

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№3(15)
2021

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, 2021

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

Майстришин М.М., к.т.н.
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Вартанов М.В., д.т.н., проф.
(г. Москва)

Базадиров Г.А., д.т.н., проф.
(г. Ташкент)

Доронина Ю.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Жмудь В.А., д.т.н., проф.,
(г. Новосибирск)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Пашков Е.В., 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)

Рзаев Р.Р., д.т.н., проф.
(г. Баку)

Балакин А.И., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Рапацкий Ю.Л., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

- Бохонский А.И., Майстришин М.М., Рыжков А.И.** Оптимальное вращение объектов конечной жёсткости. 3
- Нгуен Ван Зунг, Вартанов М.В., Чан Динь Ван** Идентификация контактного состояния в сборочных операциях типа «вал-втулка» на основе сигналов силомоментного датчика 12
- Чаленков Н.И., Филипович О.В., Пашков Е.В.** Стыковочное устройство конечного звена манипулятора 26

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Кабанов А.А., Крамарь В.А., Крамарь О.А., Панасенко В.В.** Моделирование и тестирование системы управления подводным роботом с двумя манипуляторами 35
- Шушляпин Е.А., Безуглая А.Е.** Терминальное управление нелинейными системами двухэтапным методом конечного состояния 47
- Бохонский А.И., Майстришин М.М.** Снижение энергоёмкости при оптимальном вращении ротора двигателя переменного тока 54
- Вожжов, А.А., Гречко В.А.** Особенности формирования погрешностей шаговых параметров профиля поверхности при резьбонарезании 62
- Заморёнов М.В., Заморёнова Д.В., Владимирова Е.С., Малицкая А.А.** Анализ функционирования однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики в среде AnyLogic 69
- Липка В.М., Рапацкий Ю.Л., Копп В.Я., Карташов Л.Е.** Моделирование процесса шлифования резьбовой поверхности на закаленной заготовке методом конечных элементов 79

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Круговой А.Н.** Использование двигателей постоянного тока в аппаратах жидкостного дыхания 88

УДК 624

ОПТИМАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ КОНЕЧНОЙ ЖЁСТКОСТИ

Бохонский А.И.¹, Майстришин М.М.², Рыжков А.И.³

Аннотация. Исследована динамика нежёсткого объекта при его оптимальном вращении вокруг неподвижной оси. Управление «разгон-торможение» обеспечивает поворот объекта на заданный угол за минимально возможное время из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Время вращения находится из моментных соотношений в относительном движении (как один из общих корней системы трансцендентных уравнений).

Ключевые слова. Конструирование оптимального управления, упругий объект, вращение типа «разгон-торможение», переносное и относительное движение, моментные соотношения, достижение абсолютного покоя.

Введение. Методы теории колебаний линейных систем отражены в обширной литературе [1–3] и др. Оптимальному управлению колебаниям упругих систем посвящены работы [4–8] и др.

В публикациях [9–12] приведены результаты исследования оптимальных управлений поступательного и вращательного движения упругих объектов с последующей экспериментальной проверкой.

В [9–15] синтез новых оптимальных управлений основан на алгоритме решения полных обратных задач вариационного исчисления – от заданной функции, определяющей предполагаемое движение, до восстановленного функционала-критерия, подтверждающего оптимальность найденного решения.

Цель исследования – динамика вращательного движения упругого консольного стержня при использовании реверсионно конструируемых управлений.

1. Переносное управление (угловое ускорение)

Для задания угла поворота стержня как функция времени использован полином

$$\varphi_e(t) = \sum_{i=1}^6 C_i t^{i-1}, \quad (1)$$

из которого $\omega_e(t) = \frac{d\varphi_e}{dt}$, $\varepsilon_e(t) = \frac{d\omega_e}{dt}$.

Константы $C_1..C_6$ найдены с учётом краевых условий

$$\varphi(0) = 0 ; \dot{\varphi}(0) = 0 ; \varphi(T) = \varphi_* ; \dot{\varphi}(T) = 0 \quad (2)$$

и кривой симметрии управления.

Согласно (2) за заданное время T необходимо повернуть стержень на угол φ_* из исходного в конечное состояние переносного покоя (цель движения) при выполнении условий кривой симметрии управления:

$$\varepsilon_e(0) + \varepsilon_e(T) = 0, \quad \frac{d\varepsilon_e}{dt}\left(\frac{T}{2}\right) = 0. \quad (3)$$

После определения констант и факторизации полиномов следуют выражения для угла поворота, угловой скорости и углового ускорения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_e(t) &= \frac{10\varphi_*}{T^5}(T - 2t)^3, \\ \omega_e(t) &= \frac{10\varphi_*t}{T^5}(T - t)(2t^2 - 2Tt + T^2), \\ \varphi_e(t) &= \frac{\varphi_*t^2}{T^5}(5T^3 - 10T^2t + 10Tt^2 - 4t^3). \end{aligned} \quad (4)$$

Функция $\varphi_e(t)$ является решением следующего уравнения Эйлера

$$\frac{d^6\varphi_e(t)}{dt^6} = 0, \quad (5)$$

которое – первая вариация функционала-критерия

$$\int_0^T (\ddot{\varphi}_e)^2 dt \quad \text{или} \quad \int_0^T (\dot{\varepsilon}_e)^2 dt. \quad (6)$$

Функционал (6) теперь можно для проверки использовать для решения прямой задачи вариационным методом вариационной теории оптимального управления.

При поступательном движении зависимости для перемещения $S_e(t)$, скорости $V_e(t)$ и ускорения $U_e(t)$ аналогичны, но φ_* естественно заменяется на заданное расстояние L .

Если дальше, например, увеличить степень полинома, приняв

$$\varphi_e(t) = \sum_{i=1}^6 C_i t^{i+1}, \quad (7)$$

то для принятых краевых условий (2) и (3) с добавлением дополнительных

условий кривой симметрии управления вида $\frac{d^2\varepsilon_e}{dt^2}\left(\frac{T}{2}\right) = 0, \quad \frac{d^3\varepsilon_e}{dt^3}\left(\frac{T}{2}\right) = 0,$

получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_e(t) &= \frac{14\varphi_*(T - 2t)^5}{T^7}, \\ \omega_e(t) &= \frac{14\varphi_*t}{3T^7}(T - t)(4t^2 - 2Tt + t^2)(4t^2 - 6Tt + 3T^2). \end{aligned} \quad (8)$$

Для этого случая уравнение Эйлера $\frac{d^8 \varphi_e(t)}{dt^8} = 0$, которому соответствует функционал–критерий $\int_0^T (\ddot{\varepsilon}_e)^2 dt$.

Обобщение результатов моделирования, аналитические и численные эксперименты привели к универсальным аналитическим зависимостям, из которых (при изменении нечетных степеней полинома) следуют все известные и опубликованные ранее частные случаи.

Ускорение переносного вращательного движения для общего случая описывается зависимостью:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{b(2n+4)(T-2t)^n}{T^n}, \quad (9)$$

где $b = \varphi_* / T^2$, φ_* – максимальный угол поворота; T – общее время движения; $n=1,3,5,\dots$. Движение (вращение) начинается из состояния покоя и заканчивается состоянием покоя. Путём интегрирования зависимости (9) получены универсальные выражения для скорости и угла поворота:

$$\begin{aligned} \omega_e(t) &= \frac{\varphi_*}{T(n+1)} \left(1 - (T-2t)^{n+1} \cdot T^{-n-1} \right), \\ \varphi_e(t) &= \frac{\varphi_*}{2T(n+1)} \left(T^{-n-1} \cdot (T-2t)^{n+2} + 2nt + 4t - T \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Если $n=1$, то следует решение с использованием вариационного метода теории оптимального управления, а для $n=3$ получено $\varepsilon_e(t) = \frac{10\varphi_*}{T^5} (T-2t)^3$.

Можно показать, что в случае оптимального вращения объекта вокруг неподвижной оси при заданном времени движения и угле поворота существует (с ростом степени n полинома) минимальное значение энергии для достижения цели движения.

2. Относительное движение.

Колебания консольного упругого стержня

В относительном движении упругого стержня с распределённой по длине массой изгибные колебания обусловлены быстрым переносным вращением вокруг неподвижной оси и (без учёта сопротивления) описываются уравнением:

$$EJ \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + m \frac{d^2 W}{dt^2} = -f(x, t), \quad (11)$$

где EJ – жесткость при изгибе; m – масса единицы длины; $f(x, t) = mx \cdot \varepsilon_e(t)$.

Экспериментальные исследования подтверждают преобладание первой моды колебаний. Поэтому, согласно методу Фурье, решение уравнения для первой моды принято в виде:

$$W_1(x, t) = q_1(t) \cdot Y_1(x), \quad (12)$$

где, согласно методу главных координат $q_1(t)$ – главная координата; $Y_1(x)$ – амплитудная функция, характеризующая первую форму (моду) колебаний. Главная координата находится из уравнения

$$\ddot{q}_1 + k^2 q_1 = -\frac{Q_1(t)}{M_1}, \quad (13)$$

где $Q_1(t)$ – обобщенная сила, которая определяется согласно зависимости

$$Q_1(t) = \int_0^L f(x, t) \cdot Y_1(x) dx. \quad (14)$$

Обобщённая масса:

$$M_1 = \int_0^L m \cdot Y_1^2(x) dx. \quad (15)$$

Например, для принятой функции прогиба $Y_1(x) = 1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right)$, определяющей первую моду колебаний, обобщённая сила и масса соответственно равны:

$$\begin{aligned} Q_1(t) &= 0,268mL^2 \cdot \varepsilon_e(t) \\ M_1 &= 0,269mL. \end{aligned} \quad (16)$$

Итак, уравнение (13) преобразуется к виду

$$\ddot{q}_1 + k_1^2 q_1 = -1,185L \cdot \varepsilon_e(t), \quad (17)$$

где угловое ускорение $\varepsilon_e(t) = \frac{14\varphi_*(T-2t)^5}{T^7}$, k_1 – частота первого тона собственных колебаний стержня. Заданной форме колебаний $Y_1(x)$ соответствует частота $k_1 = \frac{3,515}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}$.

Для примера на **Рис.1** изображена схема поворота на задний угол космического грузовика.

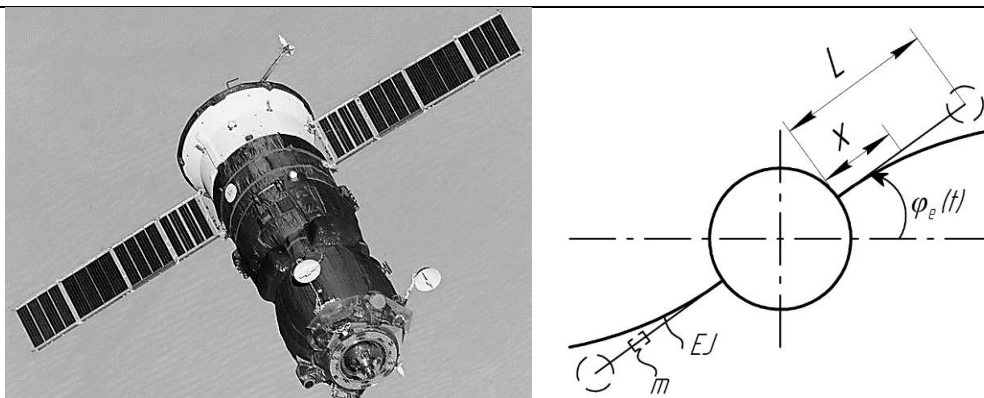


Рис.1 - Схема поворота космического грузового корабля

Исходные данные: $\varphi_* = \pi/2$, $k = 10 \text{ с}^{-1}$, $T = 1,43385 \text{ с}$. Графики функций $\varepsilon_e(t)$, $\omega_e(t)$ и $\varphi_e(t)$ изображены на **Рис.2**, из которых следует, что в середине интервала движения ($T \geq t \geq 0$) скорость $\omega_e(t)$ близка к константе.

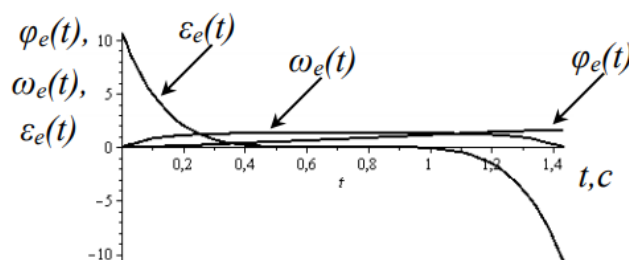


Рис.2 – Графики переносного движения

Решение дифференциального уравнения (17) при заданной правой части громоздко и поэтому представлено только графиками. Время движения T найдено как первый общий корень системы трансцендентных уравнений, в которые обращаются моментные соотношения

$$q_1(T) = 0, \quad \dot{q}_1(T) = 0. \quad (19)$$

Графики $q_1(t)$ и $\dot{q}_1(t)$ изображены на **Рис.3,4**.

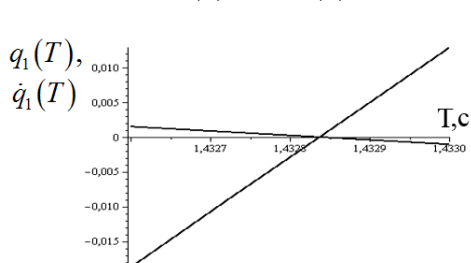


Рис.3 – Относительное движение

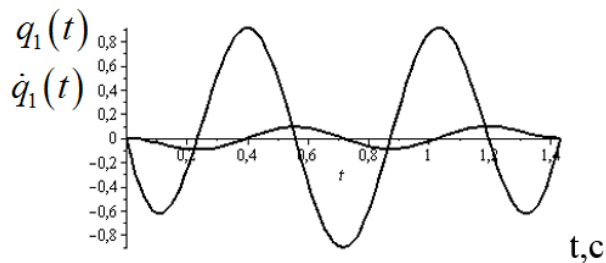


Рис.4 – Графическое определение общего корня трансцендентных уравнений

Как и следовало ожидать, сочетание переносного и относительного покоя обеспечивает абсолютный покой в конечном состоянии.

3. Вычисление энергии управления

Численные эксперименты подтверждают тенденцию сокращения энергии при росте степени полинома, задающего движение из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя при известных – времени движения и перемещении. Предельное значение энергии (работа силы тяги), действия по Лагранжу стремятся при $n \rightarrow \infty$ к минимальной величине:

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} 2J \int_0^{T/2} \varepsilon_e(t) \cdot \omega_e(t) dt = J \frac{\varphi_*^2}{T^2}.$$

Выводы:

1. На примерах проиллюстрированы алгоритмы реверсионного конструирования оптимальных управлений переносным вращательным движением упругих объектов. Найдены универсальные аналитические зависимости для произвольной нечетной степени полинома переносного ускорения (управления), из которых следуют известные и ранее опубликованные частные случаи.

2. Показано существование предела энергозатрат для достижения цели движения – поворота в новое состояние абсолютного покоя при заданном времени вращения и угле поворота.

3. Время движения находится графически как один из общих корней моментных соотношений, представляющих собой систему трансцендентных уравнений.

Библиографический список

1. Бернштейн С.А. Основы динамики сооружений / С.А. Бернштейн. – Госиздат, М. – Л., 1938. – 160 с.
2. Бидерман В.П. Прикладная теория механических колебаний / В.П. Бидерман. – М.: Высш. школа, 1972. – 416 с.
3. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
4. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. школа, 1982. – 116 с.
5. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
6. Олейников В.А. Основы оптимального и экстремального управления / В.А. Олейников, Н.С. Зотов, А.М. Пришвин. – М.: Высшая школа, 1969. – 296 с.

7. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
8. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
9. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых систем: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Мозолевский М.И. – Севастополь: СевНТУ, 2007. – 296 с.
10. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисление в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.
11. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления / А.И. Бохонский. — Palmarium Academic Publishing, 2013. – 78 с.
12. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. — М.: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
13. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – СПб: НИЦ МС, 2020. – 120с.
14. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170с.
15. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.

Bibliograficheskiy spisok

1. Bernshtejn S.A. Osnovy dinamiki sooruzhenij / S.A. Bernshtejn. – Gosizdat, М. – L., 1938. – 160 s.
2. Biderman V.P. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebanij / V.P. Biderman. – М.: Vyssh. shkola, 1972. – 416 s.
3. Panovko YA.G. Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara / YA.G. Panovko. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 320 s.
4. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyh sistem / I.A. Karnovskij, YU.M. Pochtman. – K.: Vyssh. shkola, 1982. – 116 s.
5. Pontryagin L.S. Matematicheskaya teoriya optimal'nyh processov / L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskij, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko. – М.: Nauka, 1969. – 384 s.
6. Olejnikov V.A. Osnovy optimal'nogo i ekstremal'nogo upravleniya / V.A. Olejnikov, N.S. Zotov, A.M. Prishvin. – М.: Vysshaya shkola, 1969. – 296 s.

7. CHernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 s.
8. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. YAkovlev. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 536 s.
9. Bohonskij A.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemykh sistem: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, Mozolevskij M.I. – Sevastopol': SevNTU, 2007. – 296 s.
10. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischislenie v mekhanike / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 212 s.
11. Bohonskij A.I. Aktual'nye zadachi variacionnogo ischisleniya / A.I. Bohonskij. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 78 c.
12. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti / A.I. Bohonskij. – M.: INFRA-M, 2016. – 174 s.
13. Bohonskij A.I. Konstruirovaniye optimal'nykh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – SPb: NIC MS, 2020. – 120s.
14. Bohonskij A.I. Mekhanika upravlyaemogo dvizheniya ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya. – M.: INFRA-M, 2021. – 170s.
15. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.

