_i(x) + \alpha_k A_{k+1}(x), \quad (15)$$

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_k)^T, \|\alpha\|_1 = \sum_{j=1}^k |\alpha_j| \leq 1, \alpha_j \geq 0, j = 1, \dots, k.$$

Альтернативная параметризация может быть также представлена через конечный вектор параметров α_k в предположении, что система (1) имеет набор из k динамических моделей с коэффициентами, зависящими от состояния, которые определяются как $f(x) = A_i(x)x, i = 1, \dots, k$ [14].

В таком случае множество моделей системы (1) в SDC форме может быть параметризовано множеством скаляров $\{\alpha_i\}$. Для этого введем вектор

$$\alpha = (\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_k)^T, \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1.$$

Тогда любое представление вида $A(x, \alpha) = \sum_{i=1}^k \alpha_i A_i(x)$ также является допустимой моделью SDC той же системы, т.к.

$$A(x, \alpha)x = \left(\sum_{i=1}^k \alpha_i A_i(x) \right) x = \sum_{i=1}^k \alpha_i (A_i(x)x) = \left(\sum_{i=1}^k \alpha_i \right) f(x) = f(x)$$

В обоих представленных подходах к факторизации возникает категория так называемых «родительских» матриц, которые используются для параметризации системы параметром альфа. Вопрос выбора этих матриц также является частью задачи факторизации.

Итак введем понятие параметризованной SDC системы

$$\frac{d}{dt} x = A(x, \alpha)x + B(x)u, x(t_0) = x_o, \|\alpha\| \leq 1, \alpha_j \geq 0, j = 1, \dots, k \quad (16)$$

Поскольку различные представления SDC матриц приводят к различному поведению SDC методов, то факторизация и выбор матрицы $A(x, \alpha)$ представляет собой дополнительную степень свободы.

По сути задача факторизации сводится к оптимизационной задаче выбора некоторого представления матриц системы, параметризованных значением параметра α_i в соответствии с некоторым критерием. Одним из возможных критериев можно взять максимизацию минимального сингулярного числа Грамиана управляемости [11]:

$$\max_{\alpha} \sigma_m(H(\alpha)), \|\alpha\| \leq 1, \alpha_j \geq 0, j = 1, \dots, k, \quad (17)$$

где $\sigma_m(H(\alpha))$ возвращает наименьшее сингулярное число своего матричного аргумента, $H(\alpha)$ – Грамиан управляемости.

Другой путь реализован через минимизацию критерия качества управления (3). В [14] было разработано численное решение предложенной задачи на основе градиентных итерационных методов. Были применены метод Ньютона и метод наискорейшего спуска и проведено сравнение их результатов.

Недостатком оптимизационных подходов, описанных ранее, является необходимость запуска процесса в течение всего временного окна, чтобы численно оценить градиенты критерия качества и гессианы. С этой точки зрения такие подходы плохо применимы для онлайн-реализации. В [14] как альтернатива этим подходам, представлен так называемый алгоритм переключения, достоинством которого является возможность реализации в режиме онлайн. Суть этого алгоритма состоит в том, чтобы позволить регулятору переключаться между конечным набором структур, где каждая структура разработана на основе SDRE метода для конкретной параметризованной модели. Решение о выборе коэффициента усиления здесь основано на эвристике, согласно которой величина критерия качества определяется количественно нормой соответствующей матрицы Риккати

$$\min_{\alpha} \text{tr}\{P(\alpha_i)\}, \|\alpha\| \leq 1, \alpha_j \geq 0, j = 1, \dots, k. \quad (18)$$

Соответственно в этом алгоритме вместо минимизации критерия предлагается осуществлять выбор параметра факторизации на основе минимизации следа матрицы Риккати P . Основной недостаток этого способа – необходимость параллельно решать k уравнений Риккати.

Число обусловленности и чувствительность матриц к параметризации. Число обусловленности как одна из количественных характеристик квадратных матриц является одним из матричных инвариантов, т.е. существенным образом зависит от базиса представления матрицы. Это обстоятельство обнаружило возможность использования чисел обусловленности матриц для решения большого круга алгебраических задач, связанных с оценкой чувствительности матричных процедур к погрешностям представления компонентов этих процедур [18]. В настоящей работе рассматриваются возможности использования числа обусловленности как критерия выбора параметризации SDC-матриц нелинейной системы. Оценки обусловленности матриц можно отнести к классу экспресс-оценок, они должны конструироваться на каждом шаге процесса синтеза SDC регулятора нелинейной системы.

Число обусловленности $C\{N\}$ матрицы N , задаваемое соотношением $C\{N\} = \|N\| \|N^{-1}\|$, численно зависит от выбранной матричной нормы, но при любой норме минимальное его значение равно единице, что соответствует случаю идеальной обусловленности матрицы N , а максимальное его значение равно бесконечности, что соответствует случаю вырожденности матрицы N [18].

Если в качестве матричных норм при вычислении числа обусловленности используются спектральные нормы матриц N и N^{-1} , то соотношение для числа обусловленности принимает вид

$$C\{N\} = \|N\| \|N^{-1}\| = \sigma_M(N) \sigma_m^{-1}(N) \quad (19)$$

где $\sigma_M(N), \sigma_m(N)$ – соответственно наибольшее и наименьшее сингулярные числа матрицы N .

Помимо чисел обусловленности матриц можно использовать и более сложные критерии. Так в [18] для случая реализуемости полной задачи обобщенного модального управления был предложен следующий критерий

$$\min_{\alpha} \{J_{\alpha} = C^{1/2} \{H(\alpha)\} \sigma_M^{1/2}(H(\alpha))\}. \quad (20)$$

где H – Грамиан затрат на управление; $\sigma_M^{1/2}(H)$ – максимальное сингулярное число Грамиана затрат на управление, $C^{1/2}\{H\}$ – его число обусловленности. Таким образом, функционал в (26) контролирует затраты на управление и обусловленность их распределения.

Управление факторизацией SDC моделей. Поскольку более высокая управляемость обеспечивает меньшие усилия по управлению, основное внимание уделяется выбору факторизации, которая максимизирует управляемость. Для измерения степени управляемости может использоваться минимальное собственное значение Грамиана управляемости. Однако поскольку собственные значения страдают плохой обусловленностью, то вместо них можно использовать сингулярные значения матрицы, как, например, сделано в [11], где использовался критерий (17).

Сравнивая критерии (17) и (20), используя определение числа обусловленности (19), можно увидеть, что они по сути имеют один и тот же смысл. Учитывая последнее, в рассматриваемых задачах в качестве критерия удобно взять критерии аналогичные (17), (20). При этом вместо Грамиана управляемости в настоящей работе предлагается использовать матрицу M из (8), поскольку в линейной постановке задачи известно [17], что динамическая система называется частично неуправляемой если матрица M вырождена для любого значения t на рассматриваемом

интервале. В нашем случае решение задачи возможно только если M не вырождена, что можно использовать как критерий для параметризации, т.е. параметризация должна обеспечивать более высокую управляемость (матрица близка к сингулярности, когда ее наименьшее собственное значение близко к нулю). При этом, чтобы уйти от бинарного критерия (управляема или неуправляема) предлагается использовать некоторые оценки степени управляемости через сингулярные значения и числа обусловленности. Если число обусловленности матрицы M намного больше 1, то матрица чувствительна к обратному вычислению. С учетом того, что для расчета управления (5) необходимо выполнять обращение матрицы M , выбор числа обусловленности в качестве критерия является обоснованным.

Таким образом, в настоящем работе предлагается использовать минимизацию числа обусловленности некоторых матриц и критерии типа (17), (18), (20) и в качестве исследуемых критериев выбора параметризации матриц SDC системы (16):

$$\begin{aligned} & \min_{\alpha} \text{tr}\{P(\alpha_i)\}, \\ & \min_{\alpha} C\{M(\alpha)\}, \\ & \min_{\alpha} C\{A(\alpha)\}, \\ & \min_{\alpha} \{C^{1/2} \{M(\alpha)\} \sigma_M^{1/2}(M(\alpha))\}, \\ & \min_{\alpha} \{J(u, \alpha) = 1/2 x^T P(\alpha) x\}, \end{aligned} \tag{21}$$

$$\|\alpha\| \leq 1, \alpha_j \geq 0, j = 1, \dots, k, P(\alpha) = K(\alpha) - W(\alpha)^T C^T M(\alpha)^{-1} C W(\alpha).$$

Перейдем непосредственно к задаче факторизации. Выражение (18) позволяет нам одновременно обрабатывать набор SDC-матриц. Его можно использовать для модификации метода SDRE, чтобы реализовать лучшую факторизацию. Метод требует задания динамики в виде (2), что достигается заданием значений α в (16). Таким образом, веса α_j должны быть выбраны так, чтобы оптимизировать один из критериев (21).

Например, матрица M должна быть не вырождена и ее минимальное сингулярное число должно быть максимальным. Это делается путем решения на каждой итерации соответствующей задачи нелинейного программирования.

Учитывая изложенную выше идею, представим обобщенный алгоритм работы модифицированного метода SDRE с оптимальной факторизацией по одному из критериев (21).

Алгоритм метода SDRE с оптимальной факторизацией.

На каждом временном шаге повторять:

Шаг 1: Измерить x и оценить $A(x)$ и $B(x)$.

Шаг 2: Выбрать родительские матрицы $A_1(x), A_2(x), \dots, A_k(x)$.

Шаг 3: Определить факторизацию $A(x, \alpha)$ на основе решения оптимизационной задачи согласно выбранному критерию из (21). Определить оптимальные значения α .

Шаг 4: Рассчитать матрицы K, W, M из соотношений (10)-(12), (13) и (14) соответственно.

Шаг 5: Рассчитать управление с обратной связью, используя (5).

Шаг 6: Применить управление u в системе.

Пример. В качестве примера применения предлагаемого подхода рассмотрим задачу моделирования крупномасштабных муссонных внутрисезонных колебаний (MISO), измеренных по осадкам с использованием нелинейной стохастической модели низкого порядка, а именно задачу моделирования А-профиля для индекса MISO1 [19].

Для описания временной перемежаемости и случайности частоты колебаний индексов MISO используется следующая стохастическая модель низкого порядка [19]. Здесь два компонента, MISO1 и MISO2, обозначены и соответственно u_1 и u_2 :

$$\begin{aligned} du_1/dt &= -d_u u_1 + \gamma(v + v_f)u_1 - (a + \omega_u)u_2 + \sigma_u \dot{W}_{u_1}, \\ du_2/dt &= -d_u u_2 + \gamma(v + v_f)u_2 + (a + \omega_u)u_1 + \sigma_u \dot{W}_{u_2}, \\ dv/dt &= -d_v v - \gamma(u_1^2 + u_2^2) + \sigma_v \dot{W}_v, \\ d\omega_u/dt &= -d_\omega \omega_u + \sigma_\omega \dot{W}_\omega, \end{aligned} \quad (22)$$

где $v_f(t) = f_0 + f_t \sin(\omega_f t + \phi)$, $d_u = 0.8, d_v = 0.6, d_\omega = 0.5$, $\sigma_u = 0.5, \sigma_v = 0.5, \sigma_\omega = 0.5, \gamma = 0.3$, $a = 4.1, f_0 = 1.0, f_t = 4.7, \omega_f = 2\pi/12, \phi = -2$. В дополнение к двум наблюдаемым переменным MISO, две другие переменные v и ω_u , которые не наблюдаются, представляют собой стохастическое затухание и стохастическую фазу соответственно.

Исходя из особенностей поведения системы, примем критическое значение (порог) показателя $u_1 = 3.5$, который достигается к моменту $t = 6$. Построение А-профиля для индекса u_1 выполняется путем решения соответствующей задачи оптимального управления (2)-(4) (при нулевой матрице штрафа Q), для которой модель (22) нужно представить в SDC форме (16).

Параметризованная SDC матрица состояния будет выглядеть так

$$A(x, \alpha) = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)A_1(x) + \alpha_1(1 - \alpha_2)A_2(x) + \alpha_2A_3(x),$$

$$B(x) = B = \text{diag}(\sigma_u, \sigma_u, \sigma_v, \sigma_w).$$

Начальные значения для параметров $\alpha_1 = \alpha_2 = 1 - \sqrt{2}/2$. Воспользуемся алгоритмом метода SDRE с оптимальной факторизацией последовательно применяя предложенные критерии (в порядке следования в формуле (21)) для оптимизации.

Результаты моделирования показаны ниже. На **Рис.1** приведены графики индекса MISO1 и оценка вероятности выхода к критическому значению (нормированное в диапазоне от 0 до 1 значение $e^{-J(u)/\varepsilon^2}$). Видно, что оптимальная факторизация незначительно влияет на траекторию управляемой переменной, но существенно влияет на оценку вероятности выхода к критическому значению.

Использование критериев, нацеленных на минимизацию числа обусловленности матриц A и M (критерии 2 и 3, соответственно, красный и зеленый пунктиры) приводит к более равномерному росту оценки вероятности на интервале 4,5 – 6 секунд. Критерий 5 (минимизация функционала качества $J(u)$) приводит к существенно нелинейному росту оценки вероятности (чёрная сплошная линия на графике).

Сами значения критерия качества управления приведены на **Рис.2**, где видно что факторизации на основе критериев 4 и 5 (минимизация псевдо Грамиана управляемости – критерий (17) с матрицей M вместо H ; минимизация функционала качества $J(u)$ (5)) приводит к лучшим с точки зрения минимизации затрат на управление результатам.

На **Рис.3** даны графики изменения значений $C\{A(\alpha)\}$, $C\{M(\alpha)\}$, $\text{tr}\{P(\alpha)\}$, $\sigma_m(M(\alpha))$ при различных критериях факторизации. Из графика видно, что выбор критерия факторизации практически не оказывает влияние на минимальное сингулярное число матрицы M и след матрицы P . Кроме того, видно, что критерии 2, 4, 5 приводят к росту числа обусловленности матрицы A , на интервале от 4 до 6 секунд также приводят к небольшому всплеску числа обусловленности матрицы M .

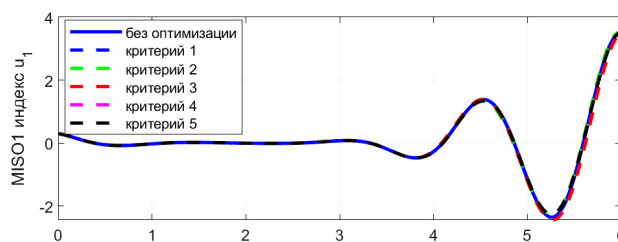


Рис.1 – Индекс MISO1 для различных вариантов факторизации

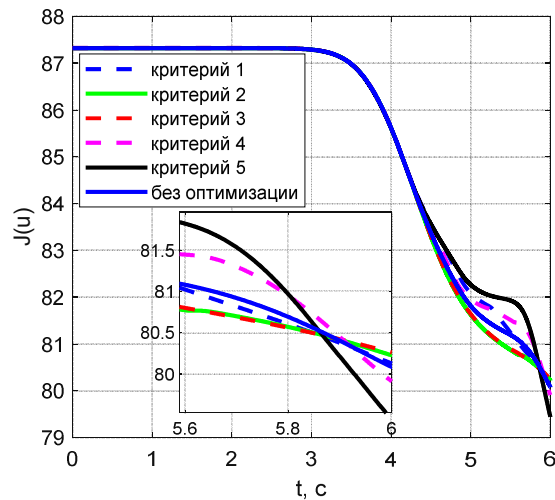


Рис.2 – Критерия качества управления $J(u)$

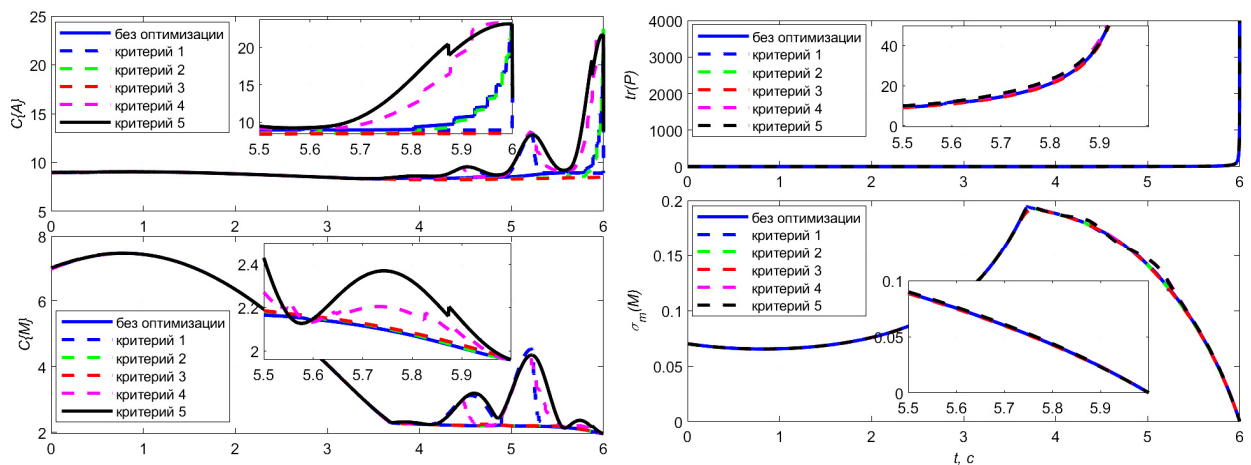


Рис.3 – Графики изменения значений $C\{A(\alpha)\}$, $C\{M(\alpha)\}$, $tr\{P(\alpha)\}$, $\sigma_m(M(\alpha))$

Заключение. Представленные результаты исследований показывают, что факторизация матриц состояния нелинейной системы при использовании SDC методов оптимального управления может применяться как дополнительная степень свободы при синтезе системы. В частности, целью факторизации может быть минимизация затрат на управление, повышение степени управляемости системы, обеспечение условий разрешимости уравнений Ляпунова и пр.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00202).

Библиографический список

1. Nekoo S.R. Tutorial and review on the state-dependent Riccati equation / S.R. Nekoo // *Journal of Applied Nonlinear Dynamics*. – 2019. – Vol.8. – pp. 109-166.
2. Çimen T. Survey of state-dependent Riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis / T. Çimen // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2012. – Vol.35(4). – pp. 1025-1047.
3. Heydari A. Closed-form solution to finite-horizon suboptimal control of nonlinear systems: closed-form solution to finite-horizon suboptimal control / A. Heydari, S.N. Balakrishnan // *Int. J. Robust. Nonlinear Control*. – 2015. – Vol.25(15). – pp. 2687-2704.
4. Dmitriev M.G. A design of an approximate regulator for a weakly nonlinear terminal control problem using the penalty functions method / M.G. Dmitriev, D.A. Makarov // *Mersin 10, Turkey*. – 2018. – pp. 020001.
5. Kabanov A. Finite-Time State-Dependent Coefficient Method for Optimal Control of Nonlinear Systems / A. Kabanov // *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, May 2022*. – P. 717-721.
6. Korayem M.H. State-dependent differential Riccati equation to track control of time-varying systems with state and control nonlinearities / M.H. Korayem, S.R. Nekoo // *ISA Transactions*. – 2015. – Vol.57. – pp. 117-135.
7. Makarov D.A. Synthesis of control and state observer for weakly nonlinear systems based on the pseudo-linearization technique / D.A. Makarov // *Model. anal. inf. sist.* – 2017. – Vol.24(6). – pp. 802-810.
8. Bavarsad A. Nonlinear observer-based optimal control of an active transfemoral prosthesis / A. Bavarsad, A. Fakharian, M.B. Menhaj // *J. Cent. South Univ.* – 2021. – Vol.28(1). – pp. 140-152.
9. Kabanov A.A. The SDC Kalman filter for nonlinear system with uncertainty in initial conditions / A.A. Kabanov, V.A. Kramar // *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia: IEEE, Sep. 2020*. – P. 1015-1019.
10. Çimen T. Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent Riccati equation (SDRE) method / T. Çimen // *Annual Reviews in Control*. – 2010. – Vol.34(1). – pp. 32-51.
11. Topputo F. Optimal selection of the coefficient matrix in state-dependent control methods / F. Topputo, M. Miani, F. Bernelli-Zazzera // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2015. – Vol.38(5). – pp. 861-873.
12. Dubovik S.A. An asymptotic method for predicting risks in problems of stochastic monitoring and control / S.A. Dubovik, A.A. Kabanov // *Mehatronika, avtomatizaciâ, upravlenie*. – 2022. – Vol.23(8). – pp. 395-405.

13. Cloutier J.R. Nonlinear regulation and nonlinear H_∞ control via the state-dependent Riccati equation technique: Part 1, theory; part 2: Examples / J.R. Cloutier, C.N. D'Souza, C.P. Mracek // Proceedings of the First International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace. – 1996. – pp. 117-141.
14. Haim L. Optimized state-dependent Riccati equation method for spacecraft attitude estimation and control / L. Haim, D. Choukroun // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Minneapolis, Minnesota: American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2012.
15. Nazari S. Robust SDC parameterization for a class of extended linearization systems / S. Nazari, B. Shafai // Proceedings of the 2011 American Control Conference, San Francisco, CA: IEEE, Jun. 2011. – P. 3742-3747.
16. Liang Y.-W. Analysis of SDC matrices for successfully implementing the SDRE scheme / Y.-W. Liang, L.-G. Lin // Automatica. – 2013. – Vol.49(10). – pp. 3120-3124.
17. Bryson E. Applied optimal control: optimization, estimation, and control / E. Bryson, Y.-C. Ho. – NY.: Taylor & Francis Group, 1975. – 496 p.
18. Никифоров В.О. Интеллектуальное управление в условиях неопределенности: учебное пособие / В.О. Никифоров, О.В. Слита, А.В. Ушаков. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 226 с.
19. Kabanov A.A. Simulation of rare events in stochastic systems / A.A. Kabanov, S.A. Dubovik // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol.2096(1). – pp. 012151.

Bibliograficheskiy spisok

1. Nekoo S.R. Tutorial and review on the state-dependent Riccati equation / S.R. Nekoo // Journal of Applied Nonlinear Dynamics. – 2019. – Vol.8. – pp. 109-166.
2. Çimen T. Survey of state-dependent Riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis / T. Çimen // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2012. – Vol.35(4). – pp. 1025-1047.
3. Heydari A. Closed-form solution to finite-horizon suboptimal control of nonlinear systems: closed-form solution to finite-horizon suboptimal control / A. Heydari, S.N. Balakrishnan // Int. J. Robust. Nonlinear Control. – 2015. – Vol.25(15). – pp. 2687-2704.
4. Dmitriev M.G. A design of an approximate regulator for a weakly nonlinear terminal control problem using the penalty functions method / M.G. Dmitriev, D.A. Makarov // Mersin 10, Turkey. – 2018. – pp. 020001.
5. Kabanov A. Finite-Time State-Dependent Coefficient Method for Optimal Control of Nonlinear Systems / A. Kabanov // 2022 International Conference on

-
- Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, May 2022. – P. 717-721.
6. Korayem M.H. State-dependent differential Riccati equation to track control of time-varying systems with state and control nonlinearities / M.H. Korayem, S.R. Nekoo // *ISA Transactions*. – 2015. – Vol.57. – pp. 117-135.
 7. Makarov D.A. Synthesis of control and state observer for weakly nonlinear systems based on the pseudo-linearization technique / D.A. Makarov // *Model. anal. inf. sist.* – 2017. – Vol.24(6). – pp. 802-810.
 8. Bavarsad A. Nonlinear observer-based optimal control of an active transfemoral prosthesis / A. Bavarsad, A. Fakharian, M.B. Menhaj // *J. Cent. South Univ.* – 2021. – Vol.28(1). – pp. 140-152.
 9. Kabanov A.A. The SDC Kalman filter for nonlinear system with uncertainty in initial conditions / A.A. Kabanov, V.A. Kramar // *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russia: IEEE, Sep. 2020. – P. 1015-1019.
 10. Çimen T. Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent Riccati equation (SDRE) method / T. Çimen // *Annual Reviews in Control*. – 2010. – Vol.34(1). – pp. 32-51.
 11. Topputo F. Optimal selection of the coefficient matrix in state-dependent control methods / F. Topputo, M. Miani, F. Bernelli-Zazzera // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2015. – Vol.38(5). – pp. 861-873.
 12. Dubovik S.A. An asymptotic method for predicting risks in problems of stochastic monitoring and control / S.A. Dubovik, A.A. Kabanov // *Mehatronika, avtomatizaciâ, upravlenie*. – 2022. – Vol.23(8). – pp. 395-405.
 13. Cloutier J.R. Nonlinear regulation and nonlinear H_∞ control via the state-dependent riccati equation technique: Part 1, theory; part 2: Examples / J.R. Cloutier, C.N. D'Souza, C.P. Mracek // *Proceedings of the First International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace*. – 1996. – pp. 117-141.
 14. Haim L. Optimized state-dependent Riccati equation method for spacecraft attitude estimation and control / L. Haim, D. Choukroun // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Minneapolis, Minnesota: American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2012.
 15. Nazari S. Robust SDC parameterization for a class of extended linearization systems / S. Nazari, B. Shafai // *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, San Francisco, CA: IEEE, Jun. 2011. – P. 3742-3747.
 16. Liang Y.-W. Analysis of SDC matrices for successfully implementing the SDRE scheme / Y.-W. Liang, L.-G. Lin // *Automatica*. – 2013. – Vol.49(10). – pp. 3120-3124.
 17. Bryson E. Applied optimal control: optimization, estimation, and control /

-
- E. Bryson, Y.-C. Ho. – NY.: Taylor & Francis Group, 1975. – 496 p.
18. Nikiforov V.O. *Intellectual'noe upravlenie v usloviyah neopredelennosti: uchebnoe posobie* / V.O. Nikiforov, O.V. Slita, A.V. Ushakov. – SPb: SPbGU ITMO, 2011. – 226 c.
19. Kabanov A.A. Simulation of rare events in stochastic systems / A.A. Kabanov, S.A. Dubovik // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol.2096(1). – pp. 012151.

Кабанов Алексей Александрович, к.т.н, доцент, kabanovaleksey@gmail.com, Россия, Москва, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

THE CHOICE OF PARAMETRIZATION OF NONLINEAR SYSTEM MATRICES FOR THE STATE-DEPENDENT CONTROL METHODS

A.A. Kabanov

The research is devoted to the methods of state-dependent coefficient (SDC) for solving nonlinear optimal control problems. An important stage in the application of SDC methods is the parameterization (or even say factorization) of the original nonlinear system to the SDC form. In past studies, it has been shown that for multidimensional systems, the number of such parameterizations is infinite. Choosing the right parameterization can provide better convergence and quality parameters of the corresponding SDC method. This paper presents a number of criteria that can be used for parameterization. By the example of the problem of modeling large-scale monsoon intra-seasonal fluctuations based on the solution of the optimal control problem in a finite time interval, the analysis of the influence of the choice of the appropriate parameterization criterion on the solution of the problem is carried out.

Key words: state-dependent coefficient, factorization, parameterization, optimal control, nonlinear system.

Kabanov Aleksey Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, kabanovaleksey@gmail.com, Russia, Moscow, Federal Research Center "Computer Science and Control" RAS, Sevastopol, Sevastopol State University

СКВОЗНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ПРИЕМНИКА В SIMULINK.

Оглоблин Д.И.¹, Трудоношин В.А.², Князева С.Ю.³

Аннотация. Направленность статьи – обучение студентов методике модельно-ориентированного проектирования на примере цифровой части известного мобильного приемника GSM. Цифровая часть состоит из физических компонентов (АЦП, вычислителя), интерфейсов и программ, осуществляющих перенос сигнала ПЧ на нулевую частоту. Архитектура описана в System Composer (Simulink), и содержит вычислитель и буферные блоки памяти FIFO, позволяющие вести обработку данных порциями в многозадачном режиме. Модель алгоритма представлена в Simulink, включает перемножитель и набор цифровых фильтров-дециматоров. Произведен выбор частоты дискретизации АЦП и настройки цифровых фильтров. Реализация конвертера предложена на основе микроконтроллера STM32xx. Использованы свойства АЦП по переносу сигнала из высших зон Найквиста в первую. Для создания программного обеспечения произведена автоматическая генерация кода С полученной модели Simulink с перекompilированием в интегрированной среде разработки STM32CubeIDE.

Ключевые слова. Системный анализ, аналогово-цифровой преобразователь, цифровой понижающий конвертер, модельно-ориентированное проектирование, микроконтроллер.

Введение. Цифровая обработка сигналов (ЦОС) – неперенный атрибут систем передачи данных, управления, искусственного интеллекта. Поэтому автоматизация процесса проектирования средств ЦОС – актуальная задача. Известна методика модельно-ориентированного проектирования (МОП) средств ЦОС фирмы Mathwork (ПК Matlab/Simulink) [1], в которой формируется и исследуется модель алгоритма обработки сигнала, а реализация обработки осуществляется путем автоматической генерации кода для выбранного типа вычислителя. В качестве вычислителей обычно применяются микроконтроллеры (МК), микропроцессоры и программируемые логические интегральные схемы. ПК Matlab/Simulink позволяет решать как системную, так и функциональную часть задачи, поэтому проектирование устройства с выдачей прошивки МК проведено в нем.

Целью статьи является обучение студентов методике МОП на примере цифровой части приемника смартфона – карманного компьютера, связанного с сетью радиоканалом. Обучение предполагает формирование структуры цифровой части, состоящей из физических компонент, связей и

интерфейсов, и разработку программ (прошивок) применительно к выбранному вычислителю. Изучение автоматически сгенерированного кода студентами, определившими алгоритм работы, позволяет быстрее освоить программирование МК и ускорить обучение языкам описания аппаратуры, Verilog и VHDL, поскольку студент видит предпосылки и результат кодировки [2].

Основная часть. Структура приемников смартфонов известна и описана [3]. Сигнал выбранного диапазона переносится аналоговой частью приемника на промежуточную частоту, фильтруется и передается в цифровую часть [4], где оцифровывается и обрабатывается в вычислителе для переноса на низкую (нулевую) частоту с фильтрацией и децимацией для согласования с блоками демодуляции и декодирования, которые в данной работе не затрагиваются **Рис.1**.

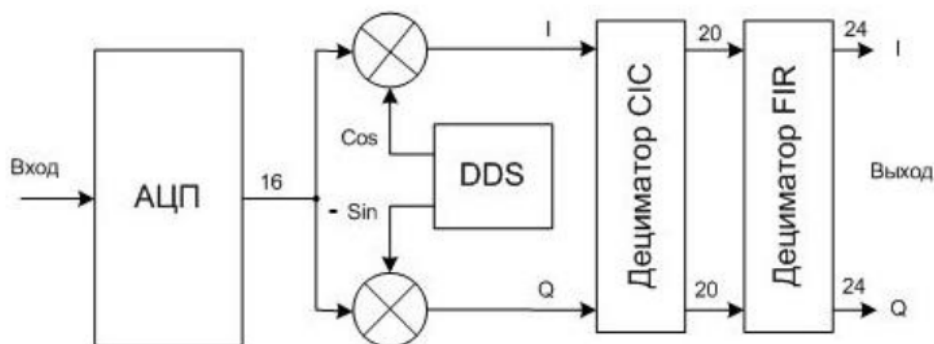


Рис.1 – Функциональная часть цифрового приемника

DDS – цифровой синтезатор частот, CIC – гребенчатый фильтр-интегратор, FIR – нерекурсивный фильтр с конечной характеристикой. Балансная схема подавляет зеркальную и несущую составляющую.

Архитектура вычислителя зависит от соотношения скорости принимаемого потока информации к вычислительной мощности процессора. Если скорость передачи информации невелика (протокол GSM), то процессор может работать в многозадачном режиме, обслуживая радиоканал и выполняя сервисные функции. В варианте протокола LTE (до 100 Мбит/с) для поддержки радиоканала выделяется специальный сигнальный процессор, работающий под управлением главного процессора.

Общая структура приемной части в System Composer (Simulink) для низкой скорости передачи данных представлена на **Рис.2**. Она состоит из аналоговой части и цифровой части, в последнюю входит АЦП, перемножитель, цифровой генератор (NumericalControlOscillator),

цифровые фильтры, блоки FIFO, позволяющие вести обработку данных порциями, МК, обрабатывающий порции по сигналу прерывания и передающий их демодулятору/ декодеру, восстанавливающему цифровой поток информации.

Интерфейсы цифровой части определяются возможностями АЦП и МК. Сигнал промежуточной частоты усиливается по напряжению до 1 В в заданной полосе, фильтруется и оцифровывается. Для протокола GSM АЦП и NCO синхронно выдают в параллельном коде 16 разрядный сигнал с фиксированной точкой формата Signed Fix 16(1,15), где первый бит это знак, а остальные 15 бит занимает мантисса.

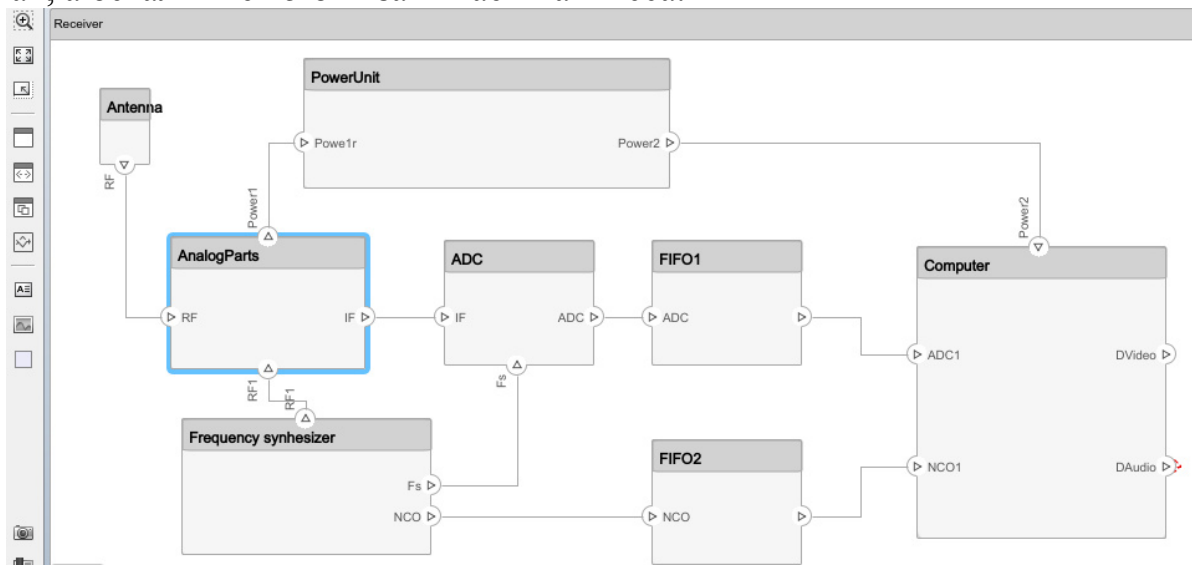


Рис.2 – Структура приемника на системном уровне

Системный анализ позволяет описать схему приемника, определить и документировать требования к компонентам, интерфейсам, программам, тестированию. Однако, специфические параметры вычислителя будут определены только после рассмотрения функциональной схемы.

Функциональная схема цифровой части приемника GSM в виде отдельной микросхемы (аппаратное представление) подробно описана в литературе [5] и носит название конвертера DDC (DirectDigitalConverter). Одно плечо квадратурного смесителя с фильтрами - дециматорами показано на **Рис.3** [5]. Цифрами указаны частоты дискретизации на выходе блоков, A/D – АЦП, NCO – цифровой гетеродин, упрощенный DDS. Цифровые фильтры имеют высокую идентичность и обеспечивают требуемое подавление паразитных частот при балансном включении.

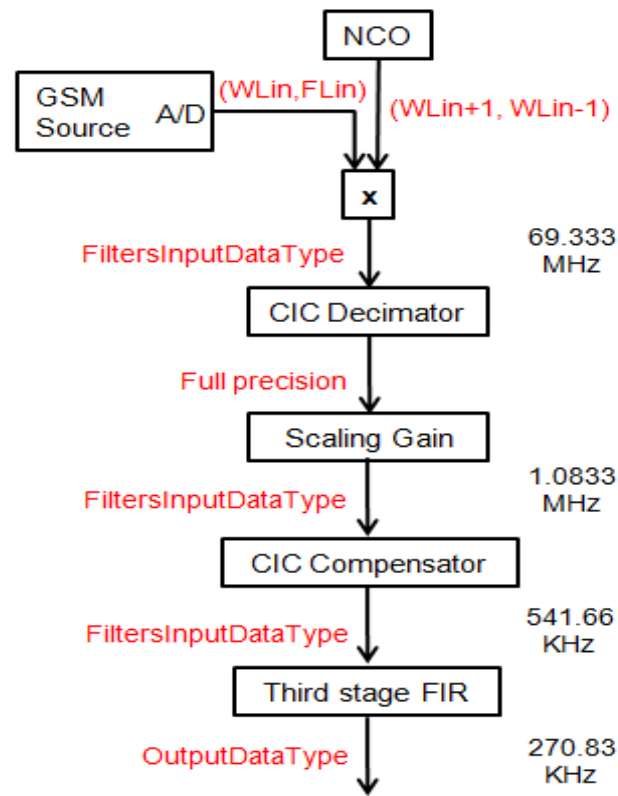


Рис.3 – Структура конвертера DDC (половина)

На практике процесс цифрового преобразования имеет ряд особенностей:

- частота дискретизации АЦП выбрана в пределах (4-5) частоты сигнала, что значительно превышает требование Котельникова (передискретизация). Сделано это по причине «размазывания» шумов по расширенному диапазону и упрощения реализации цифровых фильтров – дециматоров (**Рис.4**).

- перемножение операндов сигнала и гетеродина занимает 3-5 тактов вычислителя. Что бы к моменту поступления следующего отсчета АЦП вычисления были закончены, частота вычислителя должна быть в 3-5 раз выше частоты дискретизации АЦП.

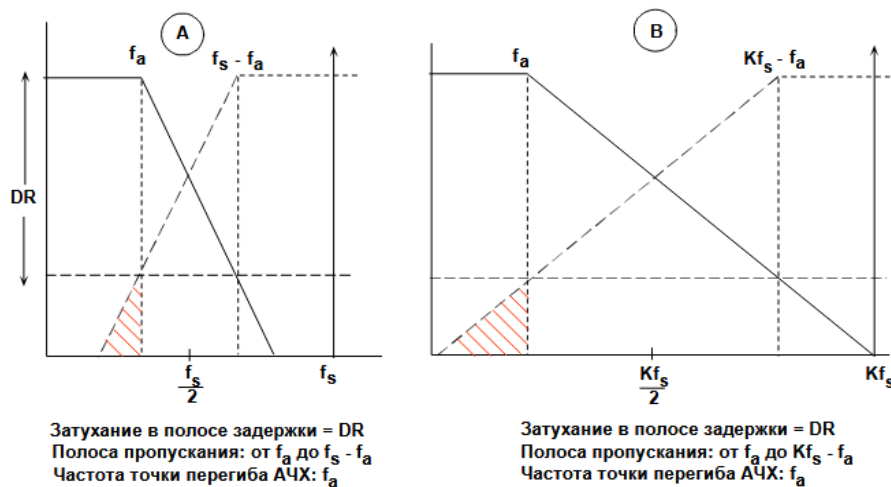
после перемножения двух 16-разрядных чисел получится 40-разрядное число, которое должно быть правильно обрезано во избежании затягивания процесса и сохранения точности.

для обработки низкочастотного информационного сигнала необходимо понизить частоту дискретизации (децимация), что происходит при отбрасывании (невыведении) лишних отсчетов дискретного сигнала. Перед отбрасыванием нужно отфильтровать те частоты, которые

превышают новую частоту Найквиста, иначе будет эффект спектральных наложений (алайзинг).

для борьбы с паразитными продуктами дискретизации производится «дизеризация» сигнала гетеродина [8], подмешивание составляющей белого шума для уменьшения паразитных выбросов в спектре, за счет увеличения общего уровня шумов.

ИЗБЫТОЧНАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ УМЕНЬШАЕТ ТРЕБОВАНИЯ К КРУТИЗНЕ СПАДА ФНЧ



STANDARD QUAD DDC CHIP

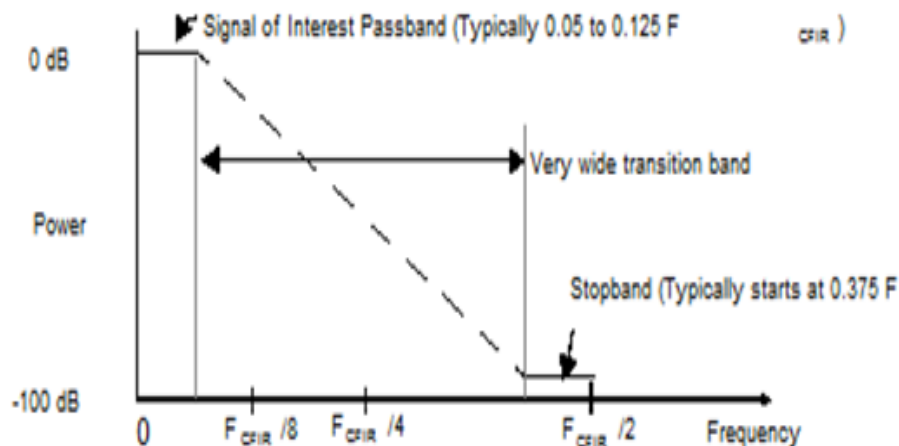


Рис.4 – а) Избыточная дискретизация уменьшает требования к крутизне спада ФНЧ [6]. б) Относительные полосы цифровых фильтров, обеспечивающие их простую реализацию

Цифровая фильтрация производится ступенчато, на высокой частоте фильтром без умножителей (CIS или фильтр Хогенауэра) с большим коэффициентом децимации, окончательная фильтрация происходит на низкой частоте. Это позволяет использовать меньше вычислительных ресурсов для реализации простых фильтров 5-7 порядка. Единственный цифровой фильтр работал бы на высокой частоте с умножителями и имел значительно более высокий порядок, что потребовало бы более мощного и скоростного вычислителя.

Для реализации и исследования указанного устройства создана модель в Simulink **Рис.5**.

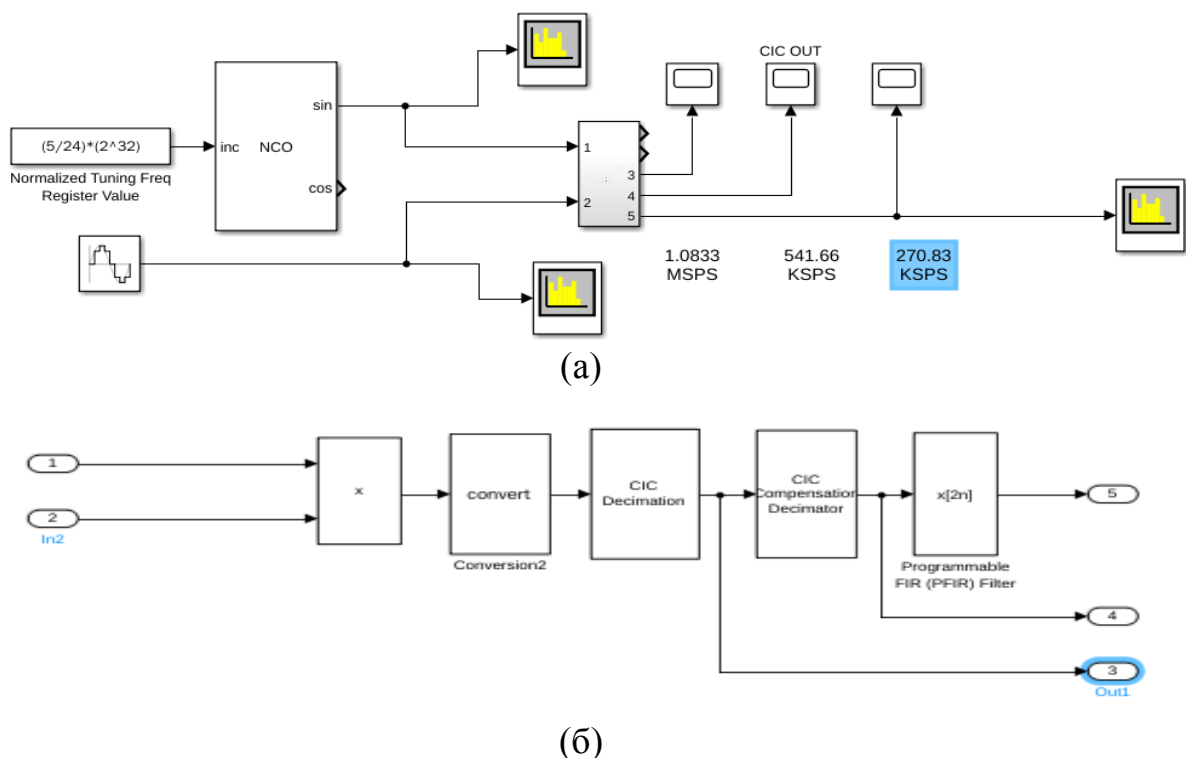


Рис.5 – а) Модель DDC из стандартных блоков Simulink. АЦП моделируется цифровым генератором синуса, NCO (цифровой генератор) – стандартный блок Simulink. б) Модель алгоритма DDC в виде подсистемы

Повторение известных из [5] настроек приводит к воспроизведению аналогичных результатов по виду цифровых сигналов и параметрам цифровых фильтров **Рис.7-13**.