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

²*Майстришин Михаил Михайлович, к.т.н., доцент, mihail.maistrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

³*Рыжков Александр Игоревич, ассистент, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.*

OPTIMAL ROTATION OF FINAL STIFFNESS CANTILEVER BEAM

A.I. Bokhonsky, M.M. Maistishin, A.I. Ryzhkov

The dynamics of a non-rigid rod was investigated during its optimal rotation around fixed axis. The "acceleration-deceleration" control provides rotation of the rod at a given angle in the shortest possible time from the initial to the final state of absolute rest. The rotation time was found from the moment

relations in the relative motion (as one of the common roots of the system of transcendental equations).

Keywords: design of optimal control, elastic object, rotation of the "acceleration-deceleration" type, portable and relative motion, moment relations, achieving absolute rest.

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

Maistishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, mihail.maystrishin@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Ryzhkov Aleksandr Igorevich, assistant, ryzhkov2206@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОНТАКТНОГО СОСТОЯНИЯ В СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ ТИПА «ВАЛ-ВТУЛКА» НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ СИЛОМОМЕНТНОГО ДАТЧИКА

Нгуен Ван Зунг¹, Вартанов М.В.², Чан Динь Ван³

Аннотация. В статье решена задача определения текущего контактного состояния при сборке с использованием стандартного метода Гауссова распределения при получении информации о силе и моменте с силомоментного датчика. Приведен алгоритм управления процессом сопряжения деталей типа «вал-втулка» при роботизированной сборке с силомоментным датчиком. Экспериментальная установка с промышленным роботом ABB IRB-140 используется для оценки эффективности предлагаемого способа.

Ключевые слова. Роботизированная сборка, Гауссовы смеси, силомоментный датчик, контактное состояние.

Состояния контакта считаются одним из важнейших элементов передачи навыков человека при выполнении роботизированных задач, управляемых силой. Они обеспечивают абстрактное знание об окружающей среде путем использования силы и момента, положения и ориентации и/или линейных и угловых скоростях манипулируемого объекта при получении таких навыков. Общей особенностью сигналов подтверждения состояния контакта является отсутствие нестационарного поведения сигналов, то есть ненормального распределения сигналов, что часто имеет место во многих роботизированных задачах. Чтобы приспособиться к такому нестационарному поведению сигналов, можно рассмотреть использование нескольких гауссовых компонентов вместо одного и использование концепции модели Гауссовой смеси распределения (GMM) при построении вероятности для каждого сигнала. Известный алгоритм ожидания максимизации (ЕМ) [1] может быть использован для нахождения параметров компонентов GMM, которые максимизируют логарифмическую вероятность, и, следовательно, может быть получено оптимальное моделирование этих нестационарных сигналов.

В данной статье предлагается использовать основанную на ожидании максимизации модель Гауссовой смеси распределения (ЕМ-GMM) в распознавании контактного состояния совместимых задач движения роботов.

Авторами предлагается структурная схема системы адаптивного управления сопряжением деталей типа «вал-втулка» при роботизированной сборке с силомоментным очувствлением (**Рис.1**)

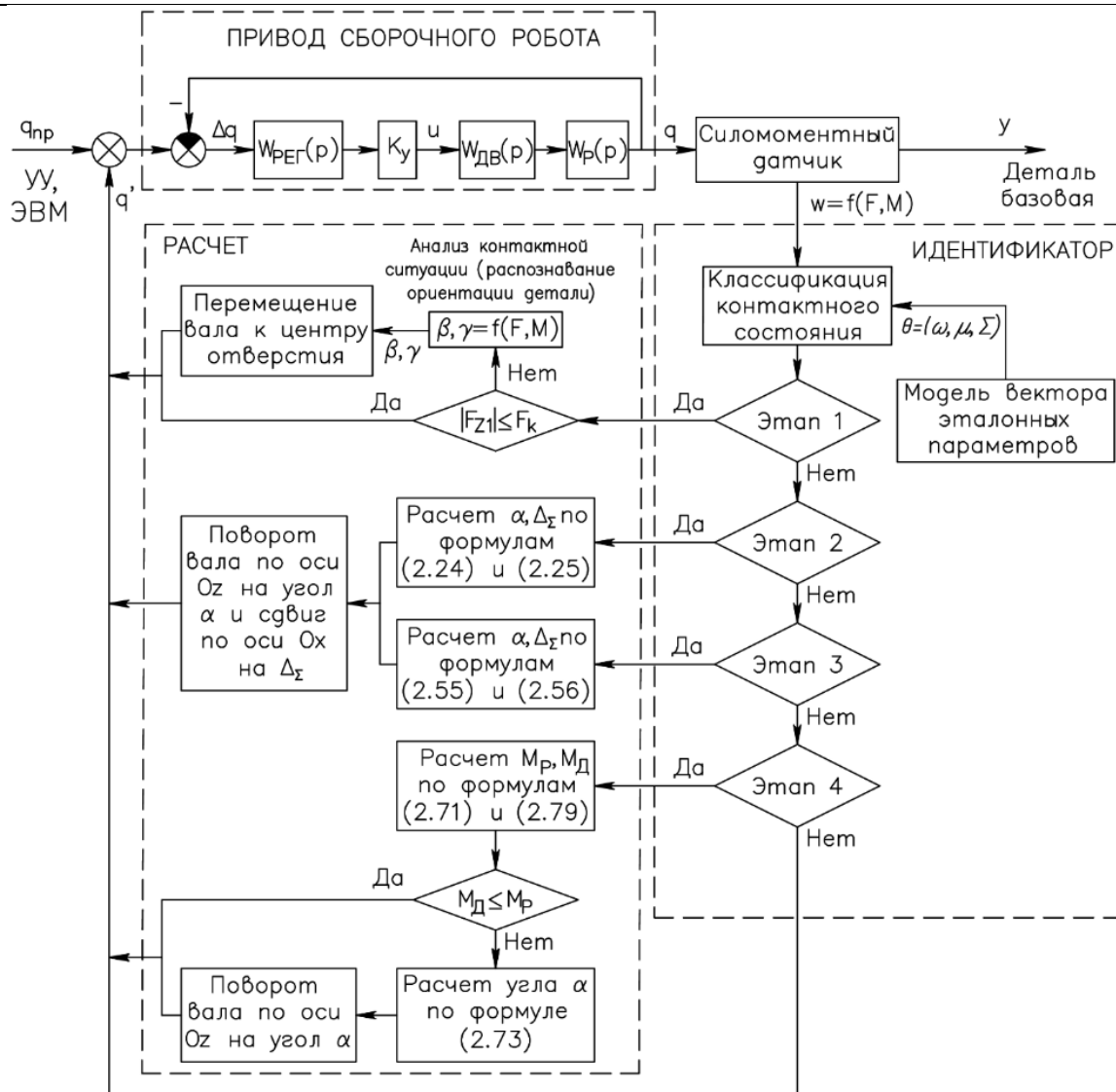


Рис.1 – Алгоритм управления сопряжением деталей типа «вал-втулка» при роботизированной сборке с силомоментным датчиком

В схеме использованы следующие обозначения:

$q_{пр}$ – задающее воздействие (программная траектория);

u – сигнал управления двигателем;

q – выходная координата привода;

y – траектория перемещения присоединяемой детали;

$\omega = f(F, M)$ – сигналы датчика сил и моментов;

α и Δ_{Σ} – угол наклона продольной оси (оси симметрии) и погрешности положения осей присоединяемой детали, которые требуется идентифицировать по сигналам с датчика сил и моментов;

q' – корректирующее воздействие, направленное на снижение сигналов датчика сил и моментов, а, следовательно, на уменьшение углов наклона оси симметрии детали;

$W_{PEГ}(p)$, K_Y , $W_{ДВ}(p)$, $W_p(p)$ – передаточные функции ПИД-регулятора, усилитель мощности, электродвигатель, редуктор.

Модель включает в себя следующие блоки: привод сборочного робота, силомоментный датчик, идентификатор и блок расчета контактного состояния. Целью блока идентификатора является использование сигналов силомоментного датчика для идентификации текущего контактного состояния. Для достижения этой цели, необходимо применить модели GMM на основе ожиданий максимизации. Для манипулируемого объекта можно описать сигналы силомоментного датчика x_k в виде:

$$x_k = [F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}] \quad (1)$$

Следовательно, классификатор имеет входной сигнал $x_k = [x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,6}]$, где k – индекс выборки.

Робот запрограммирован для перемещения вала вниз с заданной скоростью и траекторией.

Сиλοмоментный датчик использован для оценки сил и моментов по трем осям $O_{дат}x_{дат}$, $O_{дат}y_{дат}$ и $O_{дат}z_{дат}$ на каждом шаге перемещения манипулятора робота.

Сравнение значений модуля $F_{x1, y1, z1}$ и F_K , если $|F_{x1, y1, z1}| \leq F_K$ (F_K – сила, возникающая при контакте вала с торцом втулки), то робот продолжает опускать вал на следующий программный шаг. Наоборот, если $|F_{x1, y1, z1}| > F_K$ значения сил и моментов подаются на блок «классификация контактного состояния» для определения этапа процесса сборки.

Выходным сигналом блока «классификация контактного состояния» является номер кластера (t , [22]). Номер кластера имеет три различных значения, что соответствует трем этапам сборки. Условия:

– если $t=1$: то этап 1: вычисление значения угла α и погрешности положения осей Δ_Σ . Программа управления формирует сигнал роботу на поворот вала по оси $O_{дат}y$ на угол α и сдвиг по оси $O_{дат}x$ на Δ_Σ ;

– если $t=2$: то этап 2: вычисление значения угла α и погрешности положения осей Δ_Σ . Программа управления формирует сигнал роботу на поворот вала относительно оси $O_{дат}y$ на угол α и сдвиг его по оси $O_{дат}x$ на Δ_Σ .

– если $t=3$: то этап 3: вычисление значений M_d и M_p . Сравнение значений M_d и M_p : если $M_d \leq M_p$, то робот продолжает опускать вал на следующий запрограммированный шаг. Если $M_d > M_p$ рассчитывается значение угла поворота α . Программа управления формирует сигнал роботу на поворот вала относительно оси $O_{дат}$ на угол α ;

– в остальных случаях, робот продолжает опускать вал на следующий программный шаг.

Сигналы сил и моментов, измеряемые силомоментным датчиком, передаются в блок классификация контактного состояния для обновления текущего контактного состояния. Этот цикл отработывается, пока вал не достигает заданной глубины. Возможен случай, когда силы, измеряемые силомоментным датчиком, резко увеличиваются и процесс сборки останавливается. Данная ситуация может быть идентифицирована как сборка бракованных деталей.

Блок вектора эталонных параметров

В работе используем модели EM-GMM для определения вектора параметров θ модели контактных состояний. Модель GMM представляет собой функцию параметра плотности вероятности, выраженную как взвешенная сумма гауссовых плотностей компонентов. Параметры GMM оцениваются на основе эталонных данных с использованием EM-алгоритма. Предположим, что однополосное распределение представлено выражением [1]:

$$N(x_k, \mu, \Sigma) = \frac{1}{|2\pi|^{D/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x_k - \mu)^T \Sigma^{-1}(x_k - \mu)\right), \quad (2)$$

где D – ширина вектора (для задачи распознавания контактных состояний, рассматриваемой в сигнале силомоментного датчика; ясно, что $D = 6$ и каждая модель имеет 6 входов);

$\mu \in R^D$ – среднее значение;

$\Sigma \in R^{D \times D}$ – ковариационная матрица;

$|\Sigma| \in R$ – определитель Σ .

Модель GMM может быть описана как [1]:

$$p(x_k) = \sum_{i=1}^M \omega_i N_i(x_k, \mu_i, \Sigma_i), \quad (3)$$

M – общее число компонентов GMM;

ω_i , μ_i и Σ_i – вес, средняя и ковариантность i -й гауссовой компоненты.

Предположим, что $\theta_i = (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)$ и рассмотрим вектор параметров $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]^T$. Понятно, что найти значения параметров очень важно при точном моделировании данных признаков.

Поэтому модель (3) можно записать в терминах параметров θ как:

$$p(x_k; \theta) = \sum_{i=1}^M \omega_i N_i(x_k, \mu_i, \Sigma_i). \quad (4)$$

Поиск вектора параметров θ , который оптимизирует модели из доступных измерений, повысит эффективность процесса классификации. Одним из наиболее эффективных подходов к поиску этих параметров является ЕМ-алгоритм [1]. Алгоритм будет вычислять вероятность для каждого наблюдения, принадлежащего каждому классу, на основе выбранного распределения. Основная цель алгоритма классификации ЕМ – нахождение категориальных решений для максимизации общей вероятности для категориальных данных с требуемым количеством классов. Алгоритм ЕМ состоит из двух этапов: Е-шаг, на котором оценивается логарифмическое правдоподобие для текущих параметров и М-шаг, в котором параметр θ обновляется таким образом, чтобы в результате получилось максимирование логарифмическому правдоподобию.

Чтобы реализовать алгоритм ЕМ, рассмотрим эталонные данные $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ (N – замер), которые могут быть экспериментально получены. Функция правдоподобия данных X , заданная параметром θ , может быть определена как:

$$\ell(X; \theta) = \prod_{k=1}^N p(x_k; \theta). \quad (5)$$

Определим логарифм $\ell(X; \theta)$ равным $L(X; \theta)$, который называется логарифмом правдоподобия. Логарифмируя выражение (5), получаем логарифм правдоподобия:

$$L(X; \theta) = \sum_{k=1}^N \ln(p(x_k; \theta)). \quad (6)$$

Параметр θ , максимизирующий (6), можно описать как

$$\theta(t) = \arg \max_{\theta} L(X; \theta(t)) \quad (7)$$

при условии:

$$\sum_{i=1}^M \omega_i = 1. \quad (8)$$

Выражение (8) содержит проблему ограниченной оптимизации и аналитические решения могут быть невозможны. Поэтому для решения такой задачи были предложены итерационные решения, подобные ЕМ - алгоритму. Предположим, что θ – параметр на определенной итерации θ и следующая итерация θ^{new} . Можно сказать, что сходимость θ достигается, если:

$$|\theta^{new} - \theta| \leq \varepsilon_m. \quad (9)$$

Аналогично логарифмическому правдоподобию, сходимость достигается, если:

$$|\ln p(X; \theta^{new}) - \ln p(X; \theta)| \leq \epsilon_m, \quad (10)$$

где ε_m и ϵ_m малые положительные константы [2], количественно определяющие сходимость θ и $\ln p(X; \theta)$ соответственно.

Суть ЕМ-алгоритма состоит в том, чтобы использовать доступные наблюдаемые данные набора для оценки недостающих данных, а затем использовать эти данные для обновления значений параметров. Дальнейшие шаги описывают ЕМ-алгоритм [1, 3-5]:

Шаг 1: инициализировать вектор параметров $\theta_i = (\omega_i, \mu_i, \Sigma_i)$. Инициализация сходимости параметры ε_m и ϵ_m .

Шаг 2: (Е-шаг) для текущего вектора параметров θ_i вычислить функцию значение $\gamma(c_{ik})$:

$$\gamma(c_{ik}) = \frac{\omega_i N_i(x_k, \mu_i, \Sigma_i)}{\sum_{j=1}^M \omega_j N_j(x_k, \mu_j, \Sigma_j)}. \quad (11)$$

Шаг 3: (М-шаг) переоценка параметров с использованием текущей зависимости:

$$\mu_i^{new} = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^N \gamma(c_{ik}) x_k, \quad (12)$$

$$\Sigma_i^{new} = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^N \gamma(c_{ik}) (x_k - \mu_i^{new})(x_k - \mu_i^{new})^T, \quad (13)$$

$$\omega_i^{new} = \frac{N_i}{N}, \quad (14)$$

где

$$N_i = \sum_{k=1}^N \gamma(c_{ik}). \quad (15)$$

Шаг 4: Вычисление логарифмического правдоподобия:

$$\ln p(X; \theta) = \sum_{k=1}^N \ln \left\{ \sum_{i=1}^M \omega_i N(x_k, \theta) \right\}. \quad (16)$$

Проверка сходимости: если (9) или (10) удовлетворены, то - остановка. В противном случае переход к шагу 2.

Блок классификации контактного состояния.

Основываясь на вероятности вектора данных x_k принадлежности к определенному классу c_i в модели, мы можем классифицировать контактное состояние. Предположим, что вектор x_k принадлежит одному из классов $[c_1, c_2, \dots, c_C]$, C – общее количество классов. В рамках Байесовской классификации можно сказать, что вектор x_k принадлежит классу c_i , что [1, 6-8]:

$$p(c_i | x_k) \geq p(c_j | x_k). \quad (17)$$

Для $i \neq j$. $p(c_i | x_k)$ называется апостериорной вероятностью класса c_i с учетом вектора x_k и может быть вычислена с использованием правила Байеса как:

$$p(c_i | x_k) = \frac{p(x_k | c_i) p(c_i)}{p(x_k)}, \quad (18)$$

где $p(x_k | c_i)$ является функцией плотности вероятности класса c_i в векторном пространстве x_k ;

$p(c_i)$ – априорная вероятность того, что отражает вероятность класса c_i ;

$p(x_k)$ – вероятность векторном пространстве.

В обычном байесовском классификаторе гауссово распределение используется для обозначения члена $p(x_k | c_j)$:

$$p(x_k | c_i) = N_i(x_k, \mu_i, \Sigma_i). \quad (19)$$

Аналогично, для члена $p(c_i)$ принимаем:

$$p(c_i) = \omega_i. \quad (20)$$

Тогда значение $p(c_i | x_k)$ можно вычислить:

$$p(c_i | x_k) = \frac{\omega_i N_i(x_k, \mu_i, \Sigma_i)}{\sum_{j=1}^C \omega_j N_j(x_k, \mu_j, \Sigma_j)} = \gamma(c_{ik}). \quad (21)$$

Величина $\gamma(c_{ik})$ называется ответственностью, которую берет на себя i -й компонент для объяснения x_k [9].

Одним из применений смеси нормальных распределений является решение задачи кластеризации на C кластеров. В работе [10] сказано, что при выполнении задачи сборки «вал-штулка» робот проходит различные переключаемые фазы. Общая задача разбита на три этапа. Поэтому получим значение $C = 3$. В этом случае номер кластера для объекта x_k определяется величиной:

$$t = \arg \max_{1 \leq i \leq 3} \gamma(c_{ik}). \quad (22)$$

Если:

$t = 1$, то вектор x_k принадлежит классу c_1 , соответственно этап 1;

$t = 2$, то вектор x_k принадлежит классу c_2 , соответственно этап 2;

$t = 3$, то вектор x_k принадлежит классу c_3 , соответственно этап 3.

Экспериментальная установка. Для проведения экспериментов создана экспериментальная установка, оснащенная силомоментным датчиком (**Рис.2**) [10]. Установка смонтирована на базе промышленного робота IRB-140 с контроллером IRC5. Сопрягаемые цилиндрические детали жёстко базируются в схвате робота 2 и базовом приспособлении 4. Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленным роботом, а также регистрируется персональным компьютером 5.

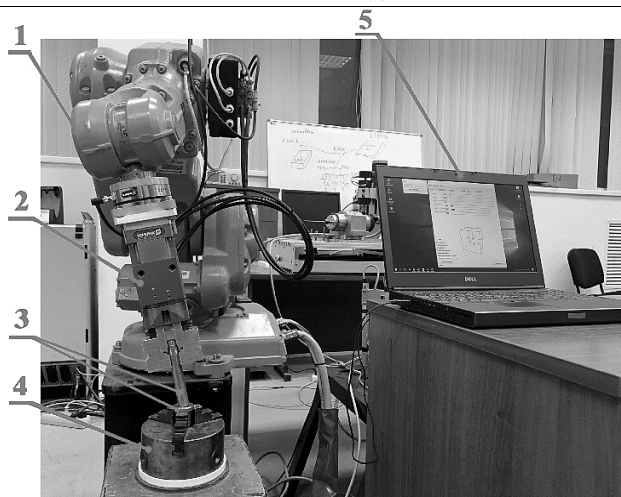


Рис.2 – Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки: 1 – промышленный робот ABB IRB 140; 2 – захватное устройство; 3 – экспериментальные образцы; 4 – базовое приспособление; 5 – персональный компьютер

Вал и втулка изготовлены из стали 45. Коэффициент трения определялся при различных глубинах сопряжения вала и втулки [11]. Сопряжение выполнялось по посадке $\varnothing 16 \frac{H7}{f7}$ и фаске на сопрягаемых поверхностях. Допускается ε_m равно 1×10^{-6} .

Эталонные сигналы сил и моментов соответствующих этапов были зафиксированы и приведены на графике (Рис.3).

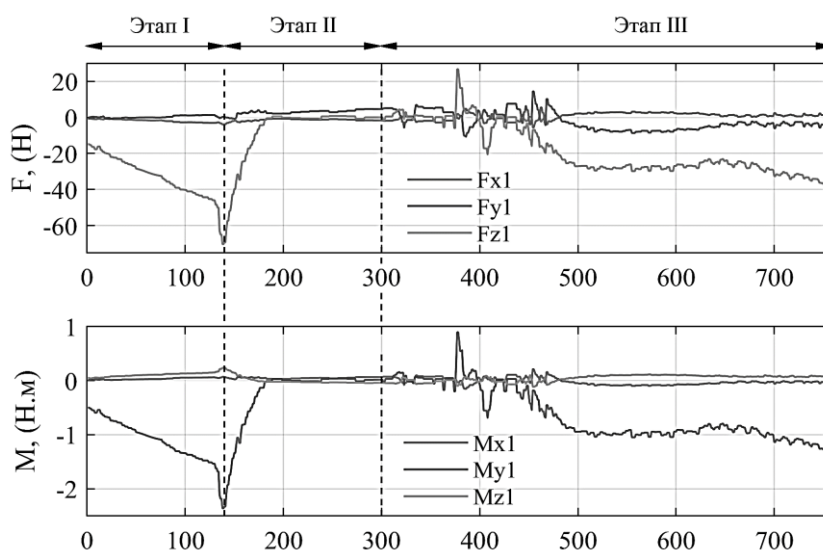


Рис.3 – Сигналы эталонных данных, полученные экспериментально

На основе экспериментальных данных рассчитаны значения с помощью MATLAB. Получен вектор параметров модели GMM:

$$\omega = [0,194809 \quad 0,227715 \quad 0,577476]$$

$$\mu = \begin{bmatrix} -2,023356 & -1,390311 & 0,784345 \\ 0,238042 & 3,827432 & -2,768018 \\ -35,249164 & 0,069110 & -20,115701 \\ 0,035530 & 0,054282 & -0,022425 \\ -1,181235 & 0,015810 & -0,694226 \\ 0,117012 & -0,036292 & 0,053983 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_1 = \begin{bmatrix} 0,690937 & -0,350936 & 9,651971 & -0,013861 & 0,322561 & -0,030904 \\ -0,350936 & 0,408816 & -3,053004 & 0,008666 & -0,100338 & 0,007845 \\ 9,651971 & -3,053004 & 150,527638 & -0,181298 & 5,044909 & -0,495489 \\ -0,013861 & 0,008666 & -0,181298 & 0,000291 & -0,006048 & 0,000565 \\ 0,322561 & -0,100338 & 5,044909 & -0,006048 & 0,169093 & -0,016617 \\ -0,030904 & 0,007845 & -0,495489 & 0,000565 & -0,016617 & 0,001651 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_2 = \begin{bmatrix} 0,322317 & -0,834528 & -0,009174 & -0,011847 & -0,003442 & 0,007103 \\ -0,834528 & 2,177061 & 0,087371 & 0,030836 & 0,011087 & -0,018864 \\ -0,009174 & 0,087371 & 0,423832 & 0,000835 & 0,014585 & -0,002214 \\ -0,011847 & 0,030836 & 0,000835 & 0,000438 & 0,000144 & -0,000266 \\ -0,003442 & 0,011087 & 0,014585 & 0,000144 & 0,000533 & -0,000145 \\ 0,007103 & -0,018864 & -0,002214 & -0,000266 & -0,000145 & 0,000171 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_3 = \begin{bmatrix} 3,220092 & -7,708743 & -9,801656 & -0,102129 & -0,365886 & 0,062593 \\ -7,708743 & 19,686065 & 30,439978 & 0,255470 & 1,113914 & -0,188287 \\ -9,801656 & 30,439978 & 157,826112 & 0,300793 & 5,482589 & -0,482970 \\ -0,102129 & 0,255470 & 0,300793 & 0,003397 & 0,011259 & -0,002267 \\ -0,365886 & 1,113914 & 5,482589 & 0,011259 & 0,190703 & -0,017092 \\ 0,062593 & -0,188287 & -0,482970 & -0,002267 & -0,017092 & 0,002481 \end{bmatrix}.$$

В таблице 1 приведены значения составляющих сил и моментов, полученные с силомоментного датчика и рассчитанные с помощью MATLAB из уравнений (22).

Таблица 1. – Экспериментальные результаты

№	F_{x1}, H	F_{y1}, H	F_{z1}, H	$M_{x1}, H.m$	$M_{y1}, H.m$	$M_{z1}, H.m$	t
1	-2,980370	0,697680	-48,348507	0,054315	-1,620882	0,160956	1
2	-2,725430	0,104040	-50,029350	0,047124	-1,680858	0,166311	1
3	-3,010720	-0,581400	-62,806168	0,048501	-2,114154	0,208845	1
4	-3,362780	-0,140760	-64,925491	0,056916	-2,182851	0,215271	1
5	-3,951570	0,318240	-70,248146	0,068697	-2,358954	0,234702	1
6	-3,793750	0,042840	-69,249390	0,063801	-2,326365	0,233784	1
7	-0,843730	2,282760	-0,535920	0,032895	-0,010251	-0,020349	2
8	-0,716260	2,117520	0,578550	0,029529	0,026775	-0,022644	2
9	-0,716260	2,117520	0,578550	0,029529	0,026775	-0,022644	2
10	-0,789100	2,148120	-0,140070	0,031212	0,002601	-0,020502	2
11	-1,037970	2,766240	-0,377580	0,039627	-0,002907	-0,024174	2
12	-1,122950	3,096720	-0,657720	0,044523	-0,011628	-0,028764	2
13	0,297430	-3,880080	-12,350519	-0,042993	-0,424269	0,099297	3
14	-1,007620	2,509200	-16,954559	0,049572	-0,568854	-0,004590	3
15	-1,529640	4,265640	-19,640249	0,076500	-0,655605	-0,024786	3
16	1,189720	-2,325600	-23,446499	-0,014382	-0,811971	0,026010	3
17	1,462870	-3,366000	-25,243050	-0,027540	-0,876078	0,042381	3
18	2,689010	-7,282800	-28,489019	-0,080172	-0,998631	0,092259	3
19	1,177580	-4,369680	-33,135689	-0,033813	-1,142910	0,088740	3
20	0,989410	-3,678120	-39,304859	-0,019431	-1,351296	0,084762	3

Закключение.

В данной статье предложен алгоритм сборки с помощью робота, который управляет выполнением высокоточных соединений путем разделения процесса сборки на три этапа. Модель Гауссовых распределений, основанная на ожидании максимизации, будет предполагается использование для создания эффективных классификаторов контактных состояний при управлении манипулятором робота, выполняющим процесс сопряжения.

Библиографический список

1. Ghalyan I.F.J. Force-Controlled Robotic Assembly Processes of Rigid and Flexible Objects / I.F.J. Ghalyan. – Verlag, Springer, 2016. – 184 с.
2. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы / А.В. Тимофеев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 332 с.
3. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. / С. Рассел, П. Норвиг: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1408с.

4. Черезов Д.С. Обзор основных методов классификации и кластеризации данных / Д.С. Черезов, Н.А. Тюкачев // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. «Системный анализ и информационные технологии», Вып. 2. 2009 – С. 25-29.
5. Сташков Д.В. Системы автоматической группировки объектов на основе разделения смеси распределений: дисс. кандидата технических наук: 05.13.01 / Д.В. Сташков. – К.: ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2017. – 172 с.
6. Jasim I.F. Contact-State Recognition of Compliant Motion Robots Using Expectation Maximization-Based Gaussian Mixtures / I.F. Jasim, P.W. Plapper // 41st International Symposium on Robotics, 2014. – С. 1-8.
7. Jasim I.F. Contact-state modelling in force-controlled robotic peg-in-hole assembly processes of flexible objects using optimised Gaussian mixtures / I.F. Jasim, P.W. Plapper, H. Voos // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(8), 2015. – С. 1448–1463. doi:10.1177/0954405415598945.
8. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning / C. Bishop. – New York Springer, 2006. – 738 с.
9. Ветров Д.П. Автоматическое определение количества компонент в ЕМ-алгоритме восстановления смеси нормальных распределений / Д.П. Ветров, Д.А. Кропотов, А.А. Осокин // Журнал вычислительная математика и математическая физика, Т.50, №4, 2010. – С. 770–783.
10. Vartanov M.V. Determination of Changing Friction Coefficient Using Force Torque Sensor During Robotic Assembly of Cylindrical Connection with Clearance / M.V. Vartanov, Van Dung Nguyen, Dinh Van Tran // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia, 2020. – С. 977-981. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208047.

Bibliograficheskiy spisok

1. Ghalyan I.F.J. Force-Controlled Robotic Assembly Processes of Rigid and Flexible Objects / I.F.J. Ghalyan. – Verlag, Springer, 2016. – 184 с.
2. Timofeev A.V. Adaptivnye robototekhnicheskie komplekсы / A.V. Timofeev. – L.: Mashinostroenie, 1988. – 332 с.
3. Rassel S. Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podhod, 2-e izd. / S. Rassel, P. Norvig: Per. s ang. – M.: Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2007. – 1408s.
4. CHerezov D.S. Obzor osnovnyh metodov klassifikacii i klasterizacii dannyh / D.S. CHerezov, N.A. Tyukachev // Vestnik Voronezh. gos. un-ta. Ser. «Sistemnyy analiz i informacionnye tekhnologii», Vyp. 2. 2009 – S. 25-29.
5. Stashkov D.V. Sistemy avtomaticheskoy gruppировки ob"ektov na osnove razdeleniya smesi raspredelenij: diss. kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.13.01

- / D.V. Stashkov. – K.: FGBOU VO Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologij imeni akademika M.F. Reshetneva, 2017. – 172 s.
6. Jasim I.F. Contact-State Recognition of Compliant Motion Robots Using Expectation Maximization-Based Gaussian Mixtures / I.F. Jasim, P.W. Plapper // 41st International Symposium on Robotics, 2014. – С. 1-8.
7. Jasim I.F. Contact-state modelling in force-controlled robotic peg-in-hole assembly processes of flexible objects using optimised Gaussian mixtures / I.F. Jasim, P.W. Plapper, H. Voos // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(8), 2015. – S. 1448–1463. doi:10.1177/0954405415598945.
8. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning / C. Bishop. – New York Springer, 2006. – 738 s.
9. Vetrov D.P. Avtomaticheskoe opredelenie kolichestva komponent v EM-algoritme vosstanovleniya smesi normal'nyh raspredelenij / D.P. Vetrov, D.A. Kropotov, A.A. Osokin // Zhurnal vychislitel'naya matematika i matematicheskaya fizika, T.50, №4, 2010. – S. 770–783.
10. Vartanov M.V. Determination of Changing Friction Coefficient Using Force Torque Sensor During Robotis Assembly of Cylindrical Connection with Clearance / M.V. Vartanov, Van Dung Nguyen, Dinh Van Tran // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia, 2020. – S. 977-981. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208047.

¹Нгуен Ван Зунг, аспирант, nguyendungpt45@gmail.com, Россия, Москва, Московский политехнический университет

²Вартанов Михаил Владимирович, д.т.н., профессор, natalia.vartanova@bk.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет

³Чан Динь Ван, магистрант, trandinhvan1221@gmail.com Россия, Москва, Московский политехнический университет

IDENTIFICATION OF THE CONTACT STATE IN ASSEMBLY OPERATIONS TYPE «SHAFT-SLEEVE» BASED ON FORCE SENSOR SIGNALS

V.D. Nguyen, M.V. Vartanov, D.V. Tran

The article solves the problem of determining contact state during assembly using the Gaussian method distribution when obtaining information about the force and moment from the force-torque sensor. Furthermore, the article presents an algorithm for controlling the process of mating parts of the «shaft-sleeve» type during robotic assembly with a force-torque sensor. Finally, an experimental

setup with an ABB IRB-140 industrial robot is used to evaluate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Robotic assembly, Gaussian mixtures, force-torque sensor, contact state.

Nguyen Van Dung, PhD student, nguyendungpt45@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

Vartanov Mikhail Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, natalia.vartanova@bk.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

Tran Dinh Van, master, trandinhvan1221@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

СТЫКОВОЧНОЕ УСТРОЙСТВО КОНЕЧНОГО ЗВЕНА МАНИПУЛЯТОРА

Чаленков Н.И.¹, Филипович О.В.², Пашков Е.В.³

Аннотация. *Приведены результаты анализа конструкции и функциональных возможностей стыковочного устройства для установки и закрепления на конечном звене манипулятора промышленного робота расположенных в магазине сменных инструментов и схватов. Описана конструкция и принцип работы стыковочного устройства конечного звена манипулятора за счёт использования центрирующих цилиндрических и ромбических пальцев, являющихся сердечниками электромагнитов.*

Ключевые слова. *Манипулятор, стыковочное устройство, схват, центрирующий палец рабочий, инструмент, ромбический палец, электромагнит.*

Современное производство характеризуется широким использованием средств автоматизации, к которым, в частности, относятся промышленные роботы. Они позволяют уменьшить время выполнения технологических операций, облегчить труд работников, особенно в экстремальных условиях опасных для их здоровья. Достаточно часто при выполнении вспомогательных технологических операций используются промышленные роботы, созданные на базе SCARA-кинематики. Их схемы, имеющие оси кинематических пар, расположенные параллельно друг другу, обеспечивают высокую манипулятивность и большой угол сервиса. При этом они имеют ряд недостатков, таких как низкий показатель грузоподъемность/масса манипулятора, суммирование погрешностей в перемещениях шарниров на концах звеньев и относительно низкую жесткость [1–3].

Разработанная на кафедре «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» конструкция многофункционального SCARA-модуля позволяет выполнять различные технологические операции путем оперативной автоматической замены рабочего органа (**Рис.1**). Модуль смонтирован на Т-образном алюминиевом профиле и состоит из привода линейного перемещения, рычажной системы и устройства автоматической смены рабочих инструментов и схватов.