Однако, такой путь программной реализации не единственный. Основным недостатком приведенной модели является требование высокой тактовой частоты процессора. Если в рассмотренном примере частота дискретизации выбрана примерно 70 миллионов отсчетов в секунду

(MSPS) при частоте ПЧ в 15 МГц, то вычислитель должен работать на частоте не менее 210 МГц, чтобы к моменту прихода следующего отсчета вычисления закончились (пусть перемножение занимает 3 такта).

Если вспомнить, что АЦП имеет свойство переноса спектров из высших зон Найквиста в первую зону [9], то этим можно воспользоваться. Процесс дискретизации сигнала, полоса которого находится вне первой зоны Найквиста, называется субдискретизацией (**Рис.6**).

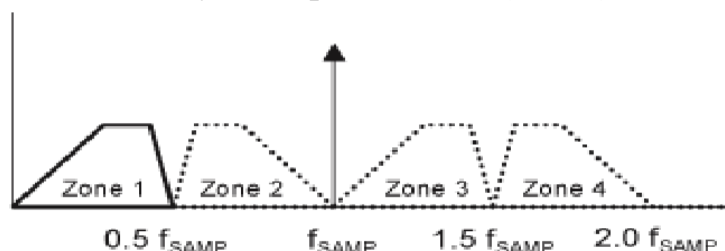


Рис.6 – Субдискретизация и перенос частоты между зонами Найквиста

Для программной реализации конвертера DDC протокола GSM выбран микроконтроллер STM32 хх, работающий на частоте 72 МГц, имеющий три встроенных АЦП, обеспечивающих в совместном режиме 7.2 MSPS. Данный МК тратит на любую операцию умножения не более 3-х тактов и может работать как с фиксированной, так и плавающей точкой.

При субдискретизации сигнала 14-15 МГц, из 7 зоны Найквиста от 14.4 до 16.8 МГц (от 3 F_s до 3,5 F_s) при частоте дискретизации $F_s = 4.8$ MSPS спектр переносится в 1 зону (от 0 до 2.4 МГц = $F_s/2$). Частота дискретизации 4.8 МГц соответствует теореме Котельникова для полосы сигнала 200 кГц. Указанная зона 14.4-16.8 МГц должна быть отфильтрована на входе АЦП. Далее алгоритм не меняется: спектр из первой зоны переносится перемножителем на нулевую частоту при помощи гетеродина на 0.6 МГц и фильтруется FIR- фильтром с децимацией равной 2. Перемножитель гарантированно получает результат к приходу нового отсчета АЦП, поскольку частота работы ядра много выше частоты дискретизации.

Автоматическая генерация кода С, определяющего программную работу конвертера в составе МК, производится на основе приведенной модели алгоритма Симулинк по известной методике. Для получения файла прошивки микроконтроллера STM32хх результат перекомпилируется в среде проектирования конкретного процессора (STM32CubeIDE). Настройка АЦП и его калибровка в работе не затрагиваются.

Результаты.

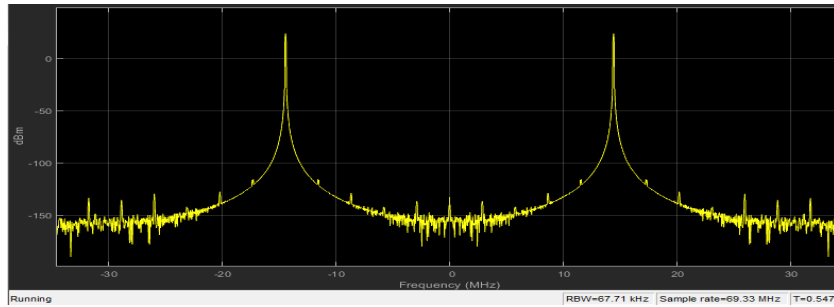


Рис.7 – Спектр цифрового сигнала $F_c = 14.4$ МГц, частота дискретизации $24/5 F_c$, тип данных – single (32- разрядный с плавающей запятой)

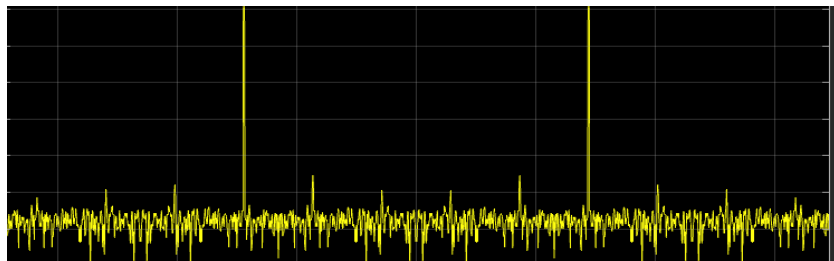


Рис.8 – Спектр сигнала NCO в формате Signed fix 16(1,15) без «dithering»

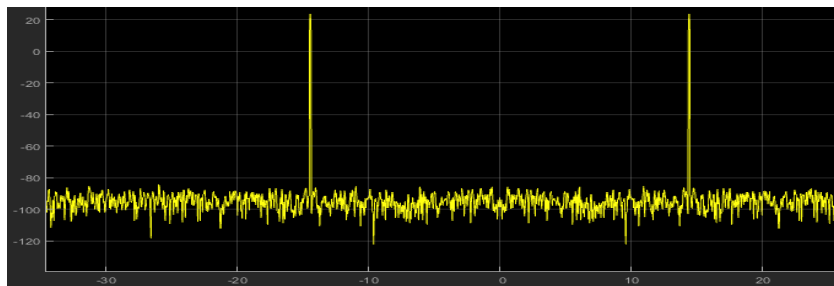


Рис.9 – Спектр с «dithering» - продукты дискретизации подавлены, но уровень шума выше

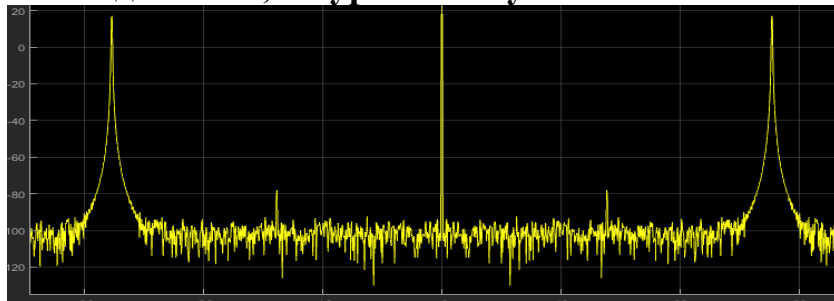


Рис.10 – Спектр сигнала после перемножителя и конвертера данных без фильтрации включает разностную и суммарную частоты. Также видна частота сигнала на уровне – 80-100 дБ

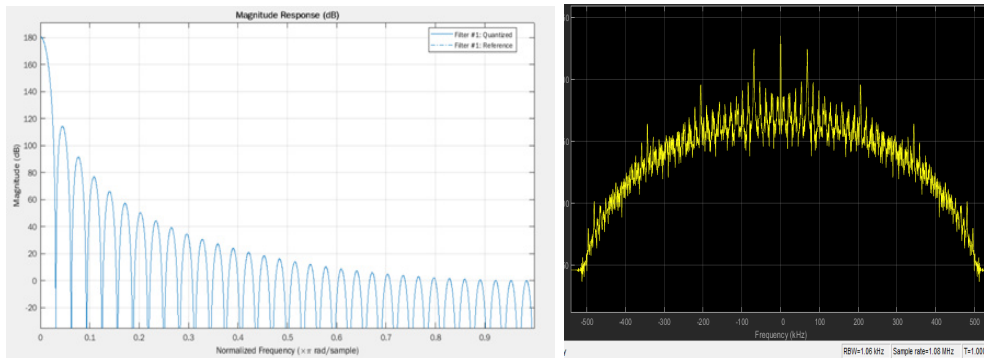


Рис.11 – АЧХ 6-каскадного CIC фильтра

Фильтр уменьшает частоту дискретизации ~ 70 MSPS в 64 раза и одновременно усиливает сигнал в $64 \cdot n$ раз. Первый пик подавления соответствует $0.03F_s$. Справа - спектр на выходе CIC дециматора в полосе пропускания ~ 1 МГц без корректора.

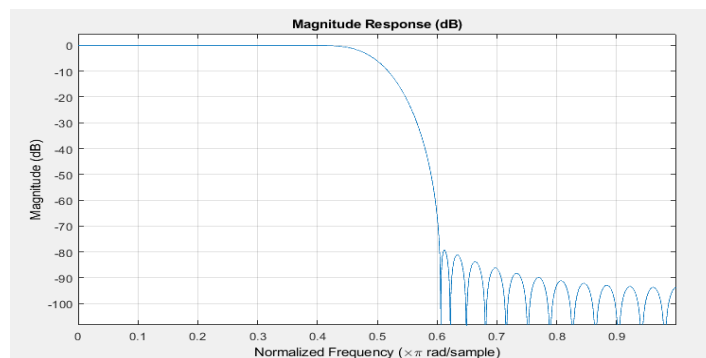


Рис.12 – АЧХ FIR фильтра

Сформирована конечная полоса пропускания в частях от частоты дискретизации.

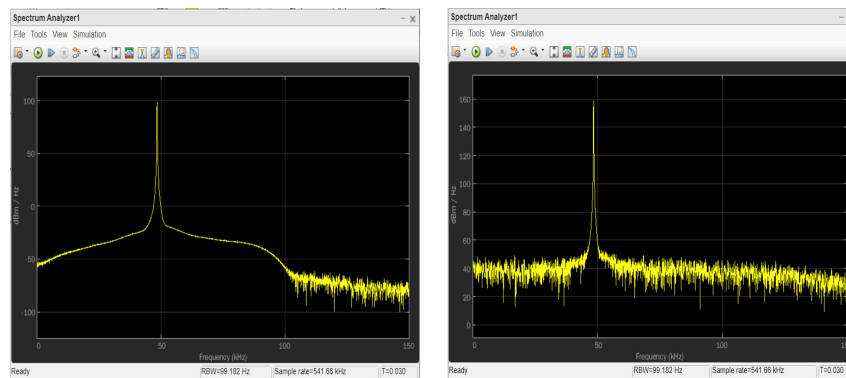


Рис.13 – а) Сигнал на выходе конвертера (формат single); б) сигнал на выходе конвертера (формат Signed Fix16 (1,15))

Заключение. Изучение смартфона стимулирует дополнительный интерес студентов к теме цифровой обработки сигналов. Использование Matlab(Simulink) для проектирования устройств на основе процессоров и ПЛИС позволяет на системном уровне конкретизировать схему устройства, определить параметры, интерфейсы блоков и на основе этого приступить к функциональному проектированию алгоритма цифровой обработки.

Концепция модельно-ориентированного проектирования позволяет основные усилия сосредоточить на создании и исследовании алгоритма, степени его соответствия ТЗ. При создании прошивки используется автоматическая генерация кода С для микроконтроллеров. Корректируя модель, можно не заботиться о написании, отладки и коррекции кода, что экономит время. Код является рабочим и обладает одним недостатком, иногда занимая много места, что устраняется либо оптимизацией (платно) либо ручной переработкой окончательного варианта.

Библиографический список

1. Сайт Модельно-ориентированное проектирование [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://exponenta.ru/mbd?ysclid=lk2j2yg17b555264096>
2. Ogloblin D.I. Model-based design in MATLAB/Simulink in mastering HDL languages / D.I. Ogloblin, V.Yu. Vetrov // *AIP Conference Proceedings* 2195. – 2019. – pp. 020071.
3. Дингес С.И. Схемотехника РЧ блоков систем связи с подвижными объектами: Учебное пособие / С.И. Дингес . – М.: МТУСИ, 2005. – 32 с.
4. Свайт Что такое DDC SDR [электрон. ресурс]. Режим доступа: http://r4n.su/?page_id=777&ysclid=l0amovzlk
5. Сайт Design and Analysis of a Digital Down Converter [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ug/design-and-analysis-of-a-digital-down-converter.html>
6. Проектирование цифровой и смешанной обработки сигналов: сборник / под ред. У. Кестера. – Москва: Техносфера, 2010. – 328 с.
7. Сайт Multi-standard quad DDC chip GC4016 data sheet [электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.allcomponents.ru/ti/gc4016.htm>
8. Сайт Методика разработки цифрового приемника [электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://microsin.net/programming/dsp/basics-of-designing-a-digital-radio-receiver.html?ysclid=lk0yaydzw0970867930>
9. Сайт Методы преобразования узкополосных радиосигналов из аналоговой формы в цифровую [электрон. ресурс]. Режим доступа: http://kprf.mipt.ru/attachments/article/54/лекция_9_окт_2017.pdf

Bibliograficheskiy spisok

1. Sajt Model'no-orientirovannoe proektirovanie [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://exponenta.ru/mbd?ysclid=lk2j2yg17b555264096>
2. Ogloblin D.I. Model-based design in MATLAB/Simulink in mastering HDL languages / D.I. Ogloblin, V.Yu. Vetrov // AIP Conference Proceedings 2195. – 2019. – pp. 020071.
3. Dinges S.I. Skhemotekhnika RCH blokov sistem svyazi s podvizhnymi ob"ektami: Uchebnoe posobie / S.I. Dinges . – M.: MTUSI, 2005. – 32 s.
4. Svajt CHto takoe DDC SDR [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: http://r4n.su/?page_id=777&ysclid=l0amovzlk
5. Sajt Design and Analysis of a Digital Down Converter [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ug/design-and-analysis-of-a-digital-down-converter.html>
6. Proektirovanie cifrovoy i smeshannoy obrabotki signalov: sbornik / pod red. U. Kestera. – Moskva: Tekhnosfera, 2010. – 328 c.
7. Sajt Multi-standard quad DDC chip GC4016 data sheet [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.allcomponents.ru/ti/gc4016.htm>
8. Sajt Metodika razrabotki cifrovogo priemnika [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://microsin.net/programming/dsp/basics-of-designing-a-digital-radio-receiver.html?ysclid=lk0yaydzw0970867930>
9. Sajt Metody preobrazovaniya uzkopolosnyh radiosignalov iz analogovoy formy v cifrovuyu [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: http://kprf.mipt.ru/attachments/article/54/lekciya_9_okt_2017.pdf

¹Оглоблин Дмитрий Игоревич, к.т.н., доцент ogldi@bmstu.ru, Россия, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

²Трудоношин Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент, trudonoshinva@bmstu.ru, Россия, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

³Князева Светлана Юрьевна, старший преподаватель knyazeva@bmstu.ru, Россия, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

END-TO-END DESIGN OF A DIGITAL RECEIVER IN SIMULINK.

D.I. Ogloblin, V.A. Trudonoshin, S.Yu. Knyazeva

The focus of the article is teaching students the methodology of Model-Based Design using the example of the digital part of a well-known mobile GSM

receiver. The digital part consists of physical components (ADC, calculator), interfaces and programs that transfer the IF signal to zero frequency. The architecture is described in System Composer (Simulink) and contains a calculator and buffer FIFO memory blocks that allow processing data in batches in multitasking mode. The algorithm model is presented in Simulink and includes a multiplier and a set of digital decimator filters. ADC sampling rate and digital filter settings have been selected. The implementation of the converter is proposed based on the STM32xx microcontroller. The properties of the ADC in terms of signal transfer from the higher Nyquist zones to the first are used. To create software, automatic code generation C of the resulting Simulink model was performed with recompilation in the STM32CubeIDE.

Keywords: system analysis, analog-to-digital converter, digital down converter, model-based design, microcontroller.

Ogloblin Dmitry Igorevich, candidate of technical sciences, docent, ogldi@bmstu.ru, Russia, Moscow State Technical University N.E. Bauman

Trudonoshin Vladimir Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, trudonoshinva@bmstu.ru, Russia, Moscow State Technical University N.E. Bauman

Knyazeva Svetlana Yurievna, senior lecturer, knyazeva@bmstu.ru, Russia, Moscow State Technical University N.E. Bauman

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЛОГИСТИКИ

Моисеев Д.В.¹, Шокин А.Г.²

Аннотация. Рассматриваются вопросы построения полимодельного комплекса для решения задач оптимизации информационной логистики в системах, построенных по принципу «роя» с применением сетецентрического управления. Решение задач реального времени в парадигме логистических информационных технологий, когда обстоятельства требуют не просто решения, а максимально быстрого, взвешенного и при этом максимально эффективного подхода, требует развития новых методов прикладной математики и информатики. В рамках данной работы выполнено построение комплекса математических моделей для распределительных задач векторной оптимизации по совокупности скалярных критериев: стоимости передачи информации, времени доставки сообщений, помехоустойчивости и вероятности безотказной работы.

Ключевые слова. Сетецентрическая модель, логистические информационно-интеллектуальные система, модель минимизации стоимостных показателей информационного трафика, модель минимизации временных потерь, связанных с обеспечением информационного обмена модель максимизации надёжностных функций обеспечения сетевого трафика, модель максимизации показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

Введение. Современные сетевые инфраструктуры любого уровня требуют решения комплексных задач обеспечения как надежности, так и пропускной способности. Проблематика обусловлена использованием в процессе создания и эксплуатации инфраструктуры различных технологий, и сред распространения. Решение сложной задачи управления и диспетчеризации информационной инфраструктуры вызывает проблему учета множества динамических, разнородных характеристик. В большинстве своем, характеристики носят стохастический и не всегда детерминированный характер, однако среди них есть и стационарные параметры, а также целые комплексы факторов внешнего воздействия, имеющих как природный, так и техногенный характер [1-2].

Наличие большого числа характеристик, влияющих на эксплуатационные показатели сетевых транспортных потоков требует развития новых специфических методов моделирования и принятия решения, численных методов, принятия решений в условиях

неопределенности, рисков, исследования операций в нечёткой постановке с использованием вероятностных критериев оценивания. Системы, основанные на принципе «роя» с применением сетецентрического управления, используют весь перечень доступных систем связи, которые образуют сложную не однородную по своим параметрам структуру, к которой предъявляются требования надежности и пропускной способности, обуславливающих само существование таких систем [3].

Системы, работающие в режиме «роя», на базе сетецентрической модели приводят к появлению ряда проблем, связанных с динамичностью самого «роя» – количеством компонент, его связями и их состояниями, многогранностью использования технологий, взаимное влияние, использования метода синтеза [4-5]; целый ряд других аспектов делают задачи моделирования, оптимизации построения структур и принятия решений сложным не только с точки зрения получения самих показателей но и с точки зрения выбора методов их получения.

Решение задач реального времени в парадигме логистических информационных технологий, когда обстоятельства требуют не просто решения, а максимально быстрого, взвешенного и при этом максимально эффективного подхода, требует развития новых методов прикладной математики и информатики. К данным методам стоит отнести такие задачи как теория расписаний, решение целочисленных и нелинейных задач, теории сетей, исследование задач в нечеткой постановке, моделирования, принятия решений в условиях неопределенности с учетом рисков.

Полимоделный комплекс функциональных задач оптимизации информационной логистики. Использование логистических информационно-интеллектуальных систем (ЛИИС) [6-7], позволяет резко повысить скорость и качество принимаемых решений особенно для систем реального времени, обеспечить снижение рутинной нагрузки на операторов, снизить загруженность каналов информационного обмена, соблюдать напряжённые графики поставок компонент технического обеспечения, получить высокую реактивность процессов корректировки условий и требований выполнения задач, системно и комплексно решать многие часто возникающие проблемные вопросы.

В рамках данной работы выполнено построение комплекса математических моделей для распределительных задач векторной оптимизации по совокупности скалярных критериев:

- стоимость передачи информации;
- время доставки сообщений;
- помехоустойчивость;
- вероятность безотказной работы (надежность).

Наиболее общей формальной моделью для задачи информационной логистики, по видимому, являются двудольные графы $G = \langle A, B \rangle$ с множествами вершин (долями графа) X и Y ($X, Y \neq \emptyset$, $X \cup Y = V$, $X \cap Y = \emptyset$), каждое ребро G инцидентно определенной вершине из X и некоторой вершине из Y . В графе G важен основной структурный элемент, подлежащий определению при решении оптимизационных задач, - паросочетание - это подграф графа G , состоящий из двух смежных вершин и ребра между ними. Множеству паросочетаний соответствует бинарная матрица элементов, подлежащих определению в процессе решения оптимизационной задачи. Известным образом определяются максимальное и совершенное паросочетания, играющие важную роль в построении алгоритмических процедур, ориентированных на программную реализацию.

Каждое ребро двудольного графа, определяющее некоторое паросочетание, является элементом сетевого трафика, обеспечивающего прохождение информации по каналу связи с помехой с использованием функционального маршрута: <подготовка информации; первичное без избыточного кодирования – сжатие; кодирование информации с использованием выбранного метода обеспечения помехоустойчивости; передача по каналу связи с помехами; восстановление информации; декодирование информации; информация в первичном виде>.

В полимодельный базовый комплекс оптимизации функциональных задач информационной логистики входят следующие модели:

1. Минимизации стоимостных показателей информационного трафика;
2. Минимизации временных потерь, связанных с обеспечением информационного обмена;
3. Максимизации надёжных функций обеспечения сетевого трафика;
4. Максимизации показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений.

Описание модельных идентификаторов. Все вышеперечисленные модели имеют сквозные идентификаторы, описывающие связывающие их характеристики.

M – множество узлов – источников (передатчиков) информации $M\{m_r\}$.

$$r = 1, \dots, |R_o| \text{ или } r \in R_o$$

N – множество доступных каналов передачи информации $N\{n_s\}$.

$$s = 1, \dots, |S_o| \text{ или } s \in S_o$$

O – множество узлов – потребителей (приемников) информации $O\{o_h\}$. $h = 1, \dots, |H_o|$ или $h \in H_o$

L – множество доступных средств помехоустойчивого кодирования $L\{L_u\}$.

$$u = 1, \dots, |U_o| \text{ или } u \in U_o$$

R_o, S_o, H_o, U_o – опорные множества допустимых индексов.

Основные переменные, образующие исходный факторный базис:

I_{rshu} – объём передачи данных от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала за операционную единицу времени с использованием кода типа u ;

V_{rshu} – скорость передачи данных от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

t_{rshu} – время передачи данных от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

C_{rshu} – стоимость передачи единицы объема данных от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

λi_{rshu} – интенсивность отказов (сбоев) при подготовке информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

λc_{rshu} – интенсивность отказов (сбоев) в канале при передаче информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

λg_{rshu} – интенсивность отказов (сбоев) при приеме информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

$p_{rshu} = p i_{rstu}(t) \cdot p c_{rshu}(t) \cdot p g_{rshu}(t)$ – вероятность безотказной передачи информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u .

где $p i_{rstu}(t)$ – вероятность безотказной работы источника информации;

$p c_{rshu}(t)$ – вероятность безотказной работы канала связи;

$p g_{rshu}(t)$ – вероятность безотказной работы приемника информации.

Матрица модельных решений. Матрица модельных решений X в зависимости от начальных условий и особенностей конкретной задачи может быть вырожденной.

$X \subset A_0$ – пустое множество (в случае особо жестких требований и условий), либо содержать несколько решений, являющихся эффективными ($X \subset A_0$), либо содержать единственное решение – оптимальное ($X \subset A_{opt}$). Первоначально матрица X определена на множестве допустимых решений ($X \subset A_d$), подмножеством которого является множество доступных ($X \subset A_m$) для реализации в данный момент решений.

Структура матрицы X существенно неоднородна, геометрически ее можно интерпретировать как четырехмерный параллелепипед размерности R_0, S, H_0, U_0 , содержащий только координаты целочисленных точек, принадлежащих ему. Исходя из содержательного смысла для элементов матрицы X обязательно выполнение одновременно следующих условий равенств:

$$\begin{cases} \forall u \in U : \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} x_{rshu} = 1 \\ \forall h \in H : \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \\ \forall s \in S : \sum_{r \in R} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \\ \forall r \in R : \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} x_{rshu} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Проинтерпретируем для примера последнее равенство системы (1): для каждого источника информации необходимо осуществить выбор единственных (уникальных для него) приемника информации, канала передачи и способа кодирования.

Равенства (1) интерпретируются как единственность использования для каждой пары передатчик–приемник выбранных канала передачи $s \in S_0$ и кода $u \in U_0$, т.е. в каждой размерности четырехмерной матрицы X имеется один и только один единичный элемент $x_{rshu} \in B$, где B – множество булевых чисел. Для краткости в моделях условие (1) совместно с условием $x_{rshu} \in B$ будем обозначать как

$$\left(\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} x_{rshu} \right) \cap (x_{rshu} \in B) = 1. \quad (2)$$

В наиболее простом случае при пуассоновских потоках отказов, которые чаще всего используются для анализа надежности технических систем, имеем:

$p_{rshu}(t) = \exp(-\lambda_{rshu} t)$ – вероятность безотказной передачи информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

$pi_{rshu}(t) = \exp(-\lambda i_{rshu} t)$ – вероятность безотказной работы источника информации;

$pc_{rshu}(t) = \exp(-\lambda c_{rshu} t)$ – вероятность безотказной работы канала связи;

$pg_{rshu}(t) = \exp(-\lambda g_{rshu} t)$ – вероятность безотказной работы приемника информации, $r \in R_0, s \in S_0, h \in H_0, u \in u_0$.

Если считать, что отказы в передатчике, канале и приемнике мало зависимы в совокупности, то:

$$\forall u \in U : \lambda_{rshu} = \lambda i_{rshu} + \lambda c_{rshu} + \lambda g_{rshu}$$

Таким образом вероятность безотказной работы с точностью до бесконечно малых второго порядка равна

$$P_{rshu} = \exp(\lambda_{rshu} \cdot t_{rshu}) = 1 - \lambda_{rshu} \cdot t_{rshu}$$

Определим суммарную стоимость передачи информации от всех источников ко всем приемникам за один цикл:

$$C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cc_{rshu} + cg_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \quad (3)$$

где: ci_{rshu} – стоимость подготовки единицы объема информации при передаче от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

cc_{rshu} – стоимость использования выбранного канала при передаче единицы объема информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

cg_{rshu} – стоимость обеспечения приема единицы объема информации при передаче от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u ;

Определим суммарное время передачи информации от r -ого источника к o -му приемнику посредством n -го канала с использованием кода u .

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} =$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tc_{rshu} + tg_{rshu}) \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu}$$

Суммарная системная вероятность P безотказной работы:

$$P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda c_{rshu} - \lambda g_{rshu}) \cdot t_{rshu} x_{rshu}]$$

Уровень помехоустойчивости при использовании помехоустойчивого кода:

$$K_{rshu} = KI_{rshu} \cdot KC_{rshu} \cdot KG_{rshu}$$

где K_{rshu} – уровень помехоустойчивости для источника информации r , канала s , приемника h с использованием кода u .

При решении оптимизационных задач экстремум функции линейной формы и ее логарифма в интересующей нас области совпадают, поэтому вместо показателя K_{rshu} далее будем использовать его логарифм:

$$KL_{rshu} = \ln K_{rshu} = \ln KI_{rshu} + \ln KC_{rshu} \cdot KG_{rshu} =$$

$$= KIL_{rshu} + KCL_{rshu} + KGL_{rshu}$$

$$Q = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KCL_{rshu} + KGL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu}$$

Модели дискретной оптимизации с многоиндексной структурой базовых функциональных задач. С-модель (модель минимизации стоимостных показателей информационного трафика). Минимизировать стоимость передачи данных C путем выбора таких элементов четырехмерной матрицы X при выполнении ограничений на: время передачи информации, вероятность безотказной работы(надежности), уровень помехоустойчивости и выполнения условия (2.2).

$$C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} x_{rshu} =$$

$$= \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cc_{rshu} + cg_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} \rightarrow \min$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tc_{rshu} + tg_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot i_{rshu} < T_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp(-\lambda i_{rshu} - \lambda c_{rshu} - \lambda g_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu} > P_0 \\ Q = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KCL_{rshu} + KGL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\ (\sum_{r \in R} |\sum_{s \in S} |\sum_{h \in H} |\sum_{u \in U} x_{rshu}|) \cap (x_{rshu} \in B) = 1. \end{cases}$$

Решение этой задачи, если оно существует, позволяет найти план использования заданной сети каналов с таким назначением каналов передачи информации между всеми источниками и приемниками, который минимизирует стоимость телекоммуникации при обеспечении требуемого уровня отказоустойчивости(надежности), помехоустойчивости, а также времени передачи.

Т-модель (модель минимизации временных потерь, связанных с обеспечением информационного обмена). Минимизировать Т путем выбора таких элементов трехмерной матрицы X при выполнении ограничений на суммарную стоимость передачи информации, вероятность безотказной работы, уровень помехоустойчивости.

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tc_{rshu} + tg_{rshu}) \cdot x_{rshu} \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cc_{rshu} + cg_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp(-\lambda i_{rshu} - \lambda c_{rshu} - \lambda g_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu} > P_0 \\ Q = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} - KCL_{rshu} - KGL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\ (\sum_{r \in R} |\sum_{s \in S} |\sum_{h \in H} |\sum_{u \in U} x_{rshu}|) \cap (x_{rshu} \in B) = 1. \end{cases}$$

Р-модель (модель максимизации надёжностных функций обеспечения сетевого трафика). Максимизировать Р путем выбора оптимального источника сообщений, канала связи, приемника сообщений и способа кодирования при выполнении ограничений на суммарную стоимость передачи информации, время передачи информации, уровень помехоустойчивости.

$$P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp[(-\lambda i_{rshu} - \lambda c_{rshu} - \lambda g_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot x_{rshu}] \rightarrow \max,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cc_{rshu} + cg_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tc_{rshu} + tg_{rshu}) \cdot x_{rshu} < T_0 \\ Q = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KCL_{rshu} + KGL_{rshu}) \cdot x_{rshu} \cdot t_{rshu} > K_0 \\ (\sum_{r \in R} |\sum_{s \in S} |\sum_{h \in H} |\sum_{u \in U} x_{rshu}) \cap (x_{rshu} \in B) = 1. \end{array} \right.$$

К-модель (модель максимизации показателей помехоустойчивости передаваемых сообщений). Максимизировать K путем выбора такого шифра l при выполнении ограничений на суммарную стоимость передачи информации, время передачи информации, вероятность безотказной работы.

$$K = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (KIL_{rshu} + KCL_{rshu} + KGL_{rshu}) \rightarrow \max,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot c_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} = \\ = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ci_{rshu} + cc_{rshu} + cg_{rshu}) \cdot t_{rshu} \cdot i_{rshu} \cdot x_{rshu} < C_0 \\ T = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} t_{rshu} \cdot x_{rshu} = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} (ti_{rshu} + tc_{rshu} + tg_{rshu}) \cdot x_{rshu} < T_0 \\ P = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{u \in U} \exp(-\lambda i_{rshu} - \lambda c_{rshu} - \lambda g_{rshu}) \cdot t_{rshu} > P_0 \\ (\sum_{r \in R} |\sum_{s \in S} |\sum_{h \in H} |\sum_{u \in U} x_{rshu}) \cap (x_{rshu} \in B) = 1. \end{array} \right.$$

Предлагаемые модели являются моделями дискретной (Булевой) оптимизации с многоиндексной структурой. При малых размерностях их можно редуцировать к двухиндексным моделям, для решения которых применимы известные алгоритмы комбинаторной оптимизации [6, 7]. В случае задач значительной размерности возникает необходимость разработки специальных методов решения, включающих в себя технологии вероятностного моделирования, искусственного интеллекта (ИИ) и нейронных сетей (НС). Большой интерес вызывает использование

предложенных моделей при вероятностной форме представления данных [8 – 10].

Выводы. Предложен полимодельный комплекс принятия решений, включающий в себя такие показатели как стоимость, время, надежность и помехоустойчивость ориентированный на применение его лицом, принимающим решение, в задачах эксплуатации и использования каналов информационного обмена, основанных на принципе «роя» с применением сетцентрического управления.

Предлагаемые модели структурно представляют собой задачи дискретной оптимизации многоиндексной структуры, решение которых в общем случае требует создания специальных методов и информационных технологий.

Комплекс моделей является базовым и может быть дополнен по составу как информационного описания входного факторного пространства, так и выходного – критериального.

На основе концептуального описания, мультиагентной модели, разработан и исследован комплекс моделей обеспечения гарантированного уровня информационного обмена по каналам связи в следующих направлениях: модель минимизации временных потерь, связанных с обеспечением информационного обмена (обеспечение критичности информационного обмена в различных ситуациях); модель максимизации надёжностных функций обеспечения информационного объёма; модель максимизации показателей помехозащищённости передаваемых сообщений (гарантийная достоверность передаваемых по информационным каналам данных в условиях дестабилизирующих воздействий естественного и искусственного характера); модель минимизации стоимостных показателей каналов информационного обмена.

Библиографический список

1. Скатков А.В. Структурный синтез каналов информационных обменов для беспилотных транспортных средств / А.В. Скатков, Д.В. Моисеев, А.А. Брюховецкий [и др.]. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2020. – 320 с.
2. Скатков А.В. Методы и модели многоуровневой оптимизации структурного синтеза КИО БТС / А.В. Скатков, Д.В. Моисеев, А.А. Брюховецкий, Ю.В. Доронина. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2023. – 176 с.

3. Шкинов В.В. Сетецентрический принцип построения структуры управления потоком беспилотных судов и создание модели автоматической системы управления транспортным процессом методом синтеза управляющей сети Петри / В.В. Шкинов, В.В. Попов // Журнал транспортное дело. – 2018. – №6. – С. 252-256
4. Кулешов И.А. Анализ методов синтеза структуры сетей связи / И.А. Кулешов, А.В. Бабкин, Ю.А. Малахов, М.А. Дуплинский // Научно-технические ведомости СПбГТУ 1'. – 2010. – С. 106-112
5. Батенков К.А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости / К.А. Батенков, А.А. Батенков // Цифровые информационно-телекоммуникационные технологии – Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып.3(58). – С. 128-157.
4. Макаренко С.И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения / С.И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – №2. – С. 18-68.
5. Лосев Е.Ф. Оптимизация управленческих задач технического обеспечения флота с помощью логистических систем / Е.Ф. Лосев, Э.И. Мухитов // Военная мысль. – 2008. – №8. – С. 53 – 58.
6. Дубов Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
7. Гуляницкий Л.Ф. Решение задач комбинаторной оптимизации алгоритмами ускоренного вероятностного моделирования / Л.Ф. Гуляницкий // Компьютерная математика. – 2004. – №1. – С. 64–72.
6. Моисеев Д.В. Вероятностное кодирование с множественным исправлением ошибок / Д.В. Моисеев, А.Г. Шокин, Е.С. Серяк // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2021. – № 2(14). – С. 51-58.
7. Шокин А.Г. Новые методы помехоустойчивого кодирования информации / А.Г. Шокин, Н.Е. Сапожников, Д.В. Моисеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т.6, №9(60). – С. 26-30.
8. Моисеев Д.В. Выполнение арифметических операций сложения и умножения над вероятностно представленными параллельными данными / Д.В. Моисеев, Н.Е. Сапожников // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. – 2015. – Т.1, №5. – С. 46-54.

Bibliograficheskiy spisok

1. Skatkov A.V. Strukturnyj sintez kanalov informacionnyh obmenov dlya bespilotnyh transportnyh sredstv / A.V. Skatkov, D.V. Moiseev, A.A. Bryuhoveckij [i dr.]. – Simferopol': Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Izdatel'stvo Tipografiya «Arial», 2020. – 320 s.
2. Skatkov A.V. Metody i modeli mnogourovnevoj optimizacii strukturnogo sinteza KIO BTS / A.V. Skatkov, D V. Moiseev, A.A. Bryuhoveckij, YU.V. Doronina. – Simferopol': Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Izdatel'stvo Tipografiya «Arial», 2023. – 176 s.
3. SHkinov V.V. Setecentricheskij princip postroeniya struktury upravleniya potokom bespilotnyh sudov i sozdanie modeli avtomaticheskoy sistemy upravleniya transportnym processom metodom sinteza upravlyayushchej seti Petri / V.V. SHkinov, V.V. Popov // ZHurnal transportnoe delo. – 2018. – №6. – S. 252-256
4. Kuleshov I.A. Analiz metodov sinteza struktury setej svyazi / I.A. Kuleshov, A.V. Babkin, YU.A. Malahov, M.A. Duplinskij // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU I'. – 2010. – S. 106-112
5. Batenkov K.A. Analiz i sintez struktur setej svyazi po determinirovannym pokazatelyam ustojchivosti / K.A. Batenkov, A.A. Batenkov // Cifrovye informacionno-telekommunikacionnye tekhnologii – Trudy SPIIRAN. – 2018. – Vyp.3(58). – S. 128-157.
4. Makarenko S.I. Perspektivy i problemnye voprosy razvitiya setej svyazi special'nogo naznacheniya / S.I. Makarenko // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. – 2017. – №2. – S. 18-68.
5. Losev E.F. Optimizaciya upravlencheskih zadach tekhnicheskogo obespecheniya flota s pomoshch'yu logisticheskix sistem / E.F. Losev, E.I. Muhitov // Voennaya mysl'. – 2008. – №8. – S. 53 – 58.
6. Dubov YU.A. Mnogokriterial'nye modeli formirovaniya i vybo-ra variantov sistem / YU.A. Dubov, S.I. Travkin, V.N. YAkimec. – M.: Nauka, 1986. – 296 s.
7. Gulyanickij L.F. Reshenie zadach kombinatornoj optimizacii algoritmami uskorenogo veroyatnostnogo modelirovaniya / L.F. Gulyanickij // Komp'yuternaya matematika. – 2004. – №1. – S. 64–72.
6. Moiseev D.V. Veroyatnostnoe kodirovanie s mnozhestvennym ispravleniem oshibok / D.V. Moiseev, A.G. SHokin, E.S. Seryak // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2021. – № 2(14). – S. 51-58.
7. SHokin A.G. Novye metody pomekhoustojchivogo kodirovaniya informacii / A.G. SHokin, N.E. Sapozhnikov, D.V. Moiseev // Vostochno-

Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij. – 2012. – Т.6, №9(60). – S. 26-30.

8. Moiseev D.V. Vypolnenie arifmeticheskikh operacij slozheniya i umnozheniya nad veroyatnostno predstavlennymi parallel'nymi dannymi / D.V. Moiseev, N.E. Sapozhnikov // Mnogoyadernye processory, parallel'noe programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotki signalov. – 2015. – Т.1, №5. – S. 46-54.

¹Моисеев Дмитрий Владимирович, д.т.н., профессор, dvmoiseev@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Шокин Александр Геннадиевич, к.т.н. доцент, asshokin@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION OF INFORMATION LOGISTICS

D.V. Moiseev, A.G. Shokin

The article discusses the issues of constructing a polymodel complex for solving problems of optimizing information logistics in systems built on the "swarm" principle using network-centric management. Solving real-time problems in the paradigm of logistics information technologies, when circumstances require not just a solution, but the fastest, most balanced and at the same time the most effective approach, requires the development of new methods of applied mathematics and computer science. Within the framework of this work, the construction of a complex of mathematical models for distributive problems of vector

Keywords: network-centric model, logistic information-intelligent system, model of minimizing the cost indicators of information traffic, model of minimizing time losses associated with ensuring information exchange, model of maximizing the reliability functions of providing network traffic, model of maximizing the noise immunity of transmitted messages.

Moiseev Dmitry Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, dvmoiseev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Shokin Alexander Gennadievich xandidate of technical science, docent, asshokin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МЕТОДЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В МОДЕЛИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКОГО ВАЛА

Бохонский А.И.¹, Чалая Е.С.²

Аннотация. Для нежесткого вала постоянного диаметра, закрепленного в центрах, построена модель компенсации упругих перемещений от силы резания при автоматической токарной обработке. Используются условия равновесия плоской системы сил и метод начальных параметров. Из равенства нулю упругого перемещения по направлению силы резания от компенсирующего воздействия и силы резания найден закон изменения локального компенсирующего (управляющего) воздействия как функции координаты расположения силы резания при ее движении вдоль заготовки. Компенсация упругого перемещения (или управления деформированием) приводит к снижению погрешности формы и размеров детали.

Ключевые слова. Токарная обработка, вал конечной жесткости, методы прикладной механики, упругое деформирование, модели компенсации перемещений, точность обработки.

Введение.

На практике необходимо использовать такие методы токарной обработки деталей конечной жесткости, при которых перемещение сечения, взаимодействующего с силой резания (обусловленных общими деформациями заготовки) будут малы.

Возникает задача в таком непрерывном управляемом деформировании обрабатываемой заготовки, при котором исключаются упругие линейные перемещения по направлению силы резания, обусловленные общими упругими деформациями всей заготовки.

Не смотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования компенсации упругих перемещений или даже с непрерывным управляемым деформированием, должного внедрения в производство результатов исследований не произошло и до настоящего времени не создан токарный станок, обеспечивающий целенаправленное непрерывное изменение напряженно-деформированного состояния обрабатываемой нежесткой заготовки. Очевидно, что в связи с упругим перемещением заготовки не удастся снять требуемую толщину (или объем) материала, при котором исключаются известные погрешности – типа бочкообразность либо седловидность. Задачам повышения точности автоматической токарной обработки деталей посвящены классические работы [1-3] и ряд других.

Автоматическая токарная обработка нежестких заготовок предполагает реализацию специальных методов, основанных на учете упругих перемещений самой заготовки от силы резания, которые обычно приводят к образованию погрешности формы и размеров детали. На необходимость применения методов компенсации упругих перемещений обращено внимание, например, в работах [4-9].

В [10] исследована модель управления непрерывным деформированием заготовки конечной жесткости при ее закреплении в патроне и в центре; обращено внимание на определенные координаты приложения компенсирующего (управляющего) воздействия для полного устранения упругих перемещений по направлению силы резания.

Представляет интерес дальнейшее совершенствование такой модели управления деформированием при закреплении заготовки в центрах.

Целью исследования является использование методов механики деформируемого твердого тела для получения локального управляющего воздействия при условии полного устранения линейных упругих перемещений по направлению радиальной составляющей силы резания.

Рассматривается линейная система, для которой справедливы принцип суперпозиции и независимость действия сил. Заготовка имеет три участка деформирования при действии радиальной составляющей силы резания и компенсирующего воздействия (**Рис.1**).

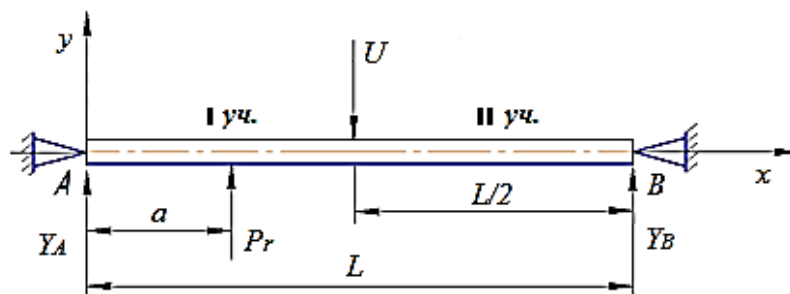


Рис.1 – Схема токарной обработки нежесткого вала

1. Определение $U(a)$ при движении силы резания Pr на I участке.