Привод линейного перемещения крепится к алюминиевому профилю 1 с помощью кронштейна 2. Он включает в себя шарико-винтовую передачу, соединенную с шаговым двигателем посредством муфты 3. Шарико-винтовая передача в свою очередь состоит из ходового винта 4 и гайки, жестко связанной с подвижной кареткой 5. Ходовой винт

устанавливается в радиально-упорных подшипниках 6. Ограничение перекося подвижной каретки модуля линейного перемещения осуществляется двумя направляющими осями 7, которые воспринимают радиальную нагрузку. Рычажная система крепится на подвижной каретке 5, что обеспечивает возможность перемещения рабочего органа 8 по оси y . Она образована кронштейном 9 и двумя планками 10, 11. В кронштейне установлен серводвигатель с планетарным редуктором 12, выходной вал которого соединен с фланцем 13 посредством призматической шпонки. Фланец крепится к планке четырьмя винтами. Поджим планки к валу редуктора осуществляется винтом. Второй рычаг имеет аналогичную конструкцию. На другом конце этого рычага находится устройство автоматической смены рабочего органа 14.

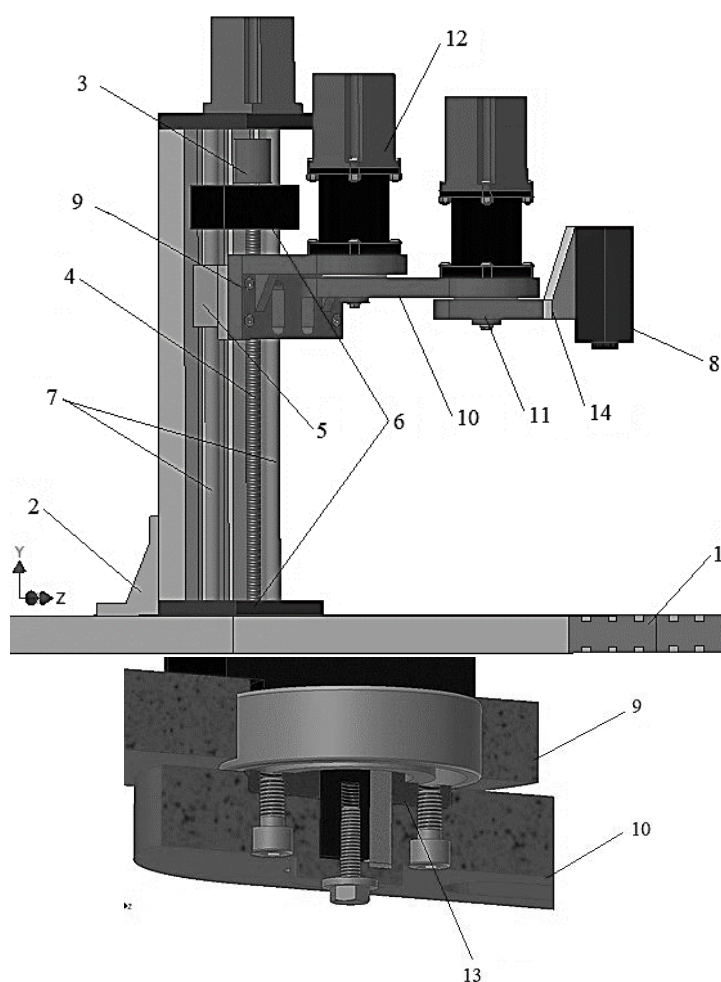


Рис.1 – Внешний вид манипулятора

Поставленная цель заключается в разработке стыковочного устройства манипулятора для повышения надежности фиксации присоединяемых элементов относительно конечного звена манипулятора.

Известно устройство для смены захватных устройств (схватов), конструкция которого приведена в [4]. Устройство содержит присоединительные элементы в виде фланцев, центрирование которых относительно друг друга осуществляется с помощью зеркально в них расположенных пальцев и отверстий под них. Два пальца выполнены коническими и обеспечивают предварительное центрирование, а два – цилиндрическими, для осуществления окончательного центрирования. Фиксация фланцев между собой осуществляется с помощью центрального круглого электромагнита с отверстием в сердечнике под круглый электрический разъем или штуцера для подвода сжатого воздуха.

Основным недостатком такой конструкции является то, что для осуществления надежного сопряжения цилиндрических пальцев с отверстиями необходимо обеспечить выполнение межцентровых расстояний между пальцами и отверстиями с высокой точностью, что усложняет технологический процесс и приводит к росту временных и материальных затрат, либо увеличение гарантированного зазора в соединении «палец-отверстие», что снижает точность позиционирования инструмента или схвата.

Достижение поставленной цели обеспечивается тем, что в разработанном стыковочном устройстве для установки и закрепления расположенных в магазине сменных инструментов и схватов на конечном звене манипулятора промышленного робота, содержащем обращенные одна к другой стыковочные поверхности присоединительных элементов с зеркально расположенными центрирующими элементами в виде пальцев и отверстий под них, фиксирующий присоединительные элементы между собой электромагнит и коммутационные разъемы на стыковочных поверхностях для связи инструментов и схватов с источниками энергии, использованы следующие технические решения:

- конечное звено манипулятора и корпуса инструментов и схватов снабжены присоединительными платформами из немагнитного материала;
- на стыковочной поверхности конечного звена манипулятора выполнены два отверстия, в которых соосно установлены электромагниты с втяжным якорем;
- корпуса электромагнитов выполнены в виде чашек с крышками из ферромагнитного материала, причем последние выполнены заодно с сердечниками катушек, установленных внутри корпусов;
- сердечники катушек имеют на плоских торцах воротнички, шунтирующие магнитный поток;
- обращенные в сторону пальцев доньшки чашек имеют центральные отверстия с направляющими фасками, являющиеся центрирующими элементами для закрепленных на другой платформе пальцев из

ферромагнитного материала, снабженных фланцами с наружным диаметром, равным диаметру корпуса электромагнита;

- пальцы с фланцами являются втяжными якорями электромагнитов;
- один из пальцев выполнен цилиндрическим, а другой, выполненный с поперечным сечением в форме ромба, имеет продольные ленточки, являющиеся частями первоначальной наружной цилиндрической образующей пальца, расположенные в плоскости, проходящей через большую диагональ упомянутого ромба, перпендикулярную линии, проходящей через центры этих двух пальцев.

На **Рис.3** приведена схема относительного расположения присоединительных платформ инструментов (схватов) и конечного звена манипулятора. На **Рис.2** приведён вид по стрелке Б на **Рис.3**, схема для определения размера ленточки ромбического пальца. На **Рис.2** приведена схема для определения погрешности установки сменных инструментов (схватов) на присоединительной платформе конечного звена манипулятора.

Стыковочное устройство содержит присоединительные платформы 1 и 2 из немагнитного материала, например, алюминиевого сплава (**Рис.3**), являющимися составными частями соответственно конечного звена 3 манипулятора робота и корпусов 4 сменных инструментов (схватов).

На стыковочной поверхности платформы конечного звена манипулятора выполнены с межцентровым расстоянием $L1$ два отверстия 5 диаметром D , а на обращенной к ней стыковочной поверхности другой платформы установлены с межцентровым расстоянием $L2 = L1$ центрирующие пальцы 6 и 7 диаметром D_p с фланцами 8 диаметром $D_f = D$, первый из которых выполнен цилиндрическим, а второй – ромбическим, т.е. имеющим поперечное сечение в форме ромба, одновременно являющиеся втяжными якорями электромагнитов 9, закрепленных в отверстиях платформы конечного звена манипулятора (**Рис.2**), причем большая диагональ ромба расположена в плоскости, перпендикулярной линии, проведенной через центры этих пальцев (**Рис.4**).

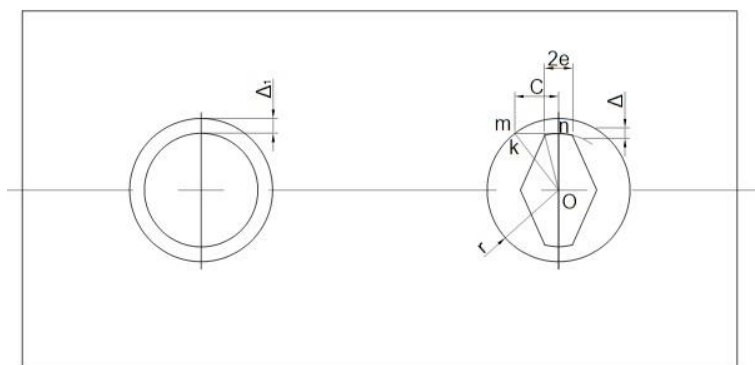


Рис.2 – Схема для определения размера ленточки ромбического пальца

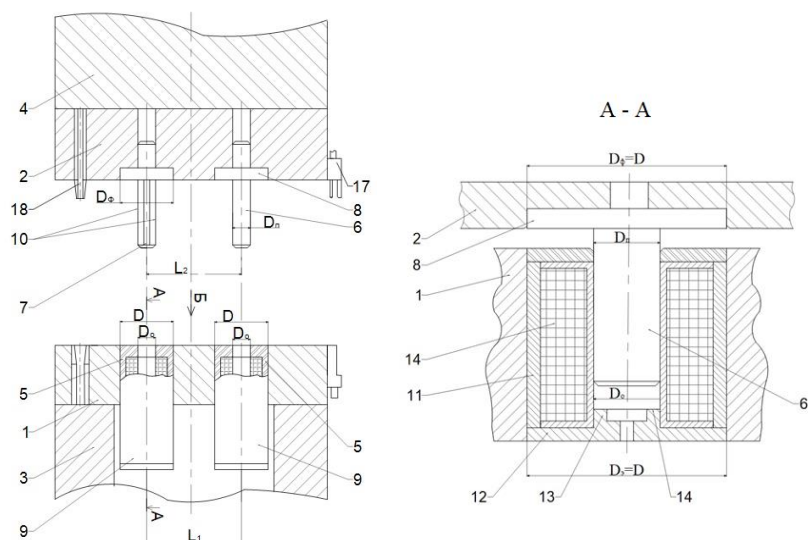


Рис.3 – Схема относительного расположения присоединительных платформ инструментов (схватов) и конечного звена манипулятора

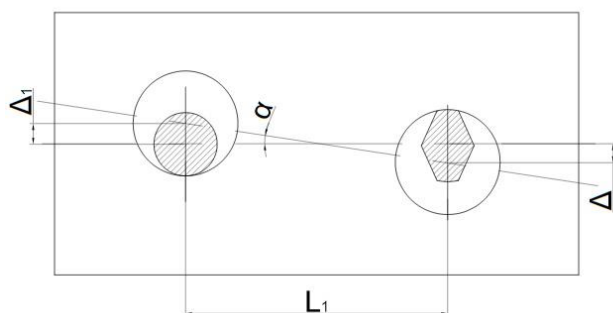


Рис.4 – Схема для определения погрешности установки сменных инструментов (схватов) на присоединительной платформе конечного звена манипулятора

В этой же плоскости расположены две продольные, т.е. по длине пальца, ленты 10 шириной $2e$, являющиеся частями первоначальной наружной цилиндрической образующей ромбического пальца диаметром D_n .

Каждый из электромагнитов с втяжным якорем содержит образующие ферромагнитный статор корпус 11 в виде чашки диаметром $D_s = D$ и крышку 12, выполненную заодно с сердечником 13, плоский торец которого снабжен кольцевым шунтирующим воротничком 14. Сердечник размещен внутри катушки 15, установленной в корпусе электромагнита.

В обращенных в сторону центрирующих пальцев донных частях корпусов электромагнитов выполнены центрирующие отверстия 16 с направляющими фасками, межцентровое расстояние между которыми равно межцентровому расстоянию L_1 между отверстиями в платформе для установки и закрепления электромагнитов.

Для подвода электрической энергии к инструментам и схватам в присоединительных платформах установлены ответные части электрического разъема 17 и пневматического разъема 18.

Процесс стыковки протекает следующим образом. При перемещении с помощью манипулятора присоединительной платформы 1 в сторону расположенной напротив присоединительной платформы 2 до полного контакта между собой их стыковочных поверхностей происходит ввод центрирующих пальцев 6 и 7 в соответствующие центрирующие отверстия 16 в донных частях корпусов 11 и в отверстия катушек 15 электромагнитов 9, а также соединение контактов электрического разъема 17 и ответных частей пневматического разъема 18. При этом концы пальцев (якорей) располагаются с минимальным гарантированным зазором относительно кольцевого шунтирующего воротничка 14 на конце сердечника 13. Затем на обмотки катушек подается электрическое напряжение, вызывающее образование магнитного потока Φ , создающего тяговое усилие F , которое осуществляет окончательную фиксацию между собой присоединительных платформ.

Наличие на центрирующих пальцах (якорях) фланцев 8 и кольцевого шунтирующего воротничка 14 на сердечнике способствует увеличению тягового усилия F в конце ввода пальцев внутрь катушек, а следовательно, увеличению надежности стыковки платформ [5,6].

При постоянной величине межцентрового расстояния L_1 между центрирующими отверстиями 16 и постоянными по величине диаметрами D_0 высокая точность выполнения которых достигается с помощью сравнительно простых и малозатратных технологических процессов обработки (развертывание и наружное шлифование), высокая надежность осуществления сопряжения пальцев с отверстиями под них в основном зависит от точности выполнения межцентровых расстояний между и схватов, для обеспечения которой требуется более дорогостоящее технологическое оборудование и обрабатывающий инструмент, что приводит к увеличению материальных затрат.

Выполнение одного из центрирующих пальцев ромбическим значительно снижает материальные затраты, так как в этом случае точность выполнения межцентрового расстояния между пальцами может быть значительно уменьшена без снижения надежности сопряжения пальцев с отверстиями.

Ширина ленточек поперечного сечения ромбического пальца (**Рис.3**) определяется следующим образом [7].

Из треугольников okn и omn

$$R_0^2 - (c + e)^2 = (R_0 - \Delta)^2 - e^2,$$

откуда

$$e = (2R_0 \Delta - \Delta^2 - c^2) / 2c.$$

Заменяя $2R_0 = D_0$ и принимая $\Delta^2 = 0$, так как эта величина второго порядка малости, получаем

$$2e = (D_0 \Delta') / 2c - c,$$

где $\Delta' = 2\Delta$ – диаметральный зазор.

В свою очередь,

$$2c = \delta + \delta' - 2\Delta_1,$$

где δ – допуск на межцентровое расстояние L1 между центрирующими отверстиями; δ' – допуск на межцентровое расстояние L2 между центрирующими пальцами; $2\Delta_1$ – диаметральный зазор в соединении цилиндрического пальца с отверстием.

Последнее выражение имеет смысл при условии

$$\delta + \delta' > 2\Delta_1,$$

использование которого позволяет определить условие для обоснования величины допуска на межцентровое расстояние L2, которое обеспечит требуемую точность позиционирования (базирования) инструмента (схвата):

$$\delta' \geq 2\Delta_1 - \delta.$$

Смещение платформы сменного инструмента (схвата) от ее среднего положения в направлениях, перпендикулярных к оси цилиндрического пальца (Рис.3), определяются минимальным радиальным зазором Δ_1 , допуском на диаметр сопрягаемого отверстия δ_1 и допуском на диаметр пальца δ_1' .

Наименьшее смещение равно Δ_1 , а наибольшее равно

$$\Delta_1 + \delta_1'/2 + \delta_1/2.$$

По величине смещения определяется погрешность установки инструмента (схвата) для тех или иных выполняемых размеров (диаметров) пальцев и отверстий под них.

Наибольший возможный угол перекоса α платформы инструмента (при его малых значениях)

$$\sin \alpha \approx \alpha = (\Delta_1 + \delta_1/2 + \delta_1'/2 + \Delta + \delta_2/2 + \delta_2'/2) / L1,$$

где L1 – межцентровое расстояние между центрирующими отверстиями; Δ – минимальный радиальный зазор в соединении ромбического пальца с отверстием; δ_2 – допуск на диаметр отверстия под ромбический палец; δ_2' – допуск на диаметр (по ленточкам) ромбического пальца.

Использование в конечном звене манипулятора и корпусах сменных инструментов и схватов стыковочного устройства в виде присоединительных платформ, содержащих два электромагнита с втяжным якорем и два центрирующих пальца различной геометрии, являющихся их втяжными якорями, приводит к повышению надежности фиксации и

точности относительного расположения присоединительных элементов, а также гибкости построения схем работы манипулятора.

Библиографический список

1. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. Книга 1 / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес; отв. ред. С.М. Каплунов. – М.: Наука, 2006. – 383 с.
2. Иванов А.А. Основы робототехники: учеб. пособие / А.А. Иванов. – НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2011 – 200 с.
3. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. Учебное пособие. 2-е издание, стереотипное / Ю.В. Подураев. – Москва: Машиностроение, 2007. – 256 с.
4. Робототехнические системы в сборочном производстве: учеб. пособие / Е.В. Пашков, Б.В. Погорелов, А.Г. Карлов [и др.]; под ред. Е.В. Пашкова. – Киев: Вища шк., 1987 – 272 с.
5. Пашков Е.В. Электропневмоавтоматика в производственных процессах: учеб. пособие для вузов / Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский, А.А. Четверкин. – Севастополь: Изд-во Севастоп. гос. техн. ун-та, 1997. – 368 с.
6. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства РЭА: Справочник / Л.А. Казаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с.
7. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений в машиностроении / В.С. Корсаков. - 2-е изд., доп. и перераб. - Москва: Машиностроение, 1965. - 360 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Korendyasev A.I. Teoreticheskie osnovy robototekhniki. V 2 kn. Kniga 1 / A.I. Korendyasev, B.L. Salamandra, L.I. Tyves; otv. red. S.M. Kaplunov. – M.: Nauka, 2006. – 383 s.
2. Ivanov A.A. Osnovy robototekhniki: ucheb. posobie / A.A. Ivanov. – NGTU im. R.E. Alekseeva. Nizhnij Novgorod, 2011 – 200 s.
3. Poduraev YU.V. Mekhatronika: osnovy, metody, primenenie. Uchebnoe posobie. 2-e izdanie, stereotipnoe / YU.V. Poduraev. – Moskva: Mashinostroenie, 2007. – 256 s.
4. Robototekhnicheskie sistemy v sborochnom proizvodstve: ucheb. posobie / E.V. Pashkov, B.V. Pogorelov, A.G. Karlov [i dr.]; pod red. E.V. Pashkova. – Kiev: Vishcha shk., 1987 – 272 s.
5. Pashkov E.V. Elektropnevmoavtomatika v proizvodstvennyh processah: ucheb. posobie dlya vuzov / E.V. Pashkov, YU.A. Osinskij, A.A. CHetverkin. – Sevastopol': Izd-vo Sevastop. gos. tekhn. un-ta, 1997. – 368 s.

-
6. Kazakov L.A. Elektromagnitnye ustrojstva REA: Spravochnik / L.A. Kazakov. – M.: Radio i svyaz', 1991. – 352 s.
 7. Korsakov V.S. Osnovy konstruirovaniya prispособlenij v mashinostroenii / V.S. Korsakov. - 2-e izd., dop. i pererab. - Moskva: Mashinostroenie, 1965. - 360 s.

¹*Чаленков Никита Игоревич, ассистент, chalenkov-nikita@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Филипович Олег Викторович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой, ophisl@yandex.ru, Россия, Севастопольский государственный университет*

³*Пашков Евгений Валентинович, д.т.н., профессор, pashkov@sevsu.ru, Россия, Севастопольский государственный университет*

Docking device of the end link of the manipulator

N.I. Chalenkov, O.V. Filipovich, E.V. Pashkov

The results of the analysis of the design and functionality of the docking device for the installation and fastening of replaceable tools and grippers located in the store on the end link of an industrial robot manipulator are presented. The description of the design and the principle of operation of the docking device of the end link of the manipulator due to the use of cylindrical and rhombic fingers is given.

Keywords: manipulator, docking device, working body, rhombic finger, electromagnet.

Chalenkov Nikita Igorevich, assistant, chalenkov-nikita@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Filipovich Oleg Viktorovich, candidate of technical science, docent, head of the department, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

Pashkov Evgeniy Valentinovich, doctor of technical sciences, professor, pashkov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМ РОБОТОМ С ДВУМЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ

Кабанов А.А.¹, Крамарь В.А.², Крамарь О.А.³, Панасенко В.В.⁴

Аннотация. *Активное внедрение антропоморфных манипуляторов требует разработки новых и адаптации существующих подходов к построению их управления. Одним из важнейших подходов является решение прямой задачи кинематики требующей построения кинематической схемы манипулятора и его описание с помощью подхода Денавита-Хартенберга. В статье приводится систематическое представление указанных вопросов.*

Ключевые слова. *Антропоморфный манипулятор, прямая задача кинематики.*

Введение. Разработка сложных роботов является трудоемким процессом, состоящим из множества этапов. Одним из важных этапов, наряду с разработкой конструкции робота и его системы управления является процесс испытания (тестирования). Существуют различные виды тестирования: тестирование производительности, тестирование надежности и ряд других. При тестировании системы управления робота основным является процесс тестирования надежности [1], целью которого является получение информации об ошибках, в частности, об ошибках в результате работы системы управления [2]. Одним из видов тестирования надежности являются приемочные испытания [2]; формой организации приемочных испытаний может являться проверка достижения целей проектирования. При тестировании систем управления для манипуляторов ключевую роль играют параметры точности и повторяемости [1]. При испытании систем управления для манипуляторов точность определяет разницу между целевой и фактической координатами прихода энд-эффектора. Повторяемость определяет близость совпадения повторных перемещений положения манипулятора в одно и то же место при одинаковых внешних условиях. Также эти параметры могут быть применимы к тестированию прохождения манипулятора по заданной траектории.

Как уже отмечалось, условия проведения испытаний для одного и того же манипулятора и одного и того же сценария должны быть схожими. Т.е. внешние условия, в которых находится испытываемый манипулятор, должны быть стабильными, а сам манипулятор находится в устойчивом положении [1].

На сегодняшний день известны ряд методов проведения испытаний для оценки производительности. Это IPA-Stuttgart method, the Ford method, the test-robot program method, the National Bureau of Standards method, и The Chesapeake laser systems method [3].

Кратко охарактеризуем указанные методы. IPA-Stuttgart method [1,4] описывает процедуру измерения статических ошибок позиционирования и параметров динамического пути. При этом, метод требует точной координации между роботом и измерительным оборудованием [4]. The Ford method состоит в том, что рассматриваемый робот подвергается циклическому испытанию, состоящему в перемещении всех осей от одного конца движения к другому при полной номинальной полезной нагрузке и на скорости в течение 40 часов непрерывно. Цель этого метода установить надежность работы системы. Идея The test-robot program method состоит в измерении ошибки позиционирования и ориентации, полученные во время позиционирования. The test-robot program method имеет ряд функций заключающихся в: способности выполнять анализ ошибок положения и ориентации манипулятора робота, способности использоваться в качестве инструмента моделирования для оценки альтернативных решений; способности оценивать ошибки перпендикулярности испытываемого робота; возможности обработки ошибок ввода/вывода на диске и редактирования строки ввода во время выполнения; способности сохранять результаты в указанном пользователем текстовом файле на диске [5]. The National Bureau of Standards method и Chesapeake laser systems method основан на использовании лазерной измерительной техники [1].

Целью настоящей статьи является описание выполняемого тестирования разработанных алгоритмов и программ для системы управления РТК с использованием технического 3D зрения.

Объект тестирования и применяемые методы. В качестве тестируемого робототехнического комплекса (РТК) рассматривается подводный робот, конструкция которого приведен на **Рис.1**.

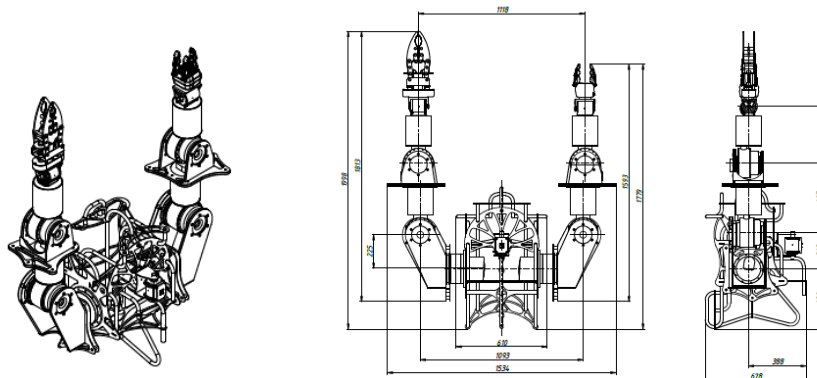


Рис.1 – Конструкция рассматриваемого робота

Согласно техническому заданию, на разработку системы управления антропоморфными манипуляторами остановим свой выбор на идеях The test-robot program method и учтём, что методы проведения испытаний программы управления манипуляторами РТК включают моделирование и непосредственно тестирование как на компьютерной модели, так и на реальном образце.

Моделирование проводится по построенным математическим моделям в среде MatLab. Моделирование позволяет установить, что программа правильно реализует данный этап проверки. Тестирование же на компьютерной модели выполняется с использованием симулятора, соответствующего РТК. Окончательное тестирование выполняется на самом РТК. Для каждого из этапов проверки набор тестовых данных для моделирования совпадает с набором тестовых данных, используемых для тестирования на РТК.

Компьютерная модель РТК. Основа выполнения тестирования программы управления РТК является составление его компьютерной модели. Выбрана модель описания РТК на основе применения подхода Денавита – Хартенберга. Подробное описание построения модели приведено в [6]. Укажем в таблице 1 окончательно построенную матрицу Денавита – Хартенберга для манипуляторов рассматриваемого РТК с учетом его размеров (**Рис.1**).

Таблица 1. – Таблица параметров Денавита – Хартенберга РТК

Сочленения правого манипулятора	A_i	α_i	d_i	θ_i	Сочленения левого манипулятора	A_i	α_i	d_i	θ_i
1	-0.2	$\pi/2$	-0.2	θ_i	1	-0.2	$\pi/2$	0.2	θ_i
2	0	$\pi/2$	0	θ_i	2	0	$\pi/2$	0	θ_i
3	0	$\pi/2$	0.47	θ_i	3	0	$\pi/2$	0.47	θ_i
4	0	$\pi/2$	0	θ_i	4	0	$\pi/2$	0	θ_i
5	0	$\pi/2$	0.2	θ_i	5	0	$\pi/2$	0.2	θ_i
6	0.2	0	0	θ_i	6	0.5	0	0	θ_i

В таблице 1: 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 – расстояние между смежными звеньями, отсчитываемым вдоль оси сочленения предыдущего звена; θ_i – углом между нормальными, измеряемым в плоскости, перпендикулярной оси предыдущего звена.

Также, для построения адекватной компьютерной модели необходимо учитывать конструктивные ограничения, установленные по углам звеньев манипулятора. Указанные ограничения приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Ограничения по углам θ_i манипулятора правый

Звено, i правого манипулятора	Диапазон	Звено, i левого манипулятора	Диапазон
1	$-89^0 \leq \theta \leq 9^0$	1	$-89^0 \leq \theta \leq 9^0$
2	$0^0 \leq \theta \leq 120^0$	2	$-120^0 \leq \theta \leq 0^0$
3	$-90^0 \leq \theta \leq +90^0$	3	$-90^0 \leq \theta \leq +90^0$
4	$-110^0 \leq \theta \leq 30^0$	4	$-110^0 \leq \theta \leq 30^0$
5	$-80^0 \leq \theta \leq 80^0$	5	$-80^0 \leq \theta \leq 80^0$
6	$-90^0 \leq \theta \leq 90^0$	6	$-90^0 \leq \theta \leq 90^0$

Данный подход построения компьютерной модели представляется адекватным, исходя из того, что управление РТК состоит в расчете и указании системе управления РТК величин углов поворота и скорости поворота двигателей звеньев РТК.

Компьютерная модель РТК в Matlab. Исходя из того, что первым шагом выбрано моделирование, приведем компьютерную модель РТК для Matlab. Для создания такой модели в Matlab воспользуемся данными из таблицы 1 и синтаксисом, используемым в Toolbox RTB 10 [7]. Описание компьютерной модели для Matlab, с учетом значений из таблицы 1 и таблицы 2 для левого манипулятора будет иметь вид (**Рис.2**):

```

initialPose_left = deg2rad([0 0 0 0 0 0]);
L(1) = Revolute('d', 0.2, 'alpha', pi/2, 'a', -0.2, 'offset',
deg2rad(0), 'qlim', initialPose_left(1)+deg2rad([-89 9]));
L(2) = Revolute('d', 0, 'alpha', pi/2, 'a', 0, 'offset',
deg2rad(-90), 'qlim', initialPose_left(2)+deg2rad([-120 0]));
L(3) = Revolute('d', 0.47, 'alpha', pi/2, 'a', 0, 'offset',
deg2rad(-90), 'qlim', initialPose_left(3)+deg2rad([-90 90]));
L(4) = Revolute('d', 0, 'alpha', pi/2, 'a', 0, 'offset',
deg2rad(180), 'qlim', initialPose_left(4)+deg2rad([-110 30]));
L(5) = Revolute('d', 0.2, 'alpha', pi/2, 'a', 0, 'offset',
0, 'qlim', initialPose_left(5)+deg2rad([-80 80]));
L(6) = Revolute('d', 0, 'alpha', 0, 'a', 0.5, 'offset',
deg2rad(90), 'qlim', initialPose_left(6)+deg2rad([-90 90]));
baseL = [0 0 -1 -0.2; 0 1 0 0; 1 0 0 0; 0 0 0 1];

```

Рис.2 – Скрипт матлаб описания левого манипулятора

Аналогичный скрипт, с учетом данных таблиц 1 и 2 имеет место и для правого манипулятора. Графическое отображение компьютерной модели в MatLab приведено на **Рис.3**.

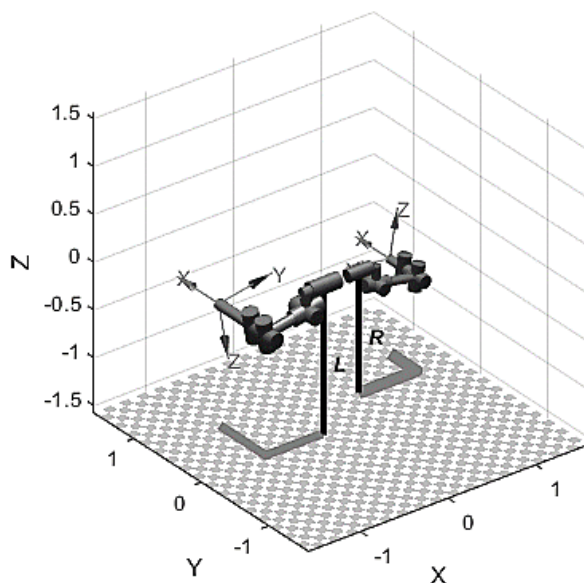


Рис.3 – Графическое отображение компьютерной модели в Matlab

Компьютерная модель симулятора РТК. В качестве симулятора РТК выступает «3D Симулятор. Робототехнический комплекс для выполнения подводно-технических работ» - 1.0. Программное обеспечение предназначено для работы с экспериментальным образцом ЭО РТК в режиме дистанционного управления оператором посредством задающего устройства устройства копирующего типа и комплексной системы 3D зрения. Компьютерная модель симулятора полностью соответствует РТК. Внешний вид симулятора приведен на **Рис.4**.



Рис.4 – Внешний вид симулятора ЭО РТК

Компьютерная модель для системы управления РТК. Программа представляет собой оконное Windows приложение, написанное на языке программирования C#. С архитектурной точки зрения программа состоит из двух модулей – пользовательский интерфейс и ядро. Пользовательский интерфейс отвечает за взаимодействие с пользователем и визуализацию данных, полученных от ядра. Ядро программы является динамической библиотекой, написанной на языке C# и состоит в свою очередь из подсистем коммуникации и обработки данных. Все взаимодействие подсистем производится через модуль ядра с использованием событий и функций обратного вызова, таким образом получаем актуальные и синхронизированные во времени данные из разных источников.

Моделирование разработанных алгоритмов и методов. Согласно разработанной программы–методики испытаний задается объем испытаний и задания. Указанные задания выполняются на моделях в matlab. Так, например, устанавливая целевые координаты для манипуляторов и углы поворота энд-эффектора при испытании согласованного движения манипуляторов РТК с приведением манипуляторов в заданные координаты по данным системы технического 3D зрения исходного положения и выбранным заданием, предположим, что система технического зрения выдала данные, по которым рассчитано положение для манипуляторов РТК. Запуская скрипт в Matlab, мы получаем график положения манипуляторов, подтверждающий правильность разработанной компьютерной модели (**Рис.5**). Заданный скрипт запускается заданное в программе-методике испытаний раз.

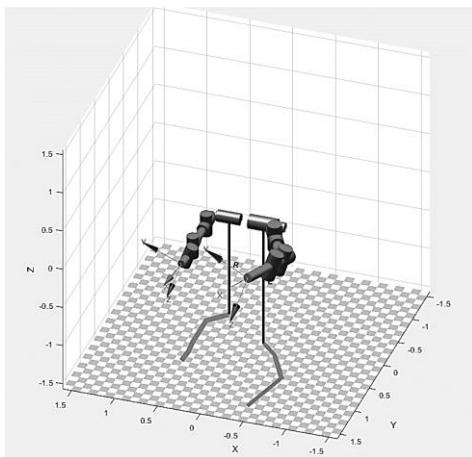


Рис.5 – Выполнения моделирования в Matlab

Условия, порядок проведения, виды, этапы и результаты тестирования разработанных алгоритмов и методов для системы управления РТК.

После подтверждения правильности работы построенных компьютерных моделей на основании программы – методики испытаний выполняется тестирование, которое проводится на основании

разработанных в программе–методике испытаний условий, порядка проведения, видов и этапов испытаний. В таблице 3 приведены разработанные параметры для тестирования с помощью симулятора.

Таблица 3. – Условия, порядок проведения, виды и этапы испытаний с использованием симулятора

№	Действия	Поведение модели
1	Запустить симулятор РТК.	Процедуру запуска системы управления смотреть в соответствующем «Руководстве пользователя». Симулятор запустился. РТК отображается исправно.
2	Запустить ПО управления манипуляторами РТК	ПО активирует кинематическую модель манипуляторов РТК. ПО считывает координаты, полученные от системы 3D зрения для перемещения манипуляторов в указанные координаты из заданного файла. ПО решает обратную задачу кинематики, вырабатывая значения поворота двигателей звеньев манипулятора РТК. Выполнена проверка на возможность прихода в указанные координаты с минимальной ошибкой с учетом необходимого разворота манипулятора. В случае успешности предыдущего пункта углы поворота двигателей и время поворота двигателей по протоколу TCP передаются на симулятор РТК. В симуляторе манипуляторы РТК приходят в указанные координаты.
3	Выполняется проверка на точность позиционирования рабочего органа манипулятора РТК с заданными координатами	По текущим состояниям двигателей решается прямая задача кинематики. Полученное значение координаты и угол направления энд-эффектора проверяются с заданными координатами на точность выполнения задачи.

Аналогичные условия, порядок проведения, виды и этапы испытаний разрабатываются и для испытания реального образца РТК (таблица 4).