При любом положении силы резания ($\frac{L}{2} \geq a \geq 0$) выполняются статические условия равновесия и в случае приложения только силы Pr :

$$\sum_{k=1}^n M_A = 0; \quad Y_B \cdot L - Pr \cdot a = 0; \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n M_B = 0; \quad -Y_A \cdot L - P_r(L - a) = 0.$$

Проверка в виде $\sum_{k=1}^n F_{ky} = 0$ подтверждает правильность нахождения реакций. С использованием метода начальных параметров выражение для перемещения сечения заготовки по направлению действия силы P_r записывается следующим образом:

$$W_p(a) = \theta_0 \cdot a + \frac{Y_A \cdot a^3}{6EJ},$$

где θ_0 – угол поворота сечения в начале координат; EJ – жесткость при изгибе. Кинематический начальный параметр θ_0 находится из условия равенства нулю перемещения по направлению реакции опоры B , т.е.

$$\theta_0 \cdot a + \frac{Y_A \cdot L^3}{6EJ} + \frac{P_r(L - a)^2}{6EJ} = 0.$$

При учете $Y_A = -\frac{P_r(L - a)}{L}$ следует выражение для угла поворота (начального кинематического параметра):

$$\theta_0 = \frac{P_r}{6EJL} (L^3 - L^2 \cdot a - (L - a)^3) = 0. \quad (2)$$

С учетом (1) и (2) выражение для перемещения $W(a)$ принимает вид:

$$W(a) = \frac{P_r \cdot a (L^3 - L^2 \cdot a - (L - a)^3 - a^2 \cdot L + a^3)}{6EJL}.$$

Аналогично находится выражение $W(a)$ при действии только компенсирующего воздействия U . В этом случае реакция $Y_A = \frac{U}{2}$ и после определения начального параметра, получено следующее выражение для перемещения:

$$W_U(a) = \frac{U}{4EJ} \left(-\frac{L^2 \cdot a}{4} + \frac{a^3}{3} \right).$$

С учетом принципа независимости действия сил компенсирующее воздействие находится из условия равенства перемещений от P_r и U :

$$W_p(a) + W_U(a) = 0.$$

На первом участке:

$$U(a) = \frac{16P_r \cdot a(L-a)^2}{L(3L^2 - 4a^2)}. \quad (3)$$

Проверки подтверждают достоверность полученных результатов ($W(a) = 0$):

$$\theta(a) = 0, U(a) = P_r, W(a) = 0.$$

Для управления (3) возможна замена аналитической функцией $U_1(a) = c_1a - c_2a^2$, т.е.

$$U_1(a) = \frac{4P_r \cdot a}{L} \left(1 - \frac{a}{L} \right), \quad (4)$$

которая отражает зависимости компенсирующего управления от координаты положения силы резания. Функции (3) и (4) с высокой точностью подтверждают их близость.

При движении резца на втором участке для получения функций компенсации $U(a)$ использованы следующие аналитические зависимости.

Условия равновесия:

$$Y_A + Y_B + P_r - U = 0;$$

$$Y_A \cdot L + P_r \cdot a - \frac{U \cdot L}{2} = 0.$$

Для определения начального параметра условие равенства прогиба на опоре B принимает вид:

$$\theta_0 \cdot L + \frac{P_r(L-a)^3 + Y_A \cdot L^3 - U(L/2)^3}{6EJ} = 0.$$

Условие равенства перемещения по направлению P_r , т.е.

$$\theta_0 \cdot a + \frac{Y_A \cdot L^3 - U(a - L/2)^3}{6EJ} = 0.$$

Из системы уравнений (11), (12), (13) получено:

$$U_1(a) = -\frac{16P_r \cdot a^2(L-a)}{L(L^2 - 8aL + 4a^2)}.$$

Графики $U(a)$, $U_1(a)$, объединены в один и изображены на **Рис.2**. Исходные данные $P_r=100H$; $L=0,2m$. Для построения общих графиков компенсации перемещения использована функция Maple:.

>g:=plot (U, a=0..B):

>y:=plot (U1, a=B..L):

>k:=plot (Ur, a=0..L):

>with (plots): display ({g, y, k});

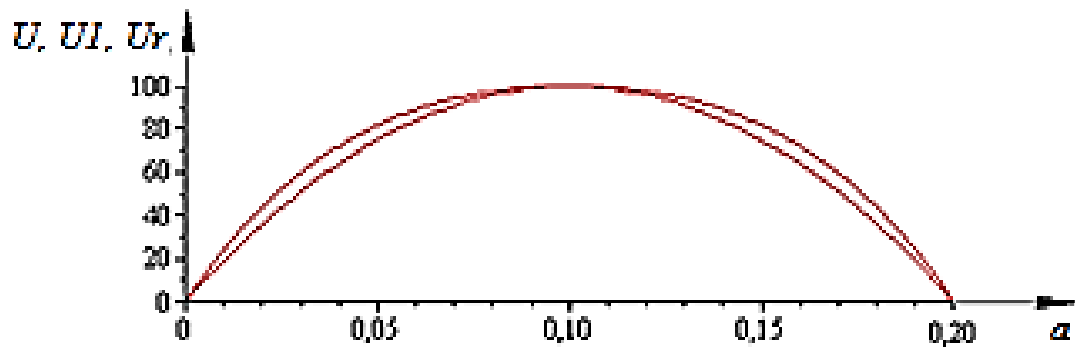


Рис.2 – Графики $U(a)$, $U_1(a)$, $U_r(a)$

Пример 2. Консольная заготовка, обрабатываемая с закреплением только патроне.

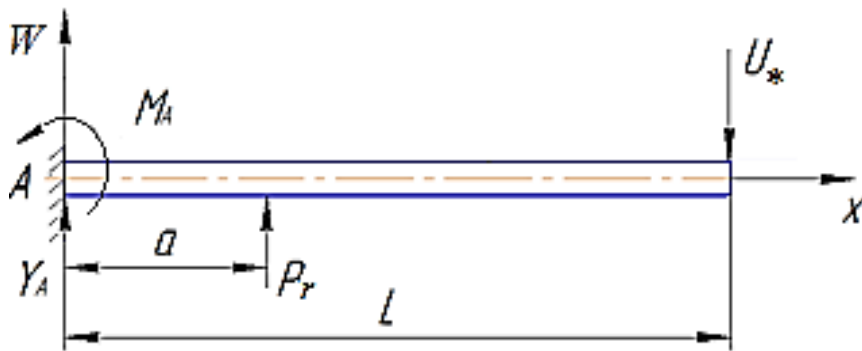


Рис.3 – Схема заготовки

Условия статического равновесия:

$$M_A = P_r \cdot a - U \cdot L; \quad Y_A = P_r - U_*.$$

Равенство прогиба по направлению силы резания приводит к уравнению

$$-\frac{M_A \cdot a^2}{2EJ} + \frac{Y_A \cdot a^3}{6EJ} = 0,$$

из которого находится компенсирующее воздействие:

$$U_* = \frac{P_r \cdot a}{3L - a}.$$

В этом случае изменение компенсирующего воздействия близко к линейному. График $U_*(a)$ изображен на **Рис.4**.

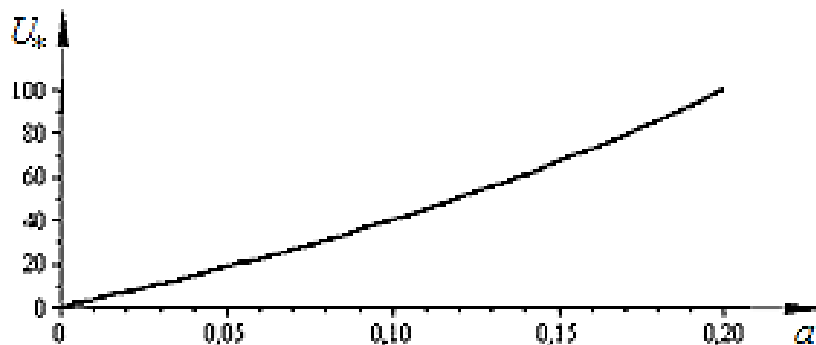


Рис.4 – График $U_*(a)$

Заключение

На простых примерах проиллюстрирован алгоритм получения компенсирующего (или управляющего) воздействия, обеспечивающего устранение упругих линейных перемещений по направлению силы резания при медленном изменении положения режущего инструмента. Фактически получено управление по медленному движению, которое может быть одной из компонент общего управления, включающего управление колебаниями заготовки (управление по быстрому движению).

Библиографический список

1. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учеб./ Б.М. Базров – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Балакшин Б.С. Адаптивное управление станками / Б.С. Балакшин [и др.]. – М: Машиностроение, 1973. – 687 с.
3. Соколовский А.П. Расчет точности обработки на металлорежущих станках / А.П. Соколовский – Л: Машгиз, 1952. – 286с.
4. Bokhoncky A. Control Elastic Deformation of Solid Bodies / A. Bokhoncky A., Vohmyanin A. // Second International Conference of Science and Technologe “Current Problems of Fundamental Science”. Section B. Automation of Production Processes and Robotics. – 1994. – P.141–148.
5. Бохонский А.И. О повышении точности автоматической токарной обработки нежестких деталей / А.И. Бохонский // Приборостроение: сб. науч. тр. – 1983. – № 34. – С. 53-57.
6. Бохонский А.И. Компенсация перемещений и управление деформированным состоянием твердых тел и систем / А.И. Бохонский // Тез. докл. VII всесоюзный съезд по теории и прикладной механике. – 1991. – С.60-61.
7. Бохонский А.И. Повышение точности токарной обработки нежестких заготовок / А.И. Бохонский, А.Н. Вохмянин // Станки и инструменты. –

1994. – №9. – С.27–31.

8. Бохонский А.И. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке. Монография / А.И. Бохонский, А.Н. Вохмянин. – Севастополь. Изд-во СевГТУ, 1990. – 240 с.
9. Бохонский А.И. Компенсация перемещений и управление деформированием заготовок при токарной обработке / А.И. Бохонский, Л.А. Шмидт. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – 109 с.
10. Бохонский А.И. Совершенствование модели управления деформированием нежесткой заготовки при токарной обработке / А.И. Бохонский, Е.С. Чалая // Транспортное, горное и строительное машиностроение, наука и производство. – 2023. – № 20 – С. 53-57.

Bibliograficheskij spisok

1. Bazrov B.M. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya: ucheb./ B.M. Bazrov – M.: Mashinostroenie, 2005. – 736 s.
2. Balakshin B.S. Adaptivnoe upravlenie stankami / B.S. Balakshin [i dr.]. – M.: Mashinostroenie, 1973. – 687 s.
3. Sokolovskij A.P. Raschet tochnosti obrabotki na metallovezhushchih stankah / A.P. Sokolovskij – L.: Mashgiz, 1952. – 286s.
4. Bokhoncky A. Control Elastic Deformation of Solid Bodies / A. Bokhoncky A., Vohmyanin A. // Second International Conference of Science and Technologe “Current Problems of Fundamental Science”. Section B. Automation of Production Processes and Robotics. – 1994. – P.141–148.
5. Bohonskij A.I. O povyshenii tochnosti avtomaticheskoy tokarnoj obrabotki nezhestkih detalej / A.I. Bohonskij // Priborostroenie: sb. nauch. tr. – 1983. – № 34. – S. 53-57.
6. Bohonskij A.I. Kompensaciya peremeshchenij i upravlenie deformirovannym sostoyaniem tverdyh tel i sistem / A.I. Bohonskij // Tez. dokl. VII vsesoyuznyj s"ezd po teorii i prikladnoj mekhanike. – 1991. – S.60-61.
7. Bohonskij A.I. Povyshenie tochnosti tokarnoj obrabotki nezhestkih zagotovok / A.I. Bohonskij, A.N. Vohmyanin // Stanki i instrumenty. – 1994. – №9. – S.27–31.
8. Bohonskij A.I. Upravlenie deformirovaniem nezhestkih detalej pri tokarnoj obrabotke. Monografiya / A.I. Bohonskij, A.N. Vohmyanin. – Sevastopol'. Izd-vo SevGTU, 1990. – 240 s.
9. Bohonskij A.I. Kompensaciya peremeshchenij i upravlenie deformirovaniem zagotovok pri tokarnoj obrabotke / A.I. Bohonskij, L.A. SHmidt. – Novokuzneck: NIC MS, 2018. – 109 s.
10. Bohonskij A.I. Sovershenstvovanie modeli upravleniya deformirovaniem nezhestkoj zagotovki pri tokarnoj obrabotke / A.I. Bohonskij, E.S. CHalaya//

Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie, nauka i proizvodstvo. – 2023. – № 20 – S. 53-57.

¹Бохонский Александр Иванович, д.т.н., профессор,
bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет,

²Чалая Елена Сергеевна, преподаватель, elenasergeevnae@yandex.ru,
Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское орденов
Нахимова и Красной звезды училище им. П.С. Нахимова

METHODS OF MATERIALS RESISTANCE IN THE MODEL OF TURNING OF A NON-RIGID SHAFT

A.I. Bokhonsky, E.S. Chalaya.

It was constructed a compensating elastic displacements model from the cutting force during automatic turning for a non-rigid constant diameter shaft fixed in the centers. The equilibrium conditions for a flat system of forces and the method of initial parameters are used. From the equality to zero of the elastic displacement in the direction of the cutting force from the compensating action and the cutting force, the law of change of the local compensating action as a function of the coordinate of the location of the cutting force as it moves along the workpiece is found. Compensation of elastic displacement (or deformation control) leads to a decrease in the error in the shape and dimensions of the part.

Key words: turning, finite rigidity shaft, methods of applied mechanics, elastic deformation, displacement compensation models, machining accuracy.

Bokhonsky Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Chalaya Elena Sergeevna, lecturer, elenasergeevnae@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval Order of Nakhimov and the Red Star School named after P.S. Nakhimov

УДК 681.51

КОНТРОЛЬ САМОСТОЛКНОВЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Крамарь В.А.¹, Крамарь О.А.², Кабанов А.А.³

***Аннотация.** Статья описывает процедуру построения нейронной сети для решения задачи контроля самостолкновения многозвенных манипуляторов робототехнического комплекса SAR-401 на основе классификации. Предлагаемый подход является альтернативой аналитическому подходу контроля самостолкновения, основанному на применении некоторых методов линейной и матричной алгебры, а также нейросетевому – на основе решения регрессионной задачи. Предлагаемый подход позволяет с высокой степенью вероятности дать односложный ответ о возможности возникновения самостолкновения манипуляторов при выполнении технологических операций.*

***Ключевые слова.** Многозвенный манипулятор, робот, нейронная сеть, классификация.*

Введение. Очевидным подходом к построению управления многозвенными манипуляторами (ММ) робототехнического комплекса является основанный на построении математической модели манипуляторов и решении обратной задачи кинематики (ОЗК). Избыточный манипулятор обеспечивает нелинейное отображение своего пространства сочленений на декартово рабочее пространство. Получить решение ОЗК становится труднее с увеличением числа звеньев манипулятора и появлением нелинейностей. Учитывая, что нейронные сети, в том числе, предназначены для решения нелинейных уравнений, то в ряде статей [1,2,3] предлагается построение управления ММ на основе нейросетевого подхода, где в качестве набора обучающих параметров выступают данные, полученные в результате решения прямой задачи кинематики.

Методы, основанные на применении нейросетевых подходов позволяют однозначно решать ОЗК с заданной точностью и с учетом ограничений на обобщенные координаты ММ, имеющих избыточные степени подвижности. Но эти методы не гарантируют, что на каком-либо участке траектории не возникнет столкновение манипуляторов, которое может произойти либо в результате ошибочных действий оператора, либо, при ошибках в программировании движения. Таким образом, задача предсказания возможности самостолкновения манипуляторов робота при выполнении

технологических операций является актуальной. Большинство современных методов обнаружения коллизии основано на аналитическом подходе [3,4,5]. Предсказание самостолкновения манипуляторов робота с использованием нейросети без решения ОЗК и применения аналитических методов должно привести к уменьшению времени решения задачи, что позволит организовать онлайн управление. В работе [4] предложено нейросетевое решение задачи прогноза самостолкновения многозвенных манипуляторов на основе разработанной нейронной сети, реализующей регрессионный подход, основанный на прогнозировании минимального расстояния между манипуляторами. Предложенное решение дает высокую точность и позволяет строить точки траектории движения манипулятора и проверять возможность самостолкновения в онлайн режиме. Решение было протестировано для SAR-401 (Рис.1).

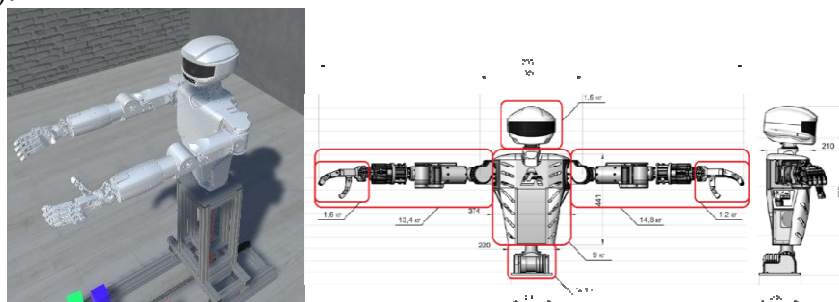


Рис.1 – Антропоморфный робот SAR -401

Интересным, с точки зрения авторов статьи является исследование возможности нейросетевого решения задачи прогноза самостолкновения ММ на основе задачи классификации. Данное решение позволит получить однозначный ответ – будет самостолкновение или нет.

Целью настоящей статьи является построение нейросетевого решения задачи классификации в качестве метода обнаружения самостолкновения многозвенных манипуляторов. Решение осуществляется на основе выбора нейронной сети, которая характеризует положение манипуляторов в пространстве и классифицирует состояние их расположения.

Кинематический анализ. Как и в работе [3,4,5], в качестве объекта рассматриваются антропоморфные манипуляторы робота SAR-401 [6].

Для полноты описания, кратко повторим описание модели манипулятора с использованием методологии Денавита-Хартенберга [7] (параметры манипулятора приведены в таблице 1). Кинематическая схема, которая последовательно отображает представление звеньев манипулятора, соединенных между собой сочленениями вращательного типа приведена в работе [3,4,8].

Таблица 1. Параметры Денавита-Хартенберга для левого манипулятора робота SAR-401

Звено, i	A_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	0	θ_i
2	0	$\pi/2$	0	$\theta_i - 90$
3	0	$\pi/2$	-0.3	$\theta_i - 90$
4	0	$\pi/2$	0	$\theta_i + 180$
5	0	$\pi/2$	-0.3	$\theta_i + 180$
6	-0.24	0	0	$\theta_i + 90$

В модели Денавита-Хартенберга: A_i – кратчайшее расстояние смежных звеньев между осями Z_{i-1} и Z_i , измеряемое вдоль их общей нормали; α_i – угол между осями сочленений, измеряемый в плоскости, перпендикулярной их общей нормали, d_i – расстояния между смежными звеньями, отсчитываемые вдоль оси сочленения предыдущего звена, θ_i – обобщенные координаты, углы поворотов звеньев. Параметры θ_i , $i = \overline{1,6}$ являются переменными и изначально равны 0. Для правого манипулятора параметры Денавита – Хартенберга идентичны. Ограничения на движения сервоприводов сочленений манипуляторов робота SAR-401 – лимиты, приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Лимиты сервоприводов манипуляторов

№	Min	Max	Min	max
0	-90°	0°	-90°	0°
1	0°	105°	-105°	0°
2	-40°	40°	-40°	40°
3	-110°	5°	-110°	5°
4	-40°	40°	-40°	40°
5	-10°	10°	-10°	10°

При решении прямой задачи кинематики рассматриваются: исходная система координат, связанная с первым сочленением, X_0, Y_0, Z_0 и итоговая, связанная с энд-эффектором манипулятора X_n, Y_n, Z_n . Расширенные векторы положения $X_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1]^T$ и $X_n = [x_n \ y_n \ z_n \ 1]^T$, для указанных систем координат связаны между собой соотношением

$$1. \quad X_0 = T_n^0 X_n, \quad (1)$$

где $T_n^0 = \left[\begin{array}{c|c} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ \hline f_{1 \times 3} & t \end{array} \right]$ – матрица 4x4 однородного преобразования, несущая

информацию о линейном смещении (вектор $p_{3 \times 1}$) и пространственной ориентации одной системы координат относительно другой (матрица $R_{3 \times 3}$), $f_{1 \times 3} = [0 \ 0 \ 0]$ – вектор размерностью 1×3 , который задает преобразование перспективы, $t = 1$ – глобальный масштабирующий множитель.

Для каждого сочленения можем определить однородную матрицу преобразования T_i , задающую последовательность преобразований: поворот вокруг оси X на угол α_i , сдвиг вдоль оси X на A_i , поворот вдоль оси Z на угол θ_i , сдвиг вдоль оси Z на d_i :

$$2. \quad T_i = T_{z d_i} T_{z \theta_i} T_{x A_i} T_{x \alpha_i} = \begin{bmatrix} I & p_{d_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{z \theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & p_{A_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x \alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Поскольку для формирования выходной выборки для обучения нейронной сети нам необходимо знать координаты каждого узла, то необходимо составить 6 матриц преобразования для каждого звена манипулятора с помощью которых будут формироваться входные данные для обучения нейронной сети

$$T_1^0 = T_1, T_2^0 = T_1 T_2, T_3^0 = T_1 T_2 T_3, T_4^0 = T_1 T_2 T_3 T_4, T_5^0 = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5, \\ T_6^0 = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6.$$

Задача классификации. Классификация решает следующую задачу. Задано два типа класса, состоящих из значений: обнаружение столкновения, отсутствие столкновения. Имеется множество положений манипуляторов, для которых известно к какому классу они относятся. Это множество положений называется обучающей выборкой. Принадлежность других случайных состояний манипуляторов не известна. Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольное положение манипуляторов.

Поскольку в выборке для обучения сети имеется очень мало значимых событий, то для получения лучших результатов проводится исследование по обучению нейронной сети в задачах бинарной классификации и мультиклассовой классификации.

Обучение нейронной сети в задачах бинарной классификации происходит на наборе обучающих примеров, для которых принадлежность объекта к классу А или классу С известна. В качестве класса А будем понимать состояние столкновения (при условии обнаружения столкновения между манипуляторами), а класса С – состояние при котором столкновение отсутствует. Класс А назначается (при условии, что минимальное расстояние между манипуляторами равно расстоянию между плечами).

Для решения задачи классификации с тремя классами реализуется мультиклассовая классификация в качестве классов которой используется три состояния: класс А – состояние столкновения, класс С – отсутствие

столкновения, а класс В – угроза столкновения. Класс В назначается при условии нахождения одного или двух манипуляторов в зоне столкновения, но самого столкновения не происходит. В процессе обучения будем обозначать принадлежность классам: класс А - Collide, Класс С - Out, Класс В – Warning. Внешнее состояние классов приведено на **Рис.2**.

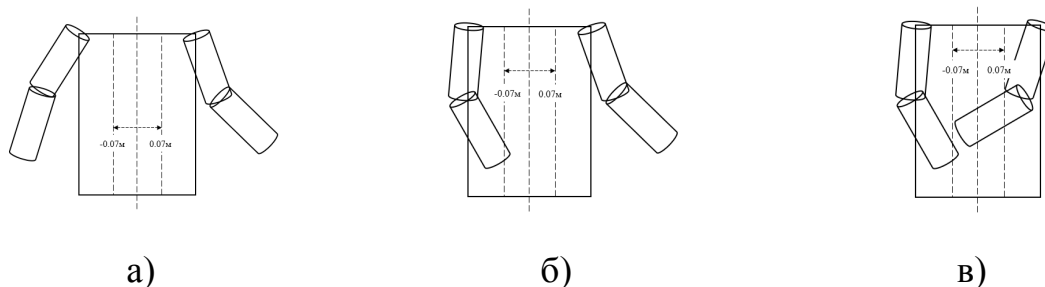


Рис.2. – Внешнее состояние классов: а) класс Out; б) класс Warning; в) класс Collide

Разработка нейронной сети. На начальном этапе проектирования нейронной сети подготавливается набор данных, на котором будет обучаться сеть. Поскольку при управлении роботом в основном используются координаты в пространстве и положение вращения эндефектора, необходимо знать, при каких положениях двух манипуляторов по определенным координатам будет происходить столкновение.

Исходя из этого, на вход нейронной сети будем подавать все элементы матрицы преобразования, которая состоит из девяти элементов матрицы вращения $R_{3 \times 3}$ и трех значений вектора положения $P_{3 \times 1}$.

В результате на вход нейронной сети подается вектор

$$X_i = [Ln_x Ln_y Ln_z Lo_x Lo_y Lo_z La_x La_y La_z Lx Ly Lz... \\ Rn_x Rn_y Rn_z Ro_x Ro_y Ro_z Ra_x Ra_y Ra_z Rx Ry Rz], \quad (3)$$

состоящий из 24 элементов матриц преобразования левого и правого манипулятора соответственно

$$TL_n^0 = \begin{pmatrix} Ln_x & Lo_x & La_x & Lx \\ Ln_y & Lo_y & La_y & Ly \\ Ln_z & Lo_z & La_z & Lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, TR_n^0 = \begin{pmatrix} Rn_x & Ro_x & Ra_x & Rx \\ Rn_y & Ro_y & Ra_y & Ry \\ Rn_z & Ro_z & Ra_z & Rz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В качестве классифицируемых наблюдений используем информацию о столкновении, которая распределена как указано выше в случае использования бинарной классификации на два класса, а в случае использования мультиклассовой классификации на три класса.

Сбор обучающих данных заключается в случайном расположении

манипуляторов оператором, например с помощью копирующего костюма, и получении с помощью прямой задачи кинематики для каждого положения манипуляторов матрицы преобразования и фиксирования текущего состояния на наличие столкновения. Положение манипулятора меняется до тех пор, пока не наберется достаточное количество данных, необходимых для обучения нейронной сети. Для того, чтобы получить обучающие данные для нейронной сети, составим конфигурационное пространство робота в виде множества его возможных конфигураций.

Для подготовки данных для обучения нейронной сети выберем в случайном порядке возможные положения сервоприводов робота в разных местах его рабочей зоны. Полученные данные сохраним в виде векторов положений манипулятора левого и правого соответственно (5):

$$3. \quad Y1 = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_6], \quad Y2 = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_6], \quad (5)$$

где $q_i, i = \overline{1,6}$ – это угол поворота сервопривода i -го сочленения.

При помощи решения прямой задачи кинематики получим две матрицы преобразования (4), с помощью значений которых будем формировать входной набор данных (3).

В качестве выходного параметра будем использовать бинарную или мультиклассовую классификацию.

Входные параметры, характеризующие положение в пространстве каждого манипулятора, приведены в таблице 3, где приведены примеры 13 наблюдений. Первые 12 строк таблицы содержат значения матрицы преобразования левого манипулятора. Строки с 13 по 24 содержат значения матрицы преобразования правого манипулятора. Последняя строка содержит выходной параметр классификации.

Таблица 3. – Наблюдения

Левый манипулятор	L _{nx}	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
	L _{ox}	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	L _{ax}	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65
	L _x	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36
	L _{ny}	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
	L _{oy}	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
	L _{ay}	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
	L _y	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	L _{nz}	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
	L _{oz}	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
	L _{az}	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51
	L _z	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Правый манипулятор	Rn _x	0,45	0,70	-0,62	-0,65	-0,57	0,99	0,71	-0,52	0,36	0,10	0,34	-0,48	0,16
	Ro _x	0,21	0,66	0,70	0,05	0,11	0,15	0,59	0,07	0,46	0,98	0,86	0,74	0,33
	Ra _x	-0,87	-0,27	-0,34	-0,76	-0,81	-0,04	-0,39	-0,85	-0,81	0,17	0,37	-0,47	-0,93
	Rx	0,01	0,21	-0,15	-0,10	0,26	0,05	0,69	0,09	-0,06	0,80	0,11	-0,38	0,99
	Rn _y	0,97	0,17	0,32	0,98	0,97	-0,12	-0,47	1,00	0,88	-0,18	-0,43	0,30	-0,10
	Ro _y	0,24	0,96	0,94	0,15	-0,04	0,99	0,55	0,02	0,48	0,57	0,90	0,87	0,14
	Ra _y	0,89	0,68	0,77	0,75	0,78	0,15	0,14	0,85	0,93	0,59	0,93	0,79	-0,04
	Ry	-0,12	-0,73	0,63	0,17	-0,23	-0,98	-0,66	-0,07	-0,12	0,08	-0,27	0,60	-0,94
	Rn _z	0,43	-0,02	-0,10	-0,64	-0,58	-0,13	-0,74	-0,52	0,34	-0,80	-0,24	0,14	-0,34
	Ro _z	-0,50	-0,85	0,06	0,05	0,07	-1,06	-0,93	0,03	-0,53	-0,40	-0,59	0,02	-0,62
	Ra _z	-0,37	-0,51	-0,39	-0,31	-0,34	-0,13	-0,30	-0,36	-0,48	-0,55	-0,60	-0,62	-0,13
	Rz	0,36	0,04	-0,14	0,40	0,43	0,01	0,18	0,46	0,37	-0,33	-0,39	0,06	0,56
Класс		Out	Out	Collide	Out	Out	Out	Out	Out	Out	Out	Out	Collide	Out

Поскольку в исследованиях используются выборки с бинарной и мультиклассовой классификацией, в качестве функции активации для всех случаев будем использовать функцию softmax – логистическую функцию для многомерного случая. Это позволит сохранить структуру сети и провести сравнительный анализ на одинаковых сетях. Также применение softmax позволит обеспечить совместимость в случае изменения количества классов.

Поиск необходимой размерности для скрытого слоя осуществляется экспериментальным путем. Слишком большое количество узлов нежелательно из-за вероятности возникновения переобучения. Их количество должно быть достаточным, чтобы нейросеть могла уловить сложности связей вход-выход.

Для проведения исследований с целью выбора архитектуры сети рассмотрен ряд вариантов сети. В статье приведем характеристики трех самых значимых сетей, полученных в процессе проектирования.

Сеть 1 – стандартная простая сеть прямого распространения. В сети установлен один слой и 47 нейронов. Выбор обусловлен правилом для конфигурации скрытого слоя, состоящего в том, что количество скрытых слоев равно 1, а число нейронов в этом слое на единицу меньше удвоенной входной размерности.

В качестве метода обучения в сети выбран метод Holdout Validation, который рекомендован для использования в больших Dataset в отличие от метода обучения Cross Validation, который использует для обучения и тестирования одних и те же точек данных. При использовании метода Cross Validation данные делятся на k равных подмножеств. Обучение проходит k раз таким образом, что каждый из k подмножеств используется в качестве проверочного набора, а другие подмножества объединяются, чтобы сформировать обучающий набор. Затем результаты каждой итерации обучения складываются и находится среднее значение, чтобы получить обобщенную

эффективность модели. По проведенным исследованиям получено, что при решении задачи использование Cross Validation приводит к переобучением. По результатам обучения получается 100 % точность на обучающей выборке, однако при тестировании сети на другой случайной выборке ошибка прогнозирования столкновения вырастает до 5 %. Такой разброс в точности говорит о переобучении сети.

В качестве варианта реализации сети можно рассмотреть применение функции `fitcnet` пакета Matlab. В качестве входных данных подготовим два Dataset различных размеров (таблица 4).

Таблица 4. – Входные данные

	Общее количество значений	Количество столкновений
Dataset1	250000	25
Dataset2	1000000	255

В указанной сети каждый полносвязный слой умножает вход на матрицу веса и затем добавляет вектор смещения. Функция активации следует за каждым полносвязным слоем. Итоговый полносвязный слой и последующая функция активации `softmax` реализует выход сети – классификационные оценки и предсказанные метки.

Для определения точности воспользуемся следующими критериями.

Ассигасу – доля правильных ответов алгоритма

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (5)$$

где TP (True Positive) – число правильно предсказанных положительных значений, TN (True Negative) – число правильно предсказанных отрицательных значений (результат и прогноз отрицательные, прогноз совпал с реальностью), FP (False Positive) – число неправильно предсказанных негативных значений (модель предсказала положительный результат, а на самом деле он отрицательный), FN (False Negative) – число неправильно предсказанных негативных значений (модель предсказала отрицательный результат, но на самом деле он положительный).

Precision (Точность)

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (6)$$

Чем ближе значение Precision приближается к 1, тем выше точность.

Recall (Полнота)

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (7)$$

Чем ближе значение Recall приближается к 1, тем выше охват правильных решений. Идеальное решение классификации, когда Precision и Recall равны 1.

Error (ошибка предсказания). Эта мера выражается в отношении всех допущенных ошибок к общему количеству значимых событий, а именно количества столкновений, участвующих в обучении.

$$Error = \frac{FP + FN}{AllCollide}, \quad (8)$$

где *AllCollide* – общее количество столкновений в выборке. В идеальных условиях ошибка должна стремиться к 0.

Полученная по результатам обучения точность обнаружения столкновения Сети 1 представлена в таблице 5.

Таблица 5. – Точность обнаружения столкновения в Сети 1

	Обучающая выборка	Проверочная выборка	Случайная выборка
Точность (Precision)	81,25 %	100 %	61,03 %
Полнота	76,47 %	50 %	50,98 %
Ошибка предсказания	41,1%	50%	81,5%

Несмотря на то, что точность решения на случайной выборке выше, все равно она не удовлетворительна для поставленной задачи.

Рассмотрим Сеть 1, увеличив количество элементов в обучающей выборке с помощью подготовленного Dataset 2 (таблица 4), предполагая, что возможно не хватает значимых значений в обучающей выборке. Будем называть эту сеть Сеть 2.

Точность обнаружения столкновения полученная по результатам обучения Сети 2 приведена в таблице 6.

Таблица 6. – Точность обнаружения столкновений в Сети 2

	Обучающая выборка	Проверочная выборка	Случайная выборка
Точность (Precision)	86,90 %	84 %	94,44 %
Полнота	82,02 %	81,81 %	68 %
Ошибка предсказания	30,33%	33,76 %	36 %

Результаты обучения немного улучшились, однако все равно такая сеть не подходит для использования, поскольку попытки усложнить саму сеть и увеличить размер Dataset не дают ощутимого увеличения точности при

обучении. Дальнейшее увеличение размера Dataset и количества нейронов не принесет нужных результатов.

Сеть 3. Как сказано выше, часто возникает состояние переобучения. Чтобы исключить проблему переобучения, добавим регуляризацию. Подбор оптимального значения параметра регуляризации λ позволит достичь баланса между простотой модели и риском переобучения. Чем λ больше, тем модель проще, но и прогнозы хуже. Появится риск недообучения данным. Если значение λ очень мало, модель будет сильно сложной и увеличится риск переобучения. При λ равной нулю регуляризация отменяется и обучение происходит только за счет минимизации потери, это может привести к переобучению.

Обучим Сеть 3 на увеличенном Dataset. Для этого подготовим новые данные, в которых будет 1172889 общих значений, а значимых значений, являющихся столкновениями, – 133068. Для этой сети проведем регуляризацию, найдя значение $\lambda = 1 \cdot 10^{-6}$ (Рис.3). Результаты обучения сети приведены в таблице 7.

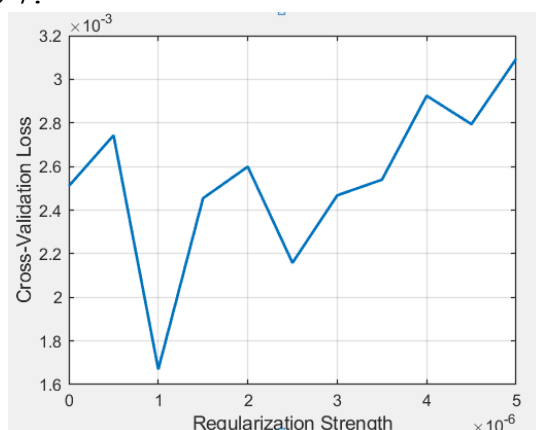


Рис.3 – График изменения параметра регуляризации d

Таблица 7. – Точность обнаружения столкновений в Сети 3

	Обучающая выборка	Проверочная выборка	Случайная выборка
Точность (Precision)	99,3025 %	99,1521 %	99,17 %
Полнота	99,1948 %	99,0055 %	98,81 %
Ошибка предсказания	1,50 %	1,84 %	2,00 %

По результатам обучения получена ошибка предсказания столкновения: на обучающей выборке – 1,50 %; на проверочной выборке – 1,84 %. Так же проведем проверку на другом случайном Dataset, чтобы оценить качество обучения, на данных, которые сеть при обучении не встречала. На случайной

выборке получили ошибку предсказания 2 %.

Отметим, что использование мультиклассовой классификации путем простого увеличения классов при сохранении параметров сети не привело к удовлетворительным результатам. Точность обнаружения столкновений не улучшается или становится хуже. Малое количество значимых событий (0,01%) не дает алгоритмам нейронной сети правильно построить сеть и спрогнозировать состояние столкновения на других случайных значениях.

Заключение. Рассмотрены подходы к решению задачи обнаружения самостолкновения двух многозвенных манипуляторов на базе классификационной нейронной сети. Проведен выбор параметров нейронной сети, основанный на анализе точности в ее обучении.

Для корректной работы и реального применения нейронных сетей необходимо их обучать на достаточно большой выборке входных данных, причём чем больше входных анализируемых признаков, чем выше сложность сети, тем больше должна быть выборка.

Проведен сравнительный анализ между методом контрольной кросс-проверки и методом удержания (Holdout Method). Несмотря на все преимущества метода контрольной кросс-проверки для нашей задачи, лучшие результаты показал метод удержания (Holdout Method).

В результате исследований разработана нейронная сеть на основе классификационных подходов, которая позволила с точностью 98 % предсказать столкновение манипуляторов.

Классификационную нейронную сеть можно применять к решению обнаружения столкновения, однако, несмотря на такую ошибку, ею все равно нельзя пренебречь при принятии решения при формировании управления, так как рано или поздно это приведет к столкновению и повреждению механизма.

Библиографический список

1. Brunton S.L. Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control / S.L. Brunton, J.N. Kutz. – Cambridge University Press, 2019 – 495 p.
2. Bishop C.M. Pattern recognition and Machine Learning / C.M. Bishop. – Springer, 2006. – 758 p.
3. Kramar V. An Artificial Neural Network Approach for Solving Inverse Kinematics Problem for an Anthropomorphic Manipulator of Robot SAR-401 / V. Kramar, O. Kramar, A. Kabanov // Machines. – 2022. – V10, №4. – pp. 241.
4. Kramar V. Self-Collision Avoidance Control of Dual-Arm Multi-Link Robot Using Neural Network Approach / V. Kramar, O. Kramar, A. Kabanov / Journal of Robotics and Control (JRC). – 2022. – Vol.3, №3. – pp. 309-319.
5. Kramar V. Application of Linear Algebra Approaches for Predicting Self-

Collisions of Dual-Arm Multi-Link Robot / V. Kramar, A. Kabanov, V. Alchakov // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2020. – Vol. 9(11). – pp. 1521 – 1525.

6. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // New defense order. Strategies, Sankt-Peterburg. – 2019. – №5(58).
7. Denavit J.A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J. Denavit, R.S. Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics. – 1955. – 23. – pp. 215-221.
8. Крамарь О.А. Нейросетевой подход контроля самостолкновений многозвенных манипуляторов робота SAR-401 / О.А. Крамарь, В.В. Панасенко // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении – 2022. – №2(18). – с. 63-74

Bibliograficheskiy spisok

1. Brunton S.L. Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control / S.L. Brunton, J.N. Kutz. – Cambridge University Press, 2019 – 495 p.
2. Bishop C.M. Pattern recognition and Machine Learning / C.M. Bishop. – Springer, 2006. – 758 p.
3. Kramar V. An Artificial Neural Network Approach for Solving Inverse Kinematics Problem for an Anthropomorphic Manipulator of Robot SAR-401 / V. Kramar, O. Kramar, A. Kabanov // Machines. – 2022. – V10, №4. – pp. 241.
4. Kramar V. Self-Collision Avoidance Control of Dual-Arm Multi-Link Robot Using Neural Network Approach / V. Kramar, O. Kramar, A. Kabanov / Journal of Robotics and Control (JRC). – 2022. – Vol.3, №3. – pp. 309-319.
5. Kramar V. Application of Linear Algebra Approaches for Predicting Self-Collisions of Dual-Arm Multi-Link Robot / V. Kramar, A. Kabanov, V. Alchakov // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2020. – Vol. 9(11). – pp. 1521 – 1525.
6. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // New defense order. Strategies, Sankt-Peterburg. – 2019. – №5(58).
7. Denavit J.A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J. Denavit, R.S. Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics. – 1955. – 23. – pp. 215-221.
8. Крамар' О.А. Нейросетевой подход контроля самостолкновений манипуляторов робота SAR-401 / О.А. Крамар', В.В. Панасенко // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении – 2022. – №2(18). – с. 63-74

¹Крамарь Вадим Александрович, д.т.н., профессор, kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

²Крамарь Олег Александрович, rolets@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

³Кабанов Алексей Александрович, к.т.н., доцент, patronne@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

CONTROL OF SELF-COLLISION OF MANIPULATORS ON THE BASIS OF SOLVING THE PROBLEM OF CLASSIFICATION USING A NEURAL NETWORK

V.A. Kramar, O.A. Kramar, A.A. Kabanov

The article describes the procedure for constructing a neural network for solving the problem of controlling the self-collision of multi-link manipulators of the SAR-401 robotic complex based on the classification approach. The proposed approach is an alternative to the analytical approach to self-collision control, based on the use of some methods of linear and matrix algebra, as well as to the neural network approach based on solving a regression problem.

Keywords: multi-link manipulator, robot, neural network, classification.

Kramar Vadim Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, kramarv@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Kramar Oleg Aleksandrovich, rolets@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

¹ *Kabanov Aleksey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, patronne@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ САМОПОДНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ

Васютенко А.П.¹, Балакин А.И.²

Аннотация. Приведен анализ схем самоподнастраивающихся измерительных систем. Рассмотрены методы формирования команд на поднастройку, исследованы зависимости смещения центра группирования в момент поднастройки от среднего квадратического значения погрешности измерения и величины ее систематической составляющей. Приведены результаты моделирования зависимости погрешности поднастройки средства измерения от способа формирования команды на поднастройку и значения параметров измерительной системы. Представлена схема и описание принципа действия самоподнастраивающегося роботизированного модуля контроля внутреннего диаметра полумуфт.

Ключевые слова. Поднастройка, измерение, преобразователь, погрешность, диапазон измерения, граница поднастройки, смещение уровня настройки.

В самоподнастраивающихся измерительных системах предусматривается автоматическая поднастройка измерительного преобразователя или определение поправки, вносимой в результат измерения с целью компенсации систематических погрешностей измерения, вызываемых износом измерительных наконечников, тепловыми деформациями измерительных устройств и изменением параметров электронных схем отсчетно-командных устройств [1,2,6,9,10,11]. Для этого периодически в автоматическом режиме на измерительную позицию устанавливается рабочий эталон; и по результатам его измерения определяется необходимость поднастройки преобразователя и ее величина.

Самонастраивающиеся измерительные системы (СПИС) классифицируются следующим образом [4-5]:

- СПИС с переменным уровнем настройки (примером реализации может служить сопряженное шлифование, при котором диаметр вала обрабатывается уже под готовую втулку для обеспечения заданного зазора или натяга в сопряжении);

- СПИС с постоянным уровнем настройки (примером данной реализации является поднастройка контрольно-сортировочного автомата путем периодического ввода эталона на измерительную позицию);

- СПИС с дополнительной измерительной позицией (применяется в приборах активного контроля с целью повышения точности обработки за счет компенсации погрешности измерения от износа измерительной скобы,

тепловых деформаций узлов станка, а также влияния условий измерения таких как: температура, образивная пыль, вибрации);

– СПИС с настройкой по возмущению (осуществляет контроль возмущающих факторов и формирование команды на поднастройку средства измерения).

Целью работы является повышение точности измерения на основе исследования зависимости погрешности поднастройки от способа формирования команды на поднастройку, погрешности средства измерения и величины подналадочного импульса СПИС с постоянным уровнем настройки.

Поднастроечные устройства измерительных приборов компенсируют функциональную погрешность, которая вызывает постепенное изменение показаний приборов с течением времени [3,7,8,12]. Если в качестве величины поднастроечного импульса A принимать систематическую составляющую (смещение уровня настройки), то погрешность поднастройки Δ_{Π} определяется из выражения:

$$\Delta_{\Pi} = A + \overset{\circ}{\Delta}_{\text{и}} + B \leq [\Delta_{\text{и}}], \quad (1)$$

где A – величина поднастроечного импульса; $\Delta_s = A + B$ – систематические погрешности измерения; B – смещение положения центра группирования в момент поднастройки; $\overset{\circ}{\Delta}_{\text{и}} = 4\sigma$ – случайная составляющая погрешности измерения.