Таблица 4. – Условия, порядок проведения, виды и этапы испытаний с использованием симулятора

№	Действия	Поведение модели
1	Запустить РТК	Процедуру запуска смотреть в соответствующем «Руководстве пользователя». Выполняется проверка нахождения манипуляторов РТК в начальном положении. Манипуляторы РТК приводятся в рабочее положение.
2	Запустить систему управления РТК.	Процедуру запуска системы управления смотреть в соответствующем «Руководстве пользователя». ПК системы управления включены и работают исправно.
3	Запустить ПО управления манипуляторами РТК	ПО активирует кинематическую модель манипуляторов РТК. ПО считывает координаты, полученные от системы 3D зрения для перемещения манипуляторов в указанные координаты из заданного файла. ПО решает обратную задачу кинематики, вырабатывая значения поворота двигателей звеньев манипулятора РТК. В случае успешности предыдущего пункта углы поворота двигателей и время поворота двигателей по протоколу TCP передаются на систему управления РТК. Сигналы управления, соответствующие углам поворота, передаются на двигатели звеньев манипулятора. Манипуляторы РТК приходят в указанные координаты. Считываются углы поворота двигателей и выполняется их сравнение с рассчитанными. В случае необходимости производится автоматическая доводка углов поворота до заданных.
4	Выполняется проверка на точность позиционирования рабочего органа манипулятора РТК с заданными координатами.	По текущим состояниям двигателей решается прямая задача кинематики. Полученное значение координаты и угол направления энд-эффектора проверяются с заданными координатами на точность выполнения задачи.

Как и ранее, согласно разработанной программы–методики испытаний, задается объем испытаний и задания. Указанные задания выполняются на симуляторе и реальном образце. Устанавливая целевые координаты для манипуляторов и углы поворота энд-эффектора, при испытании согласованного движения манипуляторов РТК с приведением манипуляторов в заданные координаты по данным системы технического 3D зрения исходного положения и выбранным заданием, зададим те же параметры положения манипулятора, что и ранее.

Запуская разработанную программу системы управления, увидим движения манипуляторов как на симуляторе, так и на реальном роботе. Соединений программы для системы управления с симулятором и реальным РТК и передача данных обеспечивается протоколом TCP.

Если манипуляторы пришли в заданное положение, то тестирование прошло успешно. Разработанная программа управления запускается заданное в программе-методике испытаний раз. Результат работы симулятора для приведенного задания изображен на **Рис.6**.



Рис.6 – Выполнение тестирования в симуляторе

Если при каждом выполнении программы управления мы достигаем цели управления, то испытания считаются успешными.

Вывод. Предложена методика тестирования разработанной программы системы управления многозвенными манипуляторами. Этот метод основан на проверке точности и повторяемости. Моделирование проводится в Matlab. Тестирование осуществляется с использованием симулятора робота и непосредственно самого робота. Предлагаемый подход можно распространить на задачу прогнозирования самостолкновения

манипуляторов [8] и прогнозирования их столкновения с внешними предметами. Также предложенная методика может быть применена к тестированию системы управления роботом-манипулятором на основе “Programming by Demonstration” [8].

Библиографический список

1. Dhillon B.S. Robot Testing and Information Related to Robots In: Robot Reliability and Safety / B.S. Dhillon. – Springer, New York NY 1991. – 347p.
2. Wodzinski M. Putting Robots to the Test / M. Wodzinski // Robotics Today, June, 1987. – pp. 17–20.
3. Ranky P.G. Survey of Robot Test Methods with Examples / P.G. Ranky, M.A. Wodzinski // Report No. RSD-TR-1-87, Center for Research on Integrated Manufacturing, Robot Systems Division, College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, February 1987.
4. Warnecke H.J. Test Stand for Industrial Robots / H.J. Warnecke // Proceedings of the 7th International Symposium on Industrial Robotics, October, 1977. – pp. 10–15.
5. Ranky P.G. Robot Modelling: Control and Applications with Software / P.G. Ranky, C.Y. Ho. – Springer-Verlag, Berlin, 1985. – 256p.
6. Kramar V.A. Mathematical Model of an Anthropomorphic Robots Arm / V.A. Kramar, V.V. Alchakov // Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, 2019. – pp. 95–101.
7. Corke P.I. Robotics, vision and control fundamental algorithms in Matlab / P.I. Corke. – Springer International Publishing AG, 2017. – 427p.
8. Kabanov A.A. Collision detection and avoidance method for two cooperative robot manipulators / A.A. Kabanov, D.A. Tokarev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol.709, article ID 044021, 2020.

Bibliograficheskiy spisok

1. Dhillon B.S. Robot Testing and Information Related to Robots In: Robot Reliability and Safety / B.S. Dhillon. – Springer, New York NY 1991. – 347p.
2. Wodzinski M. Putting Robots to the Test / M. Wodzinski // Robotics Today, June, 1987. – pp. 17–20.
3. Ranky P.G. Survey of Robot Test Methods with Examples / P.G. Ranky, M.A. Wodzinski // Report No. RSD-TR-1-87, Center for Research on Integrated Manufacturing, Robot Systems Division, College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, February 1987.
4. Warnecke H.J. Test Stand for Industrial Robots / H.J. Warnecke // Proceedings of the 7th International Symposium on Industrial Robotics, October, 1977. – pp. 10–15.
5. Ranky P.G. Robot Modelling: Control and Applications with Software / P.G.

-
- Ranky, C.Y. Ho. – Springer-Verlag, Berlin, 1985. – 256p.
6. Kramar V.A. Mathematical Model of an Anthropomorphic Robots Arm / V.A. Kramar, V.V. Alchakov // Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, 2019. – pp. 95-101.
7. Corke P.I. Robotics, vision and control fundamental algorithms in Matlab / P.I. Corke. – Springer International Publishing AG, 2017. – 427p.
8. Kabanov A.A. Collision detection and avoidance method for two cooperative robot manipulators / A.A. Kabanov, D.A. Tokarev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol.709, article ID 044021, 2020.

¹*Кабанов Алексей Александрович, к.т.н., kabanovaleksey@gmail.com
Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

²*Крамарь Вадим Александрович, д.т.н., профессор, kramarv@mail.ru,
Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

³*Крамарь Олег Александрович, rolets@yandex.ru, Россия,
Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

⁴*Панасенко Владимир Валерьевич, panasenkovolodia@yandex.ru,
Россия, Севастополь, ЧВБМУ им. П.С. Нахимова*

MODELING AND TESTING OF CONTROL SYSTEM FOR AN UNDERWATER DUAL-ARM ROBOT

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

The article exams the approach to testing the software of the control system for an underwater dual-arm robot. The proposed approaches are related both to the modeling of robot computer models in Matlab, to testing the control system software by a dual-arm robot simulator and to testing software by the real robot. The proposed testing approach made it possible to verify the correctness of the developed control system software by evaluating parameters such as accuracy and repeatability. An example of a test procedure using the robot simulator is given.

Keywords: anthropomorphic manipulator, direct problem of kinematics.

Kabanov Aleksey Aleksandrovich, candidate of technical science, kabanovaleksey@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

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,*

*Panasenko Vladimir Valerievich, panasenckovolodia@yandex.ru, Russia,
Black Sea Navy School*

ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ ДВУХЭТАПНЫМ МЕТОДОМ КОНЕЧНОГО СОСТОЯНИЯ

Шушляпин Е.А.¹, Безуглая А.Е.²

Аннотация. Рассмотрена задача терминального управления нелинейными системами с помощью двухэтапного метода конечного состояния. Приведены теория и ее реализация для задачи плавного пуска электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Произведено моделирование процесса управления, получены результаты, свидетельствующие о достижении цели управления

Ключевые слова. Нелинейная система. Метод конечного состояния. Терминальное управление. Электродвигатель постоянного тока. Плавный пуск.

Постановка задачи. Задача синтеза управлений для нелинейных систем остается актуальной и в настоящее время. В ряду соответствующих известных подходов и методов нами предложен так называемый метод конечного состояния (МКС) [1] для систем с различными математическими описаниями. Общей характеристикой МКС являются значительные вычислительные затраты для расчета управлений. Так, для систем с моделями, содержащими дифференциальные уравнения, при каждом расчете управлений приходится численно интегрировать системы дифференциальных уравнений специального вида. Поэтому нами предпринимались попытки усовершенствовать МКС путем замены численного интегрирования использованием приближенных аналитических решений [2,3].

В предлагаемой работе описан двухэтапный МКС, позволяющий также избавиться от указанного выше численного интегрирования и, соответственно, существенно ускорить расчеты терминального управления.

Общий вид модели для применения МКС:

$$\begin{aligned} J &= J(z(t_f)) \rightarrow J^*, \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \Phi(t, z(t)) + B(t, z(t)) \cdot u(t), \\ t &\in [t_0, t_f], z(t_0) = z^0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $[t_0, t_f]$ – интервал времени функционирования системы; z^0 – начальные условия; J – непрерывная дифференцируемая скалярная функция $(n \times 1)$ –вектора конечного состояния $z(t_f)$; J^* – желаемое значение; Φ – в общем случае нелинейная непрерывная и дифференцируемая $(n \times 1)$ –вектор-функция правых частей; B – $(n \times r)$ –матрица при управляющем воздействии; u – $(r \times 1)$ –вектор управляющих воздействий (краткие записи типа « $(r \times 1)$ –вектор» здесь означают «вектор размера $(r \times 1)$ »).

Метод конечного состояния. Метод конечного состояния (МКС) для модели (1) определяется следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} u(t, z(t)) &= G^+ \cdot f_J, \\ G^+ &= G^T (G G^T)^{-1}, \\ G &= \frac{\partial J(z)}{\partial z} \Big|_{z=\hat{z}(t_f, t, z(t))} \cdot W(t_f, t, z(t)) B(t, z(t)), \\ \frac{d\hat{z}(\vartheta, t, z(t))}{d\vartheta} &= \Phi(\vartheta, \hat{z}(\vartheta, t, z(t))), \\ \frac{dW(\vartheta, t, z(t))}{d\vartheta} &= \left(\frac{\partial \Phi(\vartheta, z)}{\partial z} \Big|_{z=\hat{z}(\vartheta, t, z(t))} \right) \cdot W(\vartheta, t, z(t)), \\ \vartheta &\in [t, t_f], \hat{z}(t, t, z(t)) = z(t), W(t, t, z(t)) = I. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Указанная выше особенность МКС заключается в необходимости интегрировать в каждый текущий момент времени t систему дифференциальных уравнений для переменных конечного состояния (ПКС) $\hat{z}$ и нелинейной переходной матрицы W , зависящих от трех аргументов: времени наблюдения t_f , текущего времени t , текущего состояния $\hat{z}(t)$. При этом в расчете управления первый аргумент – t_f , а в определениях $\hat{z}$ и W время наблюдения ϑ изменяется от t до t_f в процессе интегрирования дифференциальных уравнений. Именно это обстоятельство в случае необходимости численного интегрирования и приводит к существенным затратам компьютерного времени.

Отметим также наличие скалярной функции f_J , задающей форму критериальной функции (КФ) текущего времени $J(\hat{z}(t_f, t, z(t)))$, представляющей собой целевую функцию критерия, где вместо конечного

состояния подставлена ПКС в силу следующего из (2) соотношения $\hat{z}(t_f, t, z(t)) = z(t_f)$. Во многих задачах применения МКС $f_J = (J^* - J(\hat{z}(t_f, t, z(t))))/T_u$, что соответствует экспоненциальной форме КФ, приближающейся к значению J^* при $t_f \rightarrow \infty$ с постоянной времени T_u . На практике должно быть $T_u \ll t_f$, тогда к моменту t_f можно надеяться на достижимость заданного значения J^* , т.е. цели управления. Теоретическая недостижимость цели управления обусловлена несуществованием обратной матрицы $(GG^T)^{-1}$ в отдельных точках или на интервалах временной оси. В этом случае либо увеличивают J^* , либо соглашаются с полученной ошибкой цели управления.

Постановка задачи ускоренного разгона электродвигателя постоянного тока (ДПТ). Для ДПТ независимого возбуждения с математической моделью

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= -\frac{r_A}{L_A}i_A - \frac{k_1}{L_A}i_B\omega + \frac{1}{L_A}u_A, \\ \frac{di_B}{dt} &= -\frac{r_B}{L_B}i_B + \frac{1}{L_B}u_B, \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{1}{J_M}k_M\omega + \frac{k_2}{J_M}i_Ai_B \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

имеем:

$$\Phi = \begin{pmatrix} -\frac{r_A}{L_A}i_A - \frac{k_1}{L_A}i_B\omega \\ -\frac{r_B}{L_B}i_B \\ -\frac{1}{J_M}k_M\omega + \frac{k_2}{J_M}i_Ai_B \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_A} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_B} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$J = (z(t_f) - z^*)^T \cdot F \cdot (z(t_f) - z^*),$$

где матрица $F = \text{diag}(F_a, F_b, F_w)$, $z_1 \equiv i_A$, $z_2 \equiv i_B$, $z_3 \equiv \omega$; а z^* – установившиеся значения номинального режима при номинальных напряжениях U_{AHOM} , U_{BHOM} , определяемых системой уравнений

$$U_{AHOM} = k_1 i_B^* \omega^* + r_A i_A^*, \quad i_B^* = \frac{U_{BHOM}}{r_B}, \quad k_M \omega^* = k_2 i_A^* i_B^*. \quad (5)$$

Двухэтапный МКС. На первом этапе заменим задачу (3) задачей:

$$\begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= ud_1, \\ \frac{di_B}{dt} &= ud_2, \\ \frac{d\omega}{dt} &= ud_3, \end{aligned}$$

и получим управления $ud_i, i=1,2,3$ с критерием (4) посредством МКС (2).

Здесь матрица $\Phi = 0$, матрица B_d коэффициентов при управлении ud – единичная, $\frac{\partial J}{\partial z} = 2F(z - z^*)$, $\hat{z} = z$, $W = I$ (единичная матрица).

Тогда

$$\begin{aligned} G_d &= 2F(z - z^*) = \begin{pmatrix} 2F_a(z_1 - z_1^*) & 2F_b(z_2 - z_2^*) & 2F_\omega(z_3 - z_3^*) \end{pmatrix}, \\ G_d^+ &= \begin{pmatrix} F_1(z_1 - z_1^*) \\ F_2(z_2 - z_2^*) \\ F_3(z_3 - z_3^*) \end{pmatrix} \left(\frac{1}{2F_1^2(z_1 - z_1^*)^2 + 2F_2^2(z_2 - z_2^*)^2 + 2F_3^2(z_3 - z_3^*)^2} \right), \\ f_J &= \frac{J^* - J}{T_u} = \frac{J^* - (z(t_f) - z^*)^T \cdot F \cdot (z(t_f) - z^*)}{T_u}. \end{aligned}$$

При этом МКС-управление согласно (2) получает вид:

$$\begin{aligned} u_d(t, x_d(t)) &= G_d^+ \cdot f_J, \\ G_d^+ &= G_d^T (G_d G_d^T)^{-1}, \\ G_d &= \frac{\partial J(z)}{\partial z} \Big|_{z=\hat{z}(t_f, t, z(t))} \cdot W_d(t_f, t, z(t)) B_d(t, z(t)) = \frac{\partial J(z)}{\partial z} \Big|_{z=\bar{z}(t_f, t, z(t))}, \quad (6) \\ z &\equiv x_d, \quad \hat{z} = z = x_d. \end{aligned}$$

На **втором этапе** приравняем u_d правым частям модели (3):

$$ud_1 = -\frac{r_A}{L_A}i_A - \frac{k_1}{L_A}i_B\omega + \frac{1}{L_A}u_A,$$

$$ud_2 = -\frac{r_B}{L_B}i_B + \frac{1}{L_B}u_B,$$

и, решив систему, получим искомые управления:

$$u_A = L_A \left(ud_1 + \frac{r_A}{L_A}i_A + \frac{k_1}{L_A}i_B\omega \right),$$

$$u_B = L_B \left(ud_2 + \frac{r_B}{L_B}i_B \right).$$

Результаты моделирования и выводы. Решим с помощью алгоритма (6) задачу мягкого пуска ДПТ, когда напряжения и токи изменяются плавно за время t_f достижения номинальных значений токов и скорости (5). Эта задача актуальна для электротранспорта, когда рывки и большие ускорения нежелательны.

Ниже, на **Рис.1,2** приведены графики токов, скорости и управляющих воздействий для случая мягкого пуска при следующих параметрах ДПТ и алгоритма управления: $r_A = 0,7 \text{ Ом}$; $L_A = 0,6 \text{ Гн}$; $r_B = 60 \text{ Ом}$; $L_B = 15 \text{ Гн}$; $k_1 = 0,37 \text{ Ом}\cdot\text{с}$; $k_2 = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{А}^{-2}$; $J_m = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $k_m = 0,7 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$; $U_{АННО} = U_{ВННО} = 110 \text{ В}$; $t_f = 25 \text{ с}$; $T_u = 2 \text{ с}$; $F_a = F_b = F_w = 1$; $J^* = 0$. При моделировании дифференциальные уравнения интегрировались методом Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным шагом $h = 0,004 \text{ с}$.

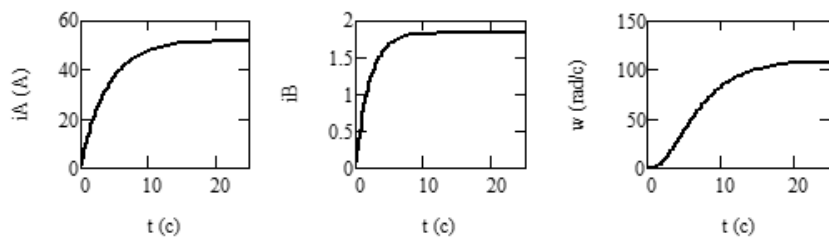


Рис.1 – Токи и скорость для алгоритма (6) при $T_u=2\text{с}$

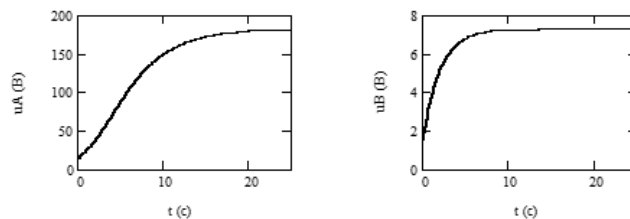


Рис.2 – Якорное (u_A) и возбуждающее (u_B) напряжения для алгоритма (6) при $T_u=2\text{с}$

При этом токи и скорость достигают номинальных значений $i_A^* = 51,956 \text{ A}$, $i_B^* = 1,833 \text{ A}$, $\omega^* = 108,614 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ плавно и с высокой точностью: $i_A(t_f) = 51,856 \text{ A}$; $i_B(t_f) = 1,833 \text{ A}$; $\omega(t_f) = 107,512 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$. Для регулировки времени выхода на номинальный режим можно использовать параметр T_u . Так, при $T_u = 0,2 \text{ с}$ время регулирования по скорости уменьшается от 25с, как на третьем графике рис.1, до 15с.

В перспективе данный метод можно использовать для решения других задач, например, управления приводами манипуляторов роботов.

Библиографический список

1. Шушляпин Е.А. Управление нелинейными системами на основе прогноза конечного состояния неуправляемого движения / Е.А. Шушляпин. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 282 с.
2. Shushlyapin E.A. Control of nonlinear systems based on the forecast end-state unmanaged traffic / E.A. Shushlypin. – Sevastopol: SevNTU, 2012. – 282p.
3. Шушляпин Е.А. Способ приближенного аналитического решения нелинейных дифференциальных уравнений и его применение в задачах управления динамическими системами / Е.А. Шушляпин, А.Е. Безуглая, О.Г. Подольская // Автоматизация процессов и управление: Вестник СевНТУ, Вып.57, 2004. – С.47-55.
4. Безуглая А.Е. Ускоренный алгоритм терминального управления нелинейными системами методом конечного состояния на основе нейросетевой аппроксимации / А.Е. Безуглая, Е.А. Шушляпин // Материалы XIV-й международной конференции по автоматическому управлению (Автоматика-2007), 2007. – С.60-62.

Bibliograficheskij spisok

1. SHushlyapin E.A. Upravlenie nelinejnymi sistemami na osnove prognoza konechnogo sostoyaniya neupravlyaemogo dvizheniya / E.A. SHushlyapin. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 282 s.
2. Shushlyapin E.A. Control of nonlinear systems based on the forecast end-state unmanaged traffic / E.A. Shushlypin. – Sevastopol: SevNTU, 2012. – 282p.
3. SHushlyapin E.A. Sposob priblizhennogo analiticheskogo resheniya nelinejnyh differencial'nyh uravnenij i ego primenenie v zadachah upravleniya dinamicheskimi sistemami / E.A. SHushlyapin, A.E. Bezuglaja, O.G. Podol'skaya // Avtomatizaciya processov i upravlenie: Vestnik SevNTU, Vyp.57, 2004. – S.47-55.

-
4. Bezuglaya A.E. Uskorennyj algoritm terminal'nogo upravleniya nelinejnymi sistemami metodom konechnogo sostoyaniya na osnove nejrosetevoj approksimacii / A.E. Bezuglaya, E.A. Shushlyapin // Materialy XIV-j mezhdunarodnoj konferencii po avtomaticheskemu upravleniyu (Avtomatika-2007), 2007. – S.60-62.

Шушляпин Евгений Андреевич, д.т.н., профессор, 6u6@bk.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

Безуглая Анна Евгеньевна, к.т.н., доцент, anna_bezuglaya@list.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

TERMINAL CONTROL OF NONLINEAR SYSTEMS WITH A TWO-STAGE FINAL STATE METHOD

E.A. Shushlyapin, A.E. Bezuglaya

The paper considers the problem of terminal control of nonlinear systems using a two-stage finite state method. The theory and its implementation for the problem of smooth start of a DC electric motor with an independent ignition are presented. The modeling of the management process is carried out, the results indicating the achievement of the control goal are obtained.

Keywords. A nonlinear system. The terminal state method. Terminal control. A DC electric motor. Smooth start.

Shushlyapin Evgeny., doctor of technical sciences, professor, 6u6@bk.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Bezuglaya Anna E., candidate of technical sciences, docent,, anna_bezuglaya@list.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ РОТОРА ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Бохонский А.И.¹, Майстришин М.М.²

Аннотация. *Выполнено моделирование оптимального вращения ротора из исходного в новое состояние при использовании электродвигателя переменного тока. Показано, что предложенное управление частотной настройкой электродвигателя не исключает существенную экономию энергии для достижения цели движения. Приведены численные примеры.*

Ключевые слова. *Конструируемое оптимальное управление, двигатель переменного тока, энергоемкость вращательного движения.*

Работа [1] посвящена электроприводам, решениям задач управления движением. Управление электроприводами постоянного и переменного тока приведено в работе [2, 4, 11], вариационными методами найдены управления с учетом ограничений на нагрев. С использованием систем аналитических вычислений вариационными методами решены характерные задачи управления электроприводами с учетом постоянного и переменного сопротивления вращению ротора и ограничения на нагрев.

Оптимальное управление электроприводами переменного тока усложняются (по сравнению с двигателями постоянного тока) в связи с нелинейной зависимостью вращающего момента двигателя от параметра скольжения, следовательно, от частоты напряжения статорных обмоток. Представляет интерес применение новых типов оптимального управления вращательным движением (частотой напряжения статорных обмоток асинхронного двигателя) при повороте ротора на заданный угол и время из исходного в конечное состояние покоя.

В ряде публикаций [5–10] приведены результаты исследований оптимальных перемещений объектов как абсолютно твердых и деформируемых систем с использованием реверсивно конструируемых управлений.

В [8] показано, что применение новых типов управлений «разгон–торможение» приводит к экономии энергии для достижения цели движения. В [11] реализация оптимальных кососимметричных управлений осуществлялась с использованием электроприводов постоянного и переменного тока.

Цель исследования – реализация электроприводом переменного тока управления «разгон–торможение» со снижением затрат энергии для достижения конечного состояния покоя.

В статье сравниваются затраты энергии для известного оптимального управления и нового, полученного конструированием.

1. Энергозатраты на оптимальный поворот ротора электродвигателя.

Поворот ротора из исходного в конечное состояние покоя в случае известного классического управления (момент инерции $J = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) описывается следующими известными аналитическими зависимостями (угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение):

$$\varphi(t) = \frac{F_i t^2}{T^3} (3T - 2t), \quad \omega(t) = \frac{6F_i t(T-t)}{T^3}, \quad \varepsilon(t) = \frac{6F_i}{T^3} (T - 2t), \quad (1)$$

где F_i – заданный максимальный угол поворота; T – время движения.

В силу косой симметрии управления энергия для реализации движения вычисляется как

$$A = 2J \int_0^{T/2} \varepsilon \omega dt = \frac{2,25 F_i^2}{T^2}. \quad (2)$$

Если при реверсивном конструировании [10] в случае зависимостей (1) для степени полинома приятно $n=1$, то для степени полинома $n=3$ следует:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{F_i}{T^5} t^2 (5T^3 - 10T^2 t + 10T t^2 - 4t^3), \\ \omega(t) &= \frac{10F_i}{T^5} t (T-t) (2t^2 - 2Tt + T^2), \\ \varepsilon(t) &= \frac{10F_i}{T^5} (T - 2t)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Энергия управления равна:

$$A = 2J \int_0^{T/2} \varepsilon \omega dt = \frac{1,625 F_i^2}{T^2} \quad (4)$$

Здесь затрачиваемая энергия уменьшилась на 30 %. На практике более существенная экономия энергии достигается при использовании полинома со степенью $n=5, 7$.

Графики угла поворота, угловой скоростей и ускорения (при $J = 1 \text{ н} \cdot \text{м}^2$, $T = 1 \text{ с}$, $F_i = \pi / 2$) изображены на **Рис.1а,б,в**.

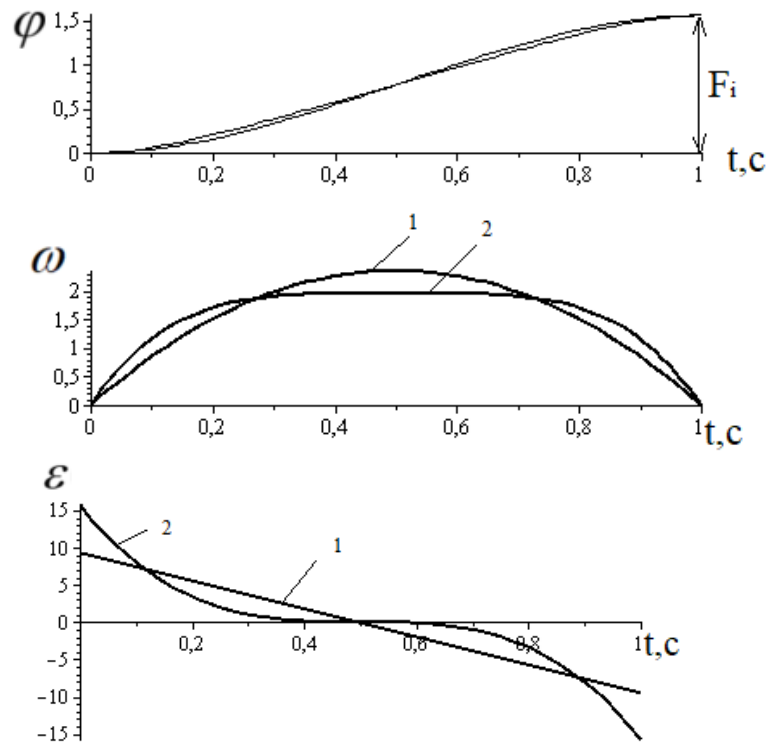


Рис.1 – Графики угла поворота ротора, угловой скорости и ускорения для двух типов управлений: 1 – классический случай, 2 – конструируемое управление

2. Расчетные аналитические зависимости для асинхронного двигателя.

Дифференциальное уравнение асинхронного двигателя с учетом сопротивления имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c - k_1 \omega, \quad (5)$$

где M , M_c – активный момент двигателя и постоянный момент сопротивления, приведенные к валу двигателя; ω – частота вращения ротора двигателя; J – момент инерции всех элементов системы, приведенный к валу двигателя. Активный момент вычисляется так:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}, \quad (6)$$

где M_k и s_k – критические значения момента и скольжения; $s = \frac{(\omega_0 - \omega)}{\omega_0}$ –

скольжение, в котором $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ – синхронная частота; p – число пар

полюсов двигателя; f – частота напряжений статорных обмоток (управляемая величина).

При пренебрежении влиянием электромагнитной инерции из (6) для результирующего движущего момента следует формула

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{S_{\kappa}} S = \frac{2M_{\kappa}}{S_{\kappa}} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right). \quad (7)$$

Зависимость (7) нелинейная, однако ее подстановка в (5) в этом случае приводит к единственному решению для ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{2M_{\kappa}\omega}{S_{\kappa} \left(\frac{2M_{\kappa}}{S_{\kappa}} - J \frac{d\omega}{dt} - M_c - k_1\omega \right)}. \quad (8)$$

В общем случае момент инерции, приведенный к валу двигателя, вычисляется так:

$$J = J_{\partial} + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (9)$$

где J_{∂} – момент инерции вращающихся частей двигателя; J_1, J_2 – моменты инерции шестерен передачи; $i = \frac{D_2}{D_1}$ – передаточное число, где D_1 и D_2 – диаметры шестерен. Другие величины в (7) найдены согласно формулам:

$$J_1 = \frac{m_1 r_1^2}{2}; \quad r_1 = \frac{D_1}{2}; \quad m_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \cdot b \cdot \rho;$$

$$J_2 = \frac{m_2 r_2^2}{2}; \quad r_2 = \frac{D_2}{2}; \quad m_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \cdot b \cdot \rho,$$

где m_1, m_2 – массы шестерен; b – ширина шестерен; ρ – плотность материала шестерен. Линейная скорость каретки $v = \frac{\omega \cdot h}{i \cdot 2\pi}$, где h – шаг ходового винта.

Приведенный к валу электродвигателя постоянный момент сопротивления равен

$$M_c = \frac{(F_{cm} + F_{\partial\partial})v}{\eta \cdot \omega}, \quad (10)$$

где $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$ – коэффициент полезного действия передач системы; F_{cm} – сила сопротивления, приложенная к каретке; $F_m = f_m \cdot mg$ – сила трения; f_m – коэффициент трения скольжения.

3. Примеры реализации оптимального движения

Исходные данные: $M_{\kappa} = 400,15 \text{ н} \cdot \text{м}$, $J = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $M_c = 1,715 \text{ н} \cdot \text{м}$, $F_i = \pi / 2$, $k_1 = 0,004$, $S_{\kappa} = 0,28$, $T = 1 \text{ с}$.

Для обоих вариантов управления при подстановке угловой скорости и углового ускорения (управления) в (1) получены выражения для синхронных частот. Для классического случая

$$\omega_1 = -(12F_i t(T-t)M_k) / (-12JF_i s_k t - 2M_k T^3 + 6JF_i s_k T - M_c T^3 s_k T + 6k_1 t^2 F_i s_k). \quad (11)$$

Для нового типа управления

$$\omega_2 = -20M_k F_i t(T^3 - 3tT^2 + 4t^2T - 2t^3)(12F_i t(T-t)M_k) / (10JF_i s_k T^3 - 60JF_i s_k tT^2 + 120JF_i s_k t^2T - 80F_i s_k t^3 - 2M_k T^5 - M_c T^5 s_k - 10k_1 F_i s_k T^3 + 30k_1 F_i t^2 s_k T^2 - 40k_1 F_i t^3 s_k T + 20k_1 F_i t^4 s_k). \quad (12)$$

На **Рис.2** графики ω_1 и ω_2 совмещены. В новом управлении в середине временного интервал движения синхронная частота близка к константе.

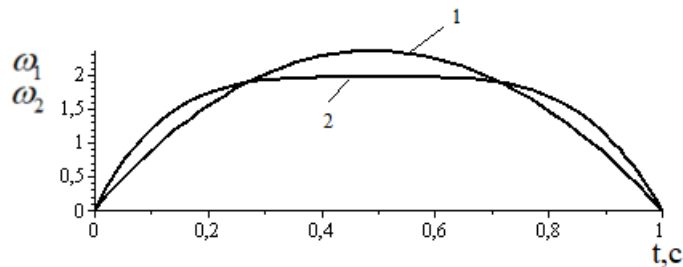


Рис.2 – Графики синхронных частот

Из графиков следует, что угловые перемещения близки, но угловые скорости существенно отличаются. Важно отметить, что при конструировании управления (углового ускорения) с ростом степени аппроксимирующего полинома энергия стремится к своему предельному минимальному значению.

Закключение.

С достаточной для практики точностью упрощенная аналитическая зависимость движущего момента от времени отражает динамические свойства асинхронного двигателя и приводит к упрощению алгоритма поиска управления.

При управлении частотой напряжения статорных обмоток асинхронный двигатель обеспечивает снижение энергии на реализацию оптимального движения объекта из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние покоя за заданное приемлемое минимальное время.

С использованием двигателя переменного тока вычисленная энергия для нового типа управления (по сравнению с известным управлением) снижается на 30%. Итак, с ростом степени полинома конструируемого управления энергия на реализацию оптимального движения снижается.

Библиографический список

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для ВУЗов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с.

2. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводами / Ю.П. Петров. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 187 с.
3. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву / Ю.П. Петров. – М.: Энергия, 1976. – 144 с.
4. Абдуллаев А.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Н.Д. Абдуллаев, Ю.П. Петров. – М.: Энергоиздат, 1985. – 240 с.
5. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления / А.И. Бохонский. – Palmarium Academic Publishing, Deutschland, 2013. – 77 с.
6. Бохонский А.И. Оптимальное управление электропроводом с учетом сопротивления / А.И. Бохонский, А.Н. Круговой // Вестник СевНТУ. Вып. 110: Механика, энергетика, экология, 2010. – С. 123 - 127.
7. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. Монография / А.И. Бохонский – М.: Вузовский учебник, ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
8. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов. Фундаментальные основы объектов. Фундаментальные основы механики / А.И. Бохонский // Материалы международной научно-практической конференции, №2, 2017. – С.38-41.
9. Бохонский А.И. Управление с минимальной энергией переносом движением объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении, №1 (13), 2021 – с. 79-86.
10. Бохонский А.И. Алгоритмы конструирования оптимального движения упругого объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолева, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №4 (348), 2021. – С. 33- 38.
11. Бохонский А.И. Управление электроприводом переменного тока с учетом сопротивления движению / А.И. Бохонский, Круговой А.Н., Д.А. Белоус // Оптимізація виробничих процесів. Зб. Наукових проц, Вып.13, 2011. – С. 46-51.

Bibliograficheskij spisok

1. Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya VUZov / V.I. Klyuchev. – М.:Energoatomizdat, 1985. – 560s.
2. Petrov YU.P. Optimal'noe upravlenie elektroprivodami / YU.P. Petrov. – М.: Gosenergoizdat, 1961. – 187 s.
3. Petrov YU.P. Optimal'noe upravlenie elektricheskim privodom s uchetoм ogranichenij po nagrevu / YU.P. Petrov. – М.: Energiya, 1976. – 144 s.
4. Abdullaev A.D. Teoriya i metody proektirovaniya optimal'nyh regulyatorov / N.D. Abdullaev, YU.P. Petrov. – М.: Energoizdat, 1985. – 240 s.

5. Bohonskij A.I. Aktual'nye zadachi variacionnogo ischisleniya / A.I. Bohonskij. – Palmarium Academic Publishing. Deutschland, 2013. – 77 s.
6. Bohonskij A.I, Optimal'noe upravlenie elektprovodom s uchetom soprotivleniya / A.I. Bohonskij, A.N. Krugovoj // Vestnik SevNTU. Vyp. 110: Mekhanika, energetika, ekoglogiya, 2010. – S. 123 - 127.
7. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip optial'nosti. Monografiya / A.I. Bohonskij – M.: Vuzovskij uchebник, INFRA-M, 2016. – 174 s.
8. Bohonskij A.I. Energoemkost' upravleniya peremeshcheniem ob"ektov. Fundamental'nye osnovy ob"ektov. Fundamental'nye osnovy mekhaniki / A.I. Bohonskij // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, №2, 2017. – S.38-41.
9. Bohonskij A.I. Upravlenie s minimal'noj energiej perenosnom dvizheniem ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varinskaya, A.I. Ryzhkov // Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino-priborostroenii, №1 (13), 2021 – s. 79-86.
10. Bohonskij A.I. Algoritmy konstruirovaniya optimal'nogo dvizheniya uprugogo ob"ekta / A.I. Bohonskij, N.I. Varminkaya, T.V. Mozolevskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, №4 (348), 2021. – S. 33- 38.
11. Bohonskij A.I. Upravlenie elektroprivodom peremennogo toka s uchetom soprotivleniya dvizheniyu / A.I. Bohonskij, Krugovoj A.N., D.A. Belous // Optimizatsiya virobnichih procesiv. Zb. Naukovih proc, Vyp.13, 2011. – S. 46-51.

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

Майстришин Михаил Михайлович, к.т.н., доцент, mihail.maistrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

REDUCING THE ENERGY CAPACITY OF THE AC MOTOR IMPLEMENTING OPTIMAL MOVING

A.I. Bokhonsky, M.M. Maistishin

The dynamics of a non-rigid rod was investigated during its optimal rotation around fixed axis. The "acceleration-deceleration" control provides rotation of the rod at a given angle in the shortest possible time from the initial to the final state of absolute rest. The rotation time was found from the moment relations in the relative motion (as one of the common roots of the system of transcendental equations).

Keywords: Constructed optimal control, AC motor, rotary motion energy intensity.

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

Maistishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, mihail.maystrishin@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ШАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РЕЗЬБОНАРЕЗАНИИ

Вожжов, А. А.¹ Гречко В. А.²

Аннотация. Учитывая характер формирования параметров микро- и макронеровностей, в соответствии с физико-технологической теорией образования неровностей деталей при резьбонарезании, параметры профиля описываются усредненными величинами с добавлением их возможных превышений. Проведен анализа возможных отклонений средних и крайних значений ординат профиля относительно их средних значений, сделано предположение о возможности использования для моделирования представленного подхода. Рассмотрен пример расчета погрешности шага при резьбонарезании. Допустимость такого подхода к моделированию рельефа поверхности подтверждается экспериментально.

Ключевые слова. Резьбонарезание, технологический фактор, шаговые параметры, микрорельеф, точность, качество деталей, взаимное перемещение заготовки и инструмента.

Модель формирования параметров качества деталей при точении позволяет прогнозировать шаговые параметры профиля поверхности.

Шаговые параметры микронеровностей – один из важных параметров качества, регламентированный в понятии шероховатость поверхности. Эти параметры существенно влияют на трение деталей, их виброустойчивость, стойкость к коррозии, прочность покрытий и т. п. Профилограммы профиля поверхности заготовок, обработанных точением даже при использовании прецизионного оборудования, выявляют погрешности шагов неровностей по вершинам, которые возникают из-за колебаний режущей кромки резца вдоль оси вращения заготовки и неравномерных перемещений вершины резца в радиальном направлении.

Предполагая формирование неровностей следом инструмента, шаги неровностей по вершинам можно моделировать следующим образом. На рис. 1 представлена схема образования шагов неровностей при точении и растачивании резцом с радиусом закругления вершины в плане r_p . В моделируемой профилограмме поперечной шероховатости каждому шагу подачи S резца соответствуют перемещения y_{i-1} , y_i , y_{i+1} и т. д. Точка A , лежащая на пересечении двух следов и определяющая вершину неровности, вследствие неравномерных перемещений инструмента будет смещена относительно середины шага на величину ΔA [2–5].

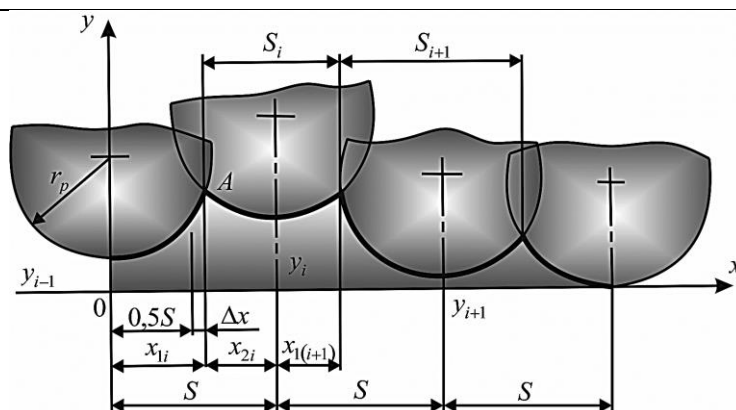


Рис.1 – Схема формирования шагов неровностей при точении и растачивании

Рассмотрим положение точки A в системе координат XOY . Уравнения двух последовательных следов вершины инструмента, формирующих точку A , можно представить как

$$\begin{aligned} x^2 - [y - (y_{i-1} + r_p)] &= r_p^2, \\ (x - S)^2 - [y - (y_i + r_p)] &= r_p^2. \end{aligned} \quad (1)$$

После решения этих уравнений относительно y путем разложения их в ряд Тейлора с удержанием двух первых членов ряда получим

$$\begin{aligned} y &= r_p \left[1 - x^2 / (2r_p^2) \right] + y_{i-1} + r_p, \\ y &= r_p \left[1 - (x - S)^2 / (2r_p^2) \right] + y_i + r_p. \end{aligned} \quad (2)$$

Принимая координаты точки A в системе XOY – x_{1i} и y_i , искомое значение x_{1i} для точки A может быть получено из выражений (2)

$$x_{1i} = 0,5S - \frac{r_p}{S}(y_{i-1} - y_i). \quad (3)$$

Второе слагаемое искомого шага неровностей определяется зависимостью

$$x_{2i} = S - x_{1i} = 0,5S + \frac{r_p}{S}(y_{i-1} - y_i). \quad (4)$$

Из **Рис.1** следует, что шаги неровностей по вершинам можно моделировать выражением

$$S = x_{2i} - x_{1(i+1)}. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (3)

$$x_{1(i+1)} = 0,5S - \frac{r_p}{S}(y_i - y_{i+1}). \quad (6)$$

в окончательном виде выражение для шага неровностей можно записать как

$$S_i = S + \frac{r_p}{S} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}). \quad (7)$$

Таким образом, моделируя массив неровностей $\{y_i\}$, можно учитывать шаги неровностей с последующим отысканием среднего шага неровностей по вершинам

$$\Delta S = S_{(n)} - S_{(1)} / S, \quad (8)$$

где S_n – максимальное значение шага неровностей; S_1 – минимальное значение шага неровностей; S – шаг подачи, после подстановки в зависимость (8) соответствующего значения из выражения (7) получим

$$\Delta S = \frac{2r_p}{S^2} \left[\left(\frac{y_{i+1} + y_{i-1}}{2} + y_i \right)_{\max} + \left(\frac{y_{i-1} + y_{i+1}}{2} + y_i \right)_{\min} \right]. \quad (9)$$

Из анализа выражения (9) следует, что минимум погрешности ΔS шага достигается при $r_p \rightarrow \min$, $S \rightarrow \max$, $y_{\max} - y_{\min} \rightarrow \min$. Для проверки полученных зависимостей были проведены моделирования шагов неровностей в соответствии с выражением (7) и погрешности шага по зависимости (9) и экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 2 (где ΔY – разность между величинами максимального и минимального упругого перемещения в пределах одной профилограммы) [1,5,8].

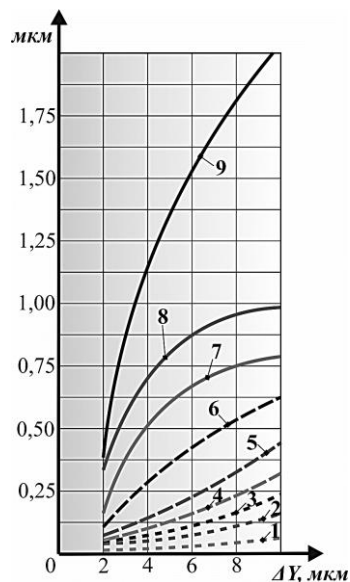


Рис.2 – Зависимости погрешности шагов неровностей от технологических факторов:

1, 2 и 3 – при $S = 0,12$ мм/об и r_p соответственно 0,07, 0,14 и 0,21 мм; 4, 5 и 6 – при $S = 0,08$ мм/об и r_p соответственно 0,07, 0,14 и 0,21 мм; 7, 8 и 9 – при $S = 0,04$ мм/об и r_p соответственно 0,07, 0,14 и 0,21 мм

Представленная методика позволяет раскрыть механизм формирования погрешностей шагов при нарезании резьбы однолезвийным инструментом. Взаимные радиальные перемещения заготовки и инструмента даже при высокой кинематической точности перемещения инструмента обуславливают погрешность шага (**Рис.3**). Перенеся методику формирования погрешностей шагов на случай нарезания метрических резьб, получим

$$S_i = S + 0,28867(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}). \quad (10)$$

где S – номинальный шаг резьбы; S_i – реальный шаг, формируемый с учетом радиальных перемещений y_i (y_i отсчитывается от самой глубокой впадины по аналогии с шероховатой поверхностью) [6,7].

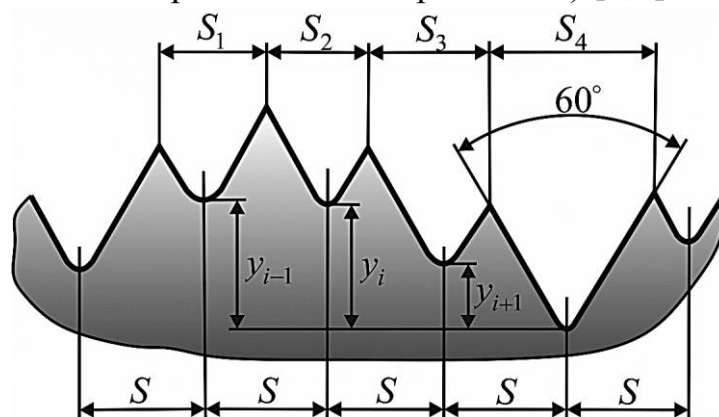


Рис.3 – Схема формирования погрешности шага при резбонарезании.

Представляя погрешность ΔS_i шага как разницу между реальным S_i и номинальным S шагом, получим

$$\Delta S_i = 0,28867(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}). \quad (11)$$

В качестве примера рассмотрим параметры точности, указанные в нормативном документе, для метчика М3×0,5. Длина метчика по ведомственной нормали 120 мм, допустимая погрешность по шагу между двумя нитками на длине 25 мм составляет $\pm 0,01$ мм, биение по заборной части допускается до 0,05 мм.

Множитель зависимости (11), заключенный в скобки, может принимать значения от 0 (при равенстве соседних перемещений) до $2y_i$.

Полагая максимальное значение $y_{i\max} = 0,05$, получим по зависимости (11) возможную погрешность шага (без учета кинематических погрешностей), равную 0,029, что превышает допустимую погрешность шага.

С учетом проведенного анализа зависимости (11) следует в ведомственном документе ужесточить допустимую радиальную погрешность, т. к. она может привести к большим погрешностям шага.

Библиографический список

1. Дьяченко П.Е. Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки / П.Е. Дьяченко. – Москва: АН СССР, 1949. – 126 с.
2. Внуков Ю.М. Особенности формирования топографии обработанной поверхности детали при точении с вибрациями / Ю.М. Внуков, М.В.Кучугуров // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 151/2014. Серія: Машиноприладобудування та транспорт, 2014. – С. 36 – 40.
3. Кучугуров М.В. Способ определения сдвига фаз волн на поверхности резания ψ при точении / М.В. Кучугуров, Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя // Вісник ЖДТУ: Процеси механічної обробки в машинобудуванні, Вып. 14, 2013. – С. 93 – 100.
4. Степанова Е.А. Метрология и измерительная техника: основы обработки результатов измерений: учебное пособие для вузов / Е.А. Степанова, Н.А. Скулкина, А.С. Волегов; под общ. ред. Е.А. Степановой. – Москва: Изд-во Юрайт, 2017. – 95 с.
5. Резание металлов и технологическая точность в машиностроении: Ч1 / Под ред. Ю.А. Розенберг, В.П. Пономарева. – Кург.машиностр.ин-т, 1968. – 235с.
6. Вожжов А.А. Обоснование объема исследовательской выборки в задачах прогнозирования параметров точности и качества изделия / А.А.Вожжов, В.А. Гречко, А.И. Рябченко / Научный рецензируемый журнал. «Главный механик», №6 (202), 2020 – С. 18-22.
7. Гришина Т.Г. Факторы, влияющие на оперативность управления технологическими системами / Т.Г. Гришина // Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал, №3(15), 2011 – С. 167-169
8. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с.

Bibliograficheskij spisok

1. D'yachenko P.E. Issledovanie zavisimosti mikrogeometrii poverhnosti ot uslovij mekhanicheskoy obrabotki / P.E. D'yachenko. – Moskva: AN SSSR, 1949. – 126 s.
2. Vnukov YU.M. Osobennosti formirovaniya topografii obrabotannojo poverhnosti detali pri tochenii s vibraciyami / YU.M. Vnukov, M.V.Kuchugurov // Visnik SevNTU: zb. nauk. pr. Vip. 151/2014. Seriya:

- Mashinopriladobuduvannya ta transport, 2014. – S. 36 – 40.
3. Kuchugurov M.V. Sposob opredeleniya sdviga faz voln na poverhnosti rezaniya ψ pri tochenii / M.V. Kuchugurov, YU.N. Vnukov, S.I. Dyadya // Visnik ZHDTU: Procesi mekhanichnoï obrobki v mashinobuduvanni, Vyp. 14, 2013. – S. 93 – 100.
 4. Stepanova E.A. Metrologiya i izmeritel'naya tekhnika: osnovy obrabotki rezul'tatov izmerenij: uchebnoe posobie dlya vuzov / E.A. Stepanova, N.A. Skulkina, A.S. Volegov; pod obshch. red. E.A. Stepanovoj. – Moskva: Izd- vo YUrajt, 2017. – 95 s.
 5. Rezanie metallov i tekhnologicheskaya tochnost' v mashinostroenii: CH1 / Pod red. YU.A. Rozenberg, V.P. Ponomareva. – Kurg.mashinostr.in-t, 1968. – 235s.
 6. Vozhzhov A.A. Obosnovanie ob"ema issledovatel'skoj vyborki v zadachah prognozirovaniya parametrov tochnosti i kachestva izdeliya / A.A.Vozhzhov, V.A. Grechko, A.I. Ryabchenko / Nauchnyj recenziruemyj zhurnal. «Glavnyj mekhanik», №6 (202), 2020 – S. 18-22.
 7. Grishina T.G. Faktory, vliyayushchie na operativnost' upravleniya tekhnologicheskimi sistemami / T.G. Grishina // Vestnik MGTU «Stankin». Nauchnyj recenziruemyj zhurnal, №3(15), 2011 – S. 167-169
 8. Novoselov YU. K. Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke / YU. K. Novoselov. – Sevastopol' : SevNTU, 2012. – 304 s.

¹Вожжов Андрей Анатольевич, к.т.н., доцент, e-mail: 0506773532@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Гречко Валерия Александровна, магистр, e-mail: valerijajagami@gmail.com, Севастопольский государственный университет

FEATURES OF FORMATION OF ERRORS OF STEPPING PARAMETERS OF SURFACE PROFILE DURING THREADING

A.A.Vozhzhov, V.A. Grechko

Taking into account the nature of the formation of parameters of micro- and macro-roughness, in accordance with the physical and technological theory of the formation of roughness of parts during threading, the profile parameters are described by averaged values with the addition of their possible excess. The analysis of possible deviations of the mean and extreme values of the profile ordinates relative to their mean values is carried out, an assumption is made about the possibility of using the presented approach for modeling. An example

of calculating the pitch error during threading is considered. The admissibility of this approach to modeling the surface relief is confirmed experimentally.

Key words: threading, technological factor, step parameters, microrelief, accuracy, quality of parts, mutual movement of the workpiece and the tool

Andrey Anatolyevich Vozhzhov, candidate of technical science, docent, e-mail: 0506773532@mail.ru, Sevastopol State University

Valeriya Aleksandrovna Grechko, master, e-mail: valerijajagami@gmail.com, Sevastopol State University

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ КАЛЕНДАРНОЙ ПРОФИЛАКТИКИ В СРЕДЕ ANYLOGIC

Заморёнов М.В.¹, Заморёнова Д.В.², Владимирова Е.С.³, Малицкая А.А.⁴

Аннотация. В среде AnyLogic разрабатывается