На **Рис.1** показан график изменения показаний прибора при поднастройке средства измерения.

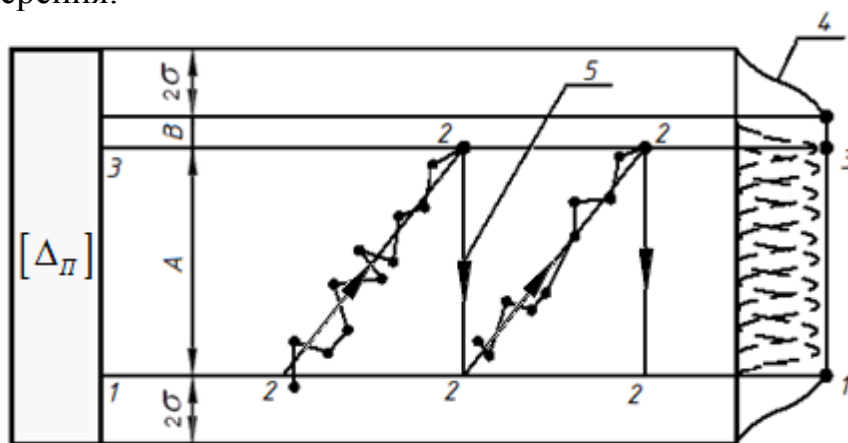


Рис.1 – График изменения показаний прибора при поднастройке

По мере смещения уровня настройки преобразователя значения измеренных размеров деталей постепенно увеличиваются и приближаются к верхней границе поля допуска погрешности измерения $[\Delta_{\Pi}]$. Смещение усреднённых измеренных значений размеров рабочих эталонов характеризуется

линией 2-2. Линии 1-1 и 3-3 характеризуют положение команды на поднастройку. Кривая 4 показывает суммарное распределение систематической функциональной и случайной погрешностей измерения.

В случае выхода показания преобразователя при контроле рабочего эталона за границу поднастройки формируется команда, в результате выполнения которой настройка преобразователя смещается на величину A (линия 5, **Рис.1**).

Способ формирования управляющей команды имеет весьма существенное значение при разработке измерительных систем, так как оценивать процесс измерения и подавать команду на подналадку можно по различным статистическим параметрам. Наиболее известными являются следующие способы: по одному импульсу, по повторным импульсам, по среднему арифметическому.

Погрешность поднастройки зависит от смещения положения центра группирования в момент поднастройки B , который в свою очередь является функцией систематической погрешности, приходящаяся на одно измерение a , объема выборки N , числа повторных импульсов K и среднего квадратического отклонения погрешности измерения σ . Величина параметра B определяется для различных способов формирования команды на поднастройку (таблица 1).

Таблица 1 – Выражение для определения параметра B

По одному импульсу	По повторным импульсам	По среднему арифметическому
$B = 4\sigma^{0,75} \cdot a^{0,25}$	$B' = K^{-0,25+0,12\frac{a}{\sigma}} \cdot B$	$B_s = N^{-0,37} \cdot B$

Моделирование зависимости погрешности поднастройки измерительного преобразователя от способа формирования команды на поднастройку проводилось при следующих значениях параметров измерительной системы, представленных в таблице п2.

Таблица 2 – Параметры измерительной системы

№	Наименование параметра	Значение, мкм
1	Случайная погрешность измерения $\Delta_{и}^o$	0,5; 1; 5
2	Величина подналадочного импульса A	0,5; 1; 2
3	Среднеквадратическое отклонение погрешности измерения σ	0,5; 1; 2
4	Систематическая погрешность на одно измерение a	0,05...0,15
5	Рассеивание центра группирования B	0,5...3,2

Величина погрешности поднастройки Δ_{Π} рассчитывалась по формуле (1), а смещение центра группирования – по формулам, приведенным в таблица 1.

В статье на **Рис.2, Рис.3, Рис.4** показаны зависимости $B' = f(B)$, $B' = f(K)$ и $\Delta_{\Pi} = f(B')$ при поднастройке измерительного преобразователя по повторным импульсам.

Значения смещения центра группирования B' и погрешности поднастройки Δ_{Π} вычислялись по формулам:

$$B' = K^{-0,25+0,12\frac{a}{\sigma}} \cdot B = K^{-0,25+0,12\frac{a}{\sigma}} \cdot 4\sigma^{0,75} \cdot a^{0,25}, \quad (2)$$

$$\Delta_{\Pi} = A + \overset{\circ}{\Delta}_{и} + B'. \quad (3)$$

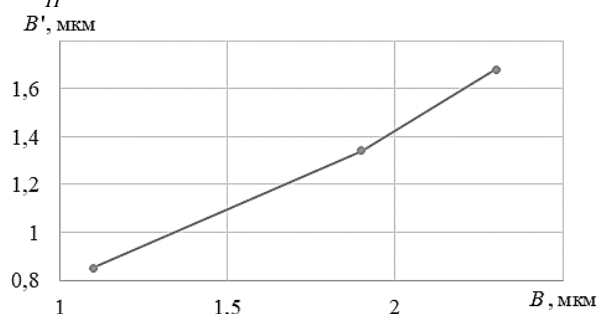


Рис.2 – Зависимость $B' = f(B)$ при $K = 3$, $a = 0,1$ мкм, $\sigma = 0,5-1$ мкм

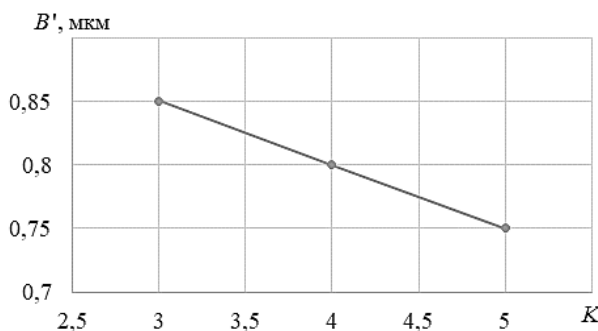


Рис.3 – Зависимость $B' = f(K)$ при $B = 1,14$, $a = 0,1$ мкм, $\sigma = 0,5$ мкм

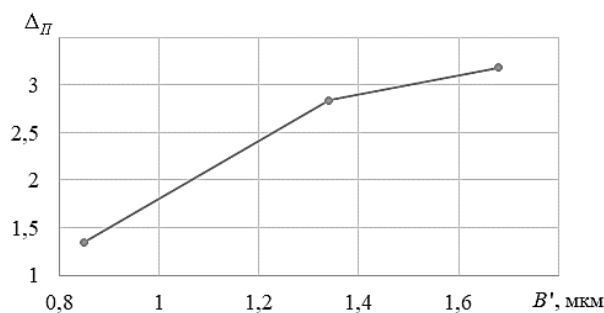


Рис.4 – Зависимость $\Delta_{\Pi} = f(B')$ при $\overset{\circ}{\Delta}_{и}=1,0$ мкм, $A = 0,5$ мкм

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей, описывающих функции погрешности подстройки от величины смещения центра группирования $\Delta_{II} = f(B)$, $\Delta_{II} = f(B')$, $\Delta_{II} = f(B_s)$ при различных методах формирования команд, позволяет оценить точность поднастройки. Результаты анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения погрешности поднастройки Δ_{II} от величины систематической погрешности a , приходящейся на одно измерение

Параметр поднастройки a , мкм	Значения погрешности поднастройки Δ_{II} , мкм		
	По одному импульсу	По повторным импульсам	По среднему арифметическому
0,05	5,8	1,35	0,49
0,1	10,0	2,84	1,25
0,15	12,5	3,18	1,97

На **Рис.5** показаны зависимости погрешности поднастройки Δ_{II} от метода формирования команды на подналадку при различных значениях величины систематической погрешности a , приходящейся на одно измерение.

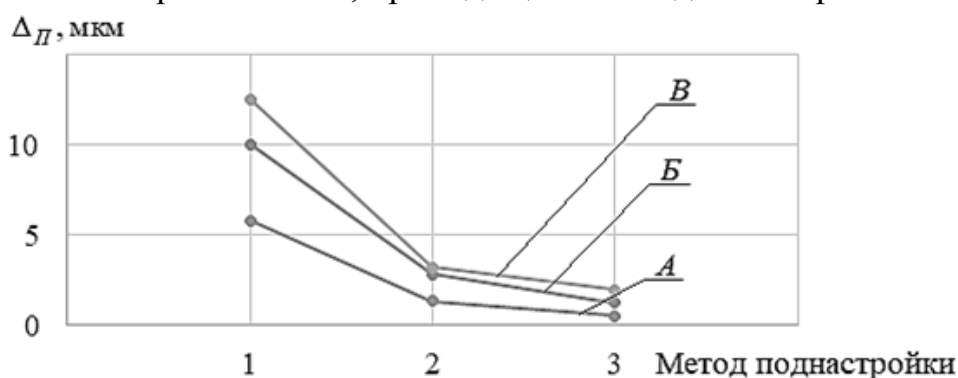


Рис.5 – Зависимость погрешности поднастройки Δ_{II} от метода формирования команды:

1 – по одному импульсу; 2 – по повторным импульсам; 3 – по среднему арифметическому; А – при $a = 0,05$ мкм; Б – при $a = 0,1$ мкм; В – при $a = 0,15$ мкм

Принципиальная кинематическая схема роботизированного самоподнастраивающегося измерительного модуля для контроля геометрических параметров деталей полумуфта представлена на **Рис.6**, а на **Рис.7** – общий вид измерительного устройства.

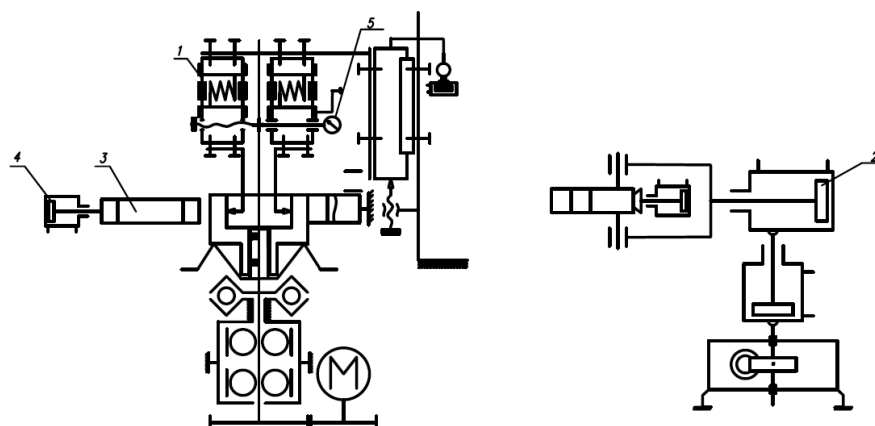


Рис.6 – Кинематическая схема роботизированного модуля

Модуль включает в себя измерительную скобу 1, манипулятор 2, загрузочный и сортировочный лотки. Периодическая автоматическая подача рабочего эталона 3 на предметный столик измерительной позиции осуществляется с помощью пневмоцилиндра 4, а вращение – от электродвигателя М. После установки рабочего эталона в его отверстие вводятся наконечники измерительной скобы 1 и оценивается соответствие уровня настройки измерительного преобразователя заданному значению. При наличии рассогласования определяется величина и знак поправки, которая вводится в результат измерения последующих деталей. Таким образом компенсируется систематическая погрешность измерения, связанная со смещением уровня настройки измерительного преобразователя 5.

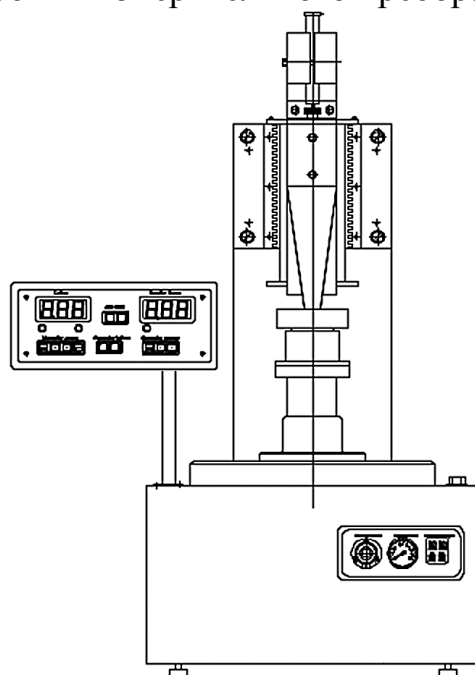


Рис.7 – Общий вид измерительного устройства

Манипулятор 2 осуществляет подачу деталей из загрузочного лотка на измерительную позицию, где осуществляется ее центрирование, зажим и измерение диаметра и отклонения от круглости. По результатам измерения определяется группа сортировки деталей (годные, брак+, брак-). затем перенос их в сортировочный лоток.

Выводы:

1. Самоподнастраивающиеся системы являются одним из наиболее перспективных направлений повышения точности измерения.

2. Анализ расчетов погрешности поднастройки показывает, что применение методов формирования команд на подналадку по повторным импульсам и среднему арифметическому позволяет повысить точность поднастройки средства измерения на 18...38%.

3. Согласно метрологической характеристики измерительного модуля предел допускаемой погрешности измерения деталей полумуфты для диаметра $38 \pm 0,025$ мм равен 3 мкм, а расчетная величина суммарной погрешности составляет 5 мкм. При исключении систематических составляющих погрешностей измерения, связанных со смещением уровня настройки, износом измерительных наконечников суммарная величина погрешности составит 2,1 мкм. Таким образом, применение разработанной самоподнастраивающейся системы позволяет уменьшить величину погрешности измерения на 42%.

Библиографический список

1. Автоматизация в промышленности: практикум: учебное пособие для студентов вузов / Е. В. Пашков и др.; ред. Е. В. Пашков. - Севастополь: Издательство Севастопольского национального технического университета, 2010. - 224 с.
2. Шалыгин М.Г. Автоматизация измерений, контроля и испытаний: Учебное пособие / М.Г. Шалыгин, Я.А. Вавилин.: – СПб.: Издательство «Лань», 2022.
3. Волосов С.С. Приборы автоматического контроля в машиностроении/ С.С.Волосов, Е.И. Педь. – М.: Изд-во Машиностроение, 1970. – 310 с.
4. Гейлер З.Ш. Самонастраивающиеся системы активного контроля / З.Ш. Гейлер. – Москва: Машиностроение, 1978. – 224 с.
5. Гейлер З.Ш. Самонастраивающиеся системы активного контроля размеров / З.Ш. Гейлер. - Москва: Машиностроение, 1972. – 174 с.
6. Китов Б.И. Физические основы получения информации: учебное пособие: в 3 частях / Б.И. Китов. – Иркутск: ИрГУПС, 2019. – 96 с.
7. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В.П. Легаев. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с.
8. Педь Е.И. Активный контроль в машиностроении/ Е.И. Педь. – М.: Изд-во

Машиностроение, 1991. – 359 с.

9. Рачков М.Ю. Физические основы измерений: учебное пособие для среднего профессионального образования / М.Ю. Рачков. – Москва: Издательство Юрайт, 2023 – 146 с.
10. Сырямский В.И. Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике: учебное пособие для вузов / В.И. Сырямский. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 532 с.
11. Каплан Б.Ю. Физические основы получения информации: Учебное пособие / Б.Ю. Каплан. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 286 с.
12. Этингер М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М.И. Этингер – М.: АПР, 2016. – 336 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Avtomatizatsiya v promyshlennosti: praktikum: uchebnoe posobie dlya studentov vtuzov / E. V. Pashkov i dr.; red. E. V. Pashkov. - Sevastopol': Izdatel'stvo Sevastopol'skogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta, 2010. - 224 s.
2. SHalygin M.G. Avtomatizatsiya izmerenij, kontrolya i ispytanij: Uchebnoe posobie / M.G. SHalygin, YA.A. Vavilin.: – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2022.
3. Volosov S.S. Pribory avtomaticheskogo kontrolya v mashinostroenii/ S.S. Volosov, E.I. Ped'. – М.: Izd-vo Mashinostroenie, 1970. – 310 s.
4. Gejler Z.SH. Samonastroyayushchiesya sistemy aktivnogo kontrolya / Z.SH. Gejler. – Moskva: Mashinostroenie, 1978. – 224 s.
5. Gejler Z.SH. Samonastroyayushchiesya sistemy aktivnogo kontrolya razmerov / Z.SH. Gejler. - Moskva: Mashinostroenie, 1972. – 174 s.
6. Kitov B.I. Fizicheskie osnovy polucheniya informacii: uchebnoe posobie: v 3 chastyah / B.I. Kitov. – Irkutsk: IrGUPS, 2019. – 96 s.
7. Legaev V.P. Pribory avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya v mashinostroenii: ucheb. posobie / V.P. Legaev. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009. – 123 s.
8. Ped' E.I. Aktivnyj kontrol' v mashinostroenii/ E.I. Ped'. – М.: Izd-vo Mashinostroenie, 1991. – 359 s.
9. Rachkov M.YU. Fizicheskie osnovy izmerenij: uchebnoe posobie dlya srednego professional'nogo obrazovaniya / M.YU. Rachkov. – Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2023 – 146 s.
10. Syryamskin V.I. Informacionnye ustrojstva i sistemy v robototekhnike i mekhatronike: uchebnoe posobie dlya vuzov / V.I. Syryamskin. – Sankt-Peterburg: Lan', 2023. – 532 s.
11. Kaplan B.YU. Fizicheskie osnovy polucheniya informacii: Uchebnoe posobie / B.YU. Kaplan. – М.: NIC INFRA-M, 2014. – 286 s.
12. Etingof M.I. Avtomaticheskij razmernyj kontrol' na metallorazreshchih stankah / M.I. Etingof – М.: АПР, 2016. – 336 s.

¹Васютенко Александр Павлович, к.т.н., доцент,
APVasyutenko@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

²Балакин Алексей Игоревич, к.т.н., доцент, AIBalakin@mail.sevsu.ru,
Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

ROBOTIC SELF-ADJUSTING MEASURING MODULE

A.P. Vasyutenko, A.I. Balakin

The analysis of schemes of self-adjusting measuring systems is given. The methods of forming commands for tuning are considered, the dependences of the displacement of the grouping center at the time of tuning on the mean square value of the measurement error and the magnitude of its systematic component are investigated. The results of modeling the dependence of the error of the adjustment of the measuring instrument on the method of forming the command to adjust and the values of the parameters of the measuring system are presented. The scheme and description of the principle of operation of the self-adjusting robotic control module of the inner diameter of the coupling halves are presented.

Keywords: adjustment, measurement, converter, error, measurement range, adjustment boundary, adjustment level offset.

*Vasyutenko Alexander Pavlovich, candidate of technical sciences, docent,
APVasyutenko@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University*

*Balakin Alexey Igorevich, candidate of technical sciences, docent,
AIBalakin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University*

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОДНОВАРИАНТНОЙ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ДВУХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИХ СОРТИРОВКЕ

Филипович О.В.

Аннотация. Рассматривается процесс однопараметрической одновариантной селективной сборки двух элементов для случая использования линейной зависимости «вход-выход». Построена математическая модель и предложен метод, позволяющий учесть влияние погрешностей измерения при сортировке элементов по селективным группам и определить показатели качества сборочного процесса. Приведен пример моделирования и оценены перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова. Селективная сборка, погрешность измерения, сортировка, математическая модель.

Постановка задачи.

Классическая задача, рассматриваемая отечественными и зарубежными исследователями [1-6], состоит в анализе и оптимизации показателей сборочного процесса изделий, содержащих два элемента с линейными моделями «вход-выход», без учета ошибок сортировки. Основой сортировочного процесса элементов является операция контроля их параметров x_i ($i = \overline{1,2}$), являющихся случайными величинами. Контроль сопровождается случайными ошибками, появление которых приводит к тому, что вместо истинного значения параметра x_i в процессе измерения становится известной величина z_i , линейно связанная с исходной зависимостью:

$$z_i = x_i + \delta_i,$$

где δ_i – случайная составляющая погрешности измерения i -го параметра.

Особенности учета погрешностей измерения на показатели сборочного процесса описаны в [7-9], однако, все исследования, проводимые авторами данных работ, основаны на определенных допущениях либо выполнены с использованием имитационных моделей. Аналитическая модель, позволяющая учесть влияние погрешности измерения на процесс сортировки, построена в [10]. Данная модель позволяет определить общее количество сборочных комплектов (СК), однако она не учитывает возможные комбинации в условиях как групповой, так и межгрупповой взаимозаменяемости, вследствие которых могут появиться бракованные изделия.

Целью работы является разработка модели процесса одновариантной

однопараметрической селективной сборки двух элементов и метода определения показателей качества сборочного процесса с учетом погрешностей измерения при сортировке элементов на группы.

Математическая модель.

Появление бракованных СК является следствием рекомбинации элементов в другие селективные группы после сортировки под влиянием погрешностей измерения. При этом, необходимо учитывать тот факт, что при увеличении допускаемой погрешности элементы теоретически могут попасть в любую селективную группу и образовывать произвольные комбинации между собой при комплектовании СК (**Рис.1**).

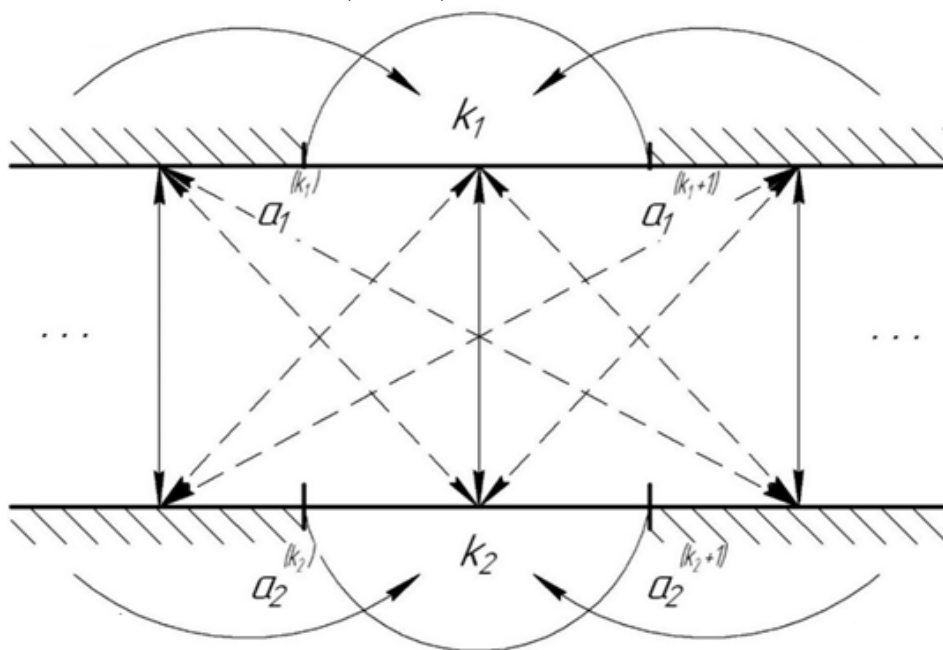


Рис.1 – Графическое изображение распределения элементов в селективных группах k_i ($i = \overline{1,2}$) при совмещении координат интервалов расширенных допусков ($a_i^{(k_i)}$ – границы селективных групп)

Здесь и далее обозначения, используемые в данной работе, будут соответствовать принятым в [10]. При одновариантном правиле комплектования годные СК из попавших в группы k_i ($i = \overline{1,2}$) элементов могут образовываться двумя путями:

- сопряжением элементов из одноименных селективных групп;
- сопряжением элементов из других (не всегда смежных) селективных групп.

Случаи, соответствующие первым вариантам, обозначены на **Рис.1** сплошными линиями, вторым – пунктирными линиями. Предлагаемый метод

позволяет определить вероятности получения годных СК при практически любых комбинациях образующих его элементов и заключается в следующем.

1. Каждый интервал $X_i^{(k_i)}$ ($i=\overline{1,2}$) разделяют на n_i равных частей, образуя подгруппы $X_i^{(d_i)}$ с допусками (**Рис.2**)

$$Tx_i^{(d_i)} = \frac{Tx_i^{(k_i)}}{n_i}$$

и границами $b_i^{(d_i)}$, таким образом, что

$$X_i^{(d_i)} = \{x_i : b_i^{(d_i)} \leq x_i < b_i^{(d_i+1)}\}, d_i = \overline{1, l_i \times n_i - 1}.$$

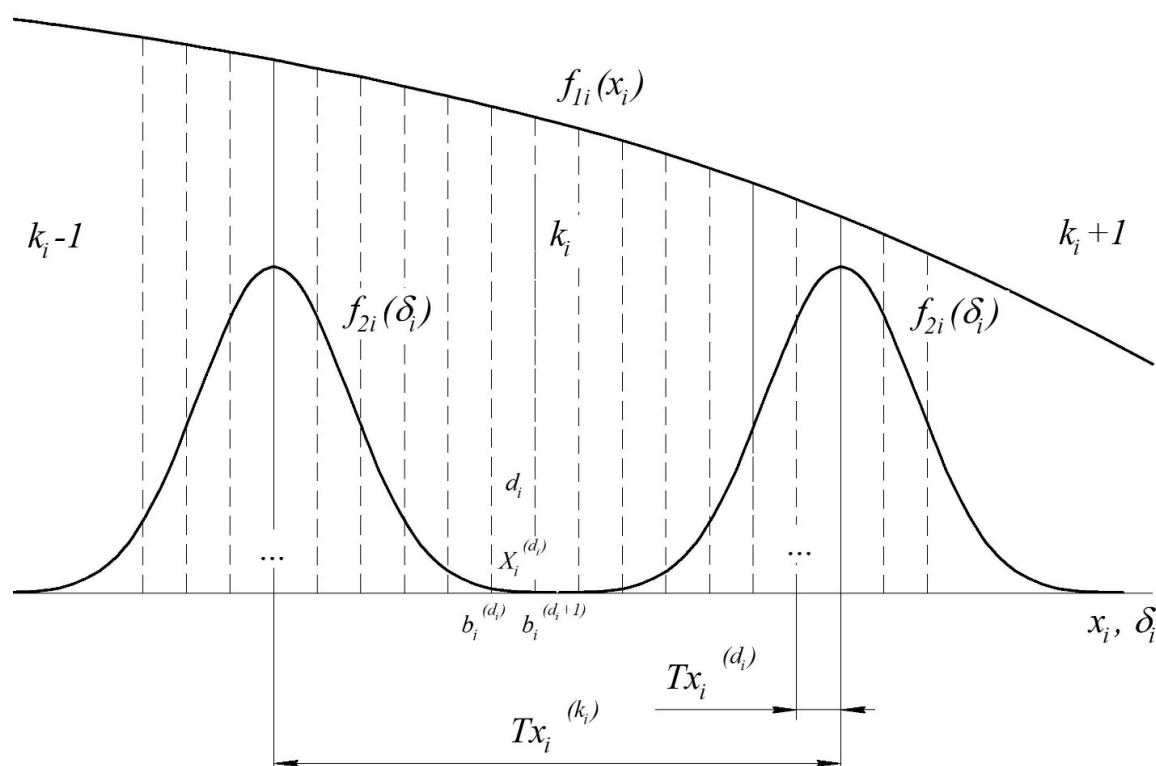


Рис.2 – Схема образования интервалов $X_i^{(d_i)}$

2. Определяются вероятности попадания в селективные группы k_i элементов из подгрупп с учетом влияния погрешности измерения, аналогично подходу, приведенному в [10]:

$$P_i^{(d_i, k_i)} = \int_{b_i^{(d_i)}}^{b_i^{(d_i+1)}} f_{1i}(x_i) \int_{a_i^{(k_i)} - x_i}^{a_i^{(k_i+1)} - x_i} f_{2i}(\delta_i) d\delta_i dx_i, \quad d_i = \overline{1, l_i \times n_i}, \quad k_i = \overline{2, l_i - 1}, \quad i = \overline{1, 2}.$$

3. Рассчитываются суммарные вероятности попадания в группы k_i из всех имеющихся подгрупп:

$$I_i^{(k_i)} = \sum_{j=1}^{l_i \times n_i} P_i^{(d_j, k_i)}, \quad k_i = \overline{2 \dots l_i - 1}; \quad i = \overline{1, 2}.$$

4. Вычисляются вероятности получения годных сборочных комплектов из элементов обоих типов $P_{ГСК}^{(d_1, d_2)}$, параметры которых принадлежат подгруппам с номерами d_1 и d_2 :

$$P_{ГСК}^{(d_1, d_2)} = \begin{cases} 1, & y \in [y_{\min}, y_{\max}]; \\ 0, & y \notin [y_{\min}, y_{\max}], \end{cases}$$

где $y = g(x_i)$, $x_i \in [b_i^{(d_i)}, b_i^{(d_i+1)}]$, $d_i = \overline{1, l_i \times n_i}$, $i = \overline{1, 2}$.

5. Определяются вероятности образования годных сборочных комплектов из элементов, попавших в группы с номерами k_1 и k_2 :

$$I_{ГСК}^{(k_1, k_2)} = \frac{P_1^{(d_1, k_1)}}{I_1^{(k_1)}} \frac{P_2^{(d_2, k_2)}}{I_2^{(k_2)}} P_{ГСК}^{(d_1, d_2)} \min \{I_1^{(k_1)}, I_2^{(k_2)}\}, \quad d_i = \overline{1, l_i \times n_i}, \quad k_i = \overline{2, l_i - 1}, \quad i = \overline{1, 2}.$$

6. Суммарная вероятность образования годных сборочных комплектов по всем селективным группам:

$$I_{ГСК} = \sum_{k_i} I_{ГСК}^{(k_1, k_2)}, \quad i = \overline{1, 2}.$$

Отсюда можно определить показатели сборочного процесса [3]:

$$P_0 = I_{ГСК}, \quad P_1 = \frac{I_{ГСК}}{I_{СК}}.$$

Пример моделирования.

Под элементами будем понимать детали, параметры которых являются линейными размерами. Детали сопрягаются по посадке с зазором, схема расположения интервалов допусков изображена на **Рис.3**. Правило комплектования – одновариантное.

Распределения значений x_i и δ_i – гауссовские, имеющие параметры:

– m_{x_i} и σ_{x_i} – математические ожидания и среднеквадратические отклонения случайных величин x_i ,

– m_{δ_i} и σ_{δ_i} – математические ожидания и среднеквадратические отклонения случайных величин δ_i .

Исходные данные.

1. Величина расширенного допуска $Tx_1 = Tx_2 = 10$ мкм с координатами середин интервалов +2 мкм и +5 мкм. Количество селективных групп $l_1 = l_2 = 7$, интервалы групповых допусков $Tx_i^{(k_i)}$ равны между собой.

2. Математические ожидания $m_{x1} = 2$ мкм; $m_{x2} = 5$ мкм; $m_{\delta1} = m_{\delta2} = 0$ мкм; среднеквадратические отклонения $\sigma_{x1} = 1,67$ мкм; $\sigma_{x2} = 1,72$ мкм,

$$\sigma_{\delta1} = \sigma_{\delta2} = \frac{\Delta_{\lim}}{c_{\Delta}},$$

где $\Delta_{\lim}$ – предел допускаемой погрешности измерения, $\Delta_{\lim} = \frac{1}{c_x} T x_i^{(k_i)}$, c_{Δ} , c_x – коэффициенты. Примем $c_x = 4$, $c_{\Delta} = 2$, тогда $\sigma_{\delta1} = \sigma_{\delta2} = 0,25$ мкм.

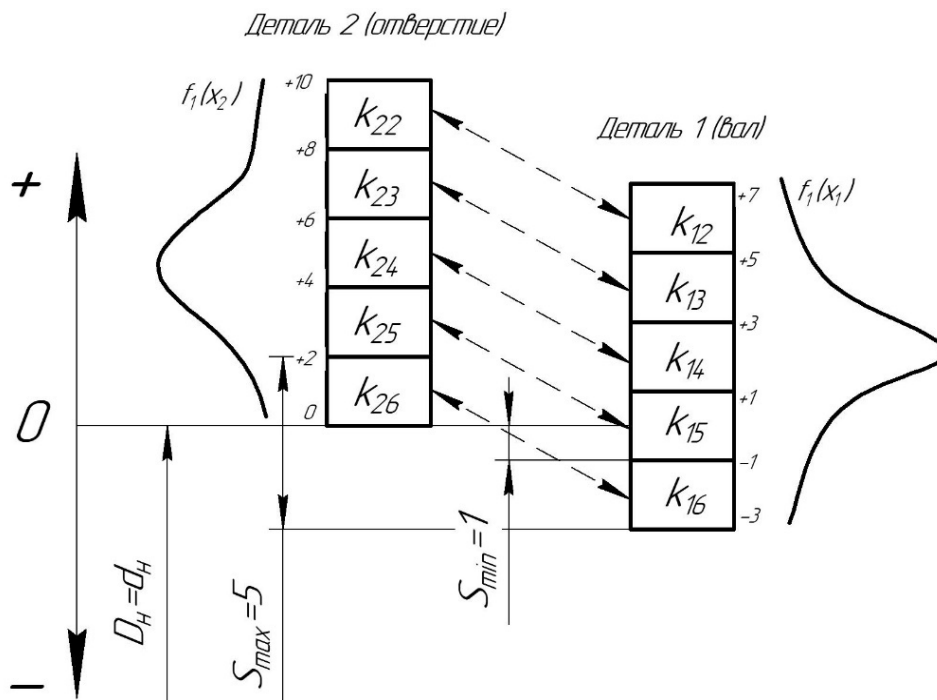


Рис.3 – Схема расположения интервалов допусков

Предельные значения выходного параметра (зазора):

$$S_{\min} \leq x_2 - x_1 \leq S_{\max}, \quad S_{\min} = 1 \text{ мкм}, \quad S_{\max} = 5 \text{ мкм}.$$

Требуется, используя разработанный метод, определить показатели селективной сборки. Исходные интервалы $X_i^{(k_i)}$ разбивались на 15 равных частей с допусками подгрупп $T x_i^{(d_i)} = 0,133$ мкм ($i = \overline{1,2}$).

Вероятность образования сборочных комплектов, определенная по модели [10], равна $I_{СК} = 0,984$. Вероятность образования годных сборочных комплектов, вычисленная с использованием предложенного метода, $I_{ГСК} = 0,970$. Показатели процесса: $P_0 = 0,970$; $P_1 = 0,986$. Графики зависимости $I_{ГСК} = f(c_x)$ и $I_{СК} = f(c_x)$ при различных c_{Δ} для данного примера показаны на Рис.4,5.

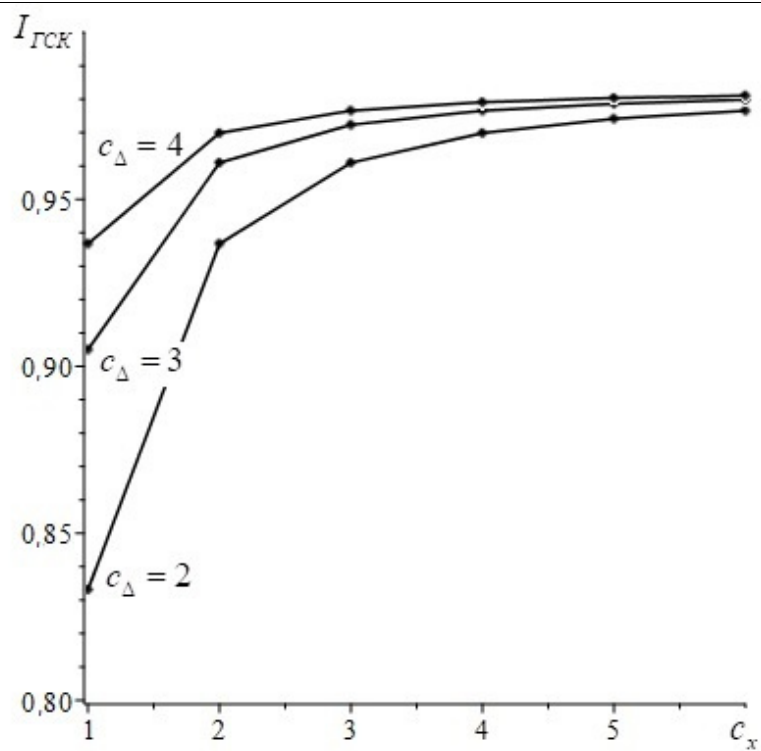


Рис.4 – Графики зависимости $I_{ГСК} = f(c_x)$

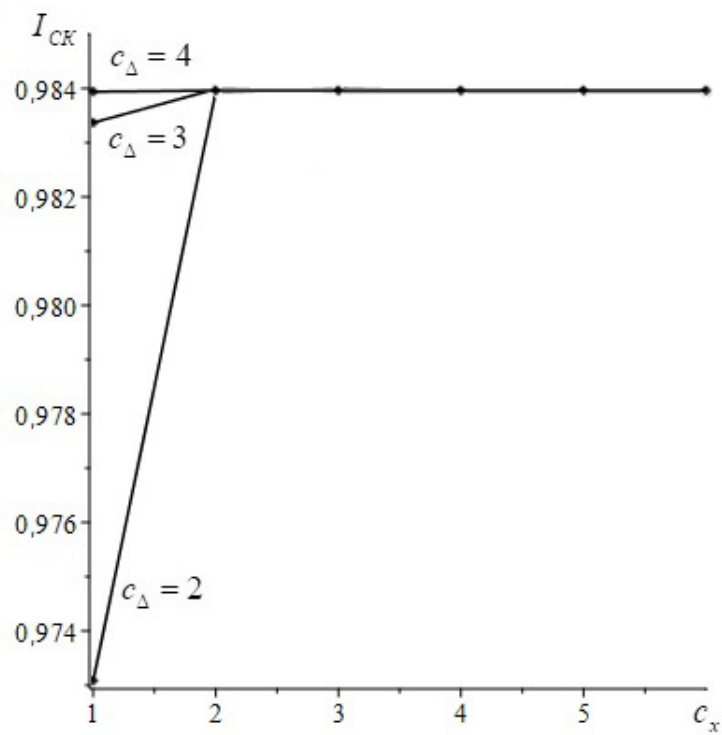


Рис.5 – Графики зависимости $I_{СК} = f(c_x)$

Выводы.

В рассмотренном примере коэффициент c_x по сути является относительной точностью измерения и определяется как отношение величины группового допуска к пределу допускаемой погрешности измерения. Коэффициент c_Δ определяет среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерения в зависимости от величины Δ_{lim} . Данные, представленные графически на **Рис.4,5**, наглядно показывают правильность предложенного метода. Метод позволяет произвести расчеты показателей качества сборочного процесса с учетом погрешностей измерения параметров, по которым производится сортировка, в частности, определить долю годных СК, выход годных из исходной совокупности элементов, а также вероятности образования предварительного брака и незавершенного производства. Перспективой дальнейших исследований является его адаптация для анализа процесса многовариантной селективной сборки двух и более элементов.

Библиографический список

1. Бонч-Осмоловский М.А. Селективная сборка / М.А. Бонч-Осмоловский. – М.: Машиностроение, 1974. – 144с.
2. Буловский П.И. Автоматизация селективной сборки приборов / П.И. Буловский, Г.В. Крылов, В.А. Лопухин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с.
3. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки / В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
4. Филипович О.В. Управление параметрами селективной сборки двух деталей / О.В. Филипович, Г.В. Невар, М.И. Гарматюк и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 10. – С. 144-150.
5. Филипович О.В. Модель процесса однопараметрической селективной сборки сложных изделий / О.В. Филипович, А.Г. Карлов, Н.А. Волошина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 398-403.
6. Mansoor E.M. Selective assembly: its analysis and applications / E.M. Mansoor // Int. J. Prod. Res. – 1961. – 1(1). – pp. 13–24.
7. Кесоян А.Г. Исследование влияния погрешности измерения деталей на собираемость прецизионных соединений / А.Г. Кесоян, Л.А. Рабинович, Н.В. Кобзев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – Т.5. – №8(56). – С. 92–98.
8. Филипович О.В. Оценка влияния погрешности измерения на показатели селективной сборки с помощью имитационного моделирования /

- О.В. Филипович, Г.В. Невар // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 428-437.
9. Filipovich O.V. Simulation model of selective assembly of the conrod-piston group unit of internal combustion engines, taking into account measurement errors during sorting / O.V. Filipovich, A.I. Balakin, N.A. Balakina, etc. //Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok. – 2021. – P. 012188.
10. Филипович О.В. Определение количества комплектов при селективной сборке двух элементов с учетом влияния погрешности измерения / О.В. Филипович, Г.В. Невар, Н.А. Волошина, В.О. Филипович // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 3. – С. 105-109.

Bibliograficheskiy spisok

1. Bonch-Osmolovskij M.A. Selektivnaya sborka / M.A. Bonch-Osmolovskij. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 144s.
2. Bulovskij P.I. Avtomatizaciya selektivnoj sborki priborov / P.I. Bulovskij, G.V. Krylov, V.A. Lopuhin. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1978. – 232 s.
3. Katkovnik V.YA. Osnovy teorii selektivnoj sborki / V.YA. Katkovnik, A.I. Savchenko. – L.: Politehnika, 1991. – 303 s.
4. Filipovich O.V. Upravlenie parametrami selektivnoj sborki dvuh detalej / O.V. Filipovich, G.V. Nevar, M.I. Garmatyuk i dr. // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2015. – Vyp. 10. – S. 144-150.
5. Filipovich O.V. Model' processa odnoparametricheskoj selektivnoj sborki slozhnyh izdelij / O.V. Filipovich, A.G. Karlov, N.A. Voloshina // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2021. – № 5. – S. 398-403.
6. Mansoor E.M. Selective assembly: its analysis and applications / E.M. Mansoor // Int. J. Prod. Res. – 1961. – 1(1). – pp. 13–24.
7. Kesoyan A.G. Issledovanie vliyaniya pogreshnosti izmereniya detalej na sobiraemost' precizionnyh soedinenij / A.G. Kesoyan, L.A. Rabinovich, N.V. Kobzev //Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2009. – T.5. – №8(56). – S. 92–98.
8. Filipovich O.V. Ocenka vliyaniya pogreshnosti izmereniya na pokazateli selektivnoj sborki s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya / O.V. Filipovich, G.V. Nevar // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2017. – № 9-1. – S. 428-437.
9. Filipovich O.V. Simulation model of selective assembly of the conrod-piston group unit of internal combustion engines, taking into account measurement errors during sorting / O.V. Filipovich, A.I. Balakin, N.A. Balakina, etc. //Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok. – 2021. – P. 012188.

-
10. Filipovich O.V. Opredelenie kolichestva komplektov pri selektivnoj sborke dvuh elementov s uchetom vliyaniya pogreshnosti izmereniya / O.V. Filipovich, G.V. Nevar, N.A. Voloshina, V.O. Filipovich // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. – 2023. – № 3. – S. 105-109.

Филипович Олег Викторович, к.т.н., доцент, ophisl@yandex.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

*MODEL OF THE PROCESS OF SINGLE-VARIANT ONE-PARAMETER
SELECTIVE ASSEMBLY OF TWO ELEMENTS, TAKEN INTO ACCOUNT OF
MEASUREMENT ERRORS DURING THEIR SORTING*

O.V. Filipovich

The process of one-parameter single-variant selective assembly of two elements for the case of using a linear input-output dependence is considered. A mathematical model is constructed and a method is proposed to take into account the influence of measurement errors when sorting elements into selective groups and to determine the quality indicators of the assembly process. An example of modeling is given and prospects for further research are evaluated.

Keywords: selective assembly, measurement error, sorting, mathematical model.

Filipovich Oleg Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №3(23) 2023 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

Телефон редакции: 8(692)550077

<https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/3655-avtomatizatsiya-i-izmereniya-v-mashinopriborostroenii>

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ,

адрес типографии ФГАОУ ВО СевГУ:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Автоматизация и измерения в машино-приборостроении» обязательна.

Учредитель и издатель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33.
Севастополь, 299053.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 13.10.2023. Заказ 42/2023. Дата выхода в свет: 27.10.2023. Тираж: 50 экз.
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 11,86.

Севастополь, 2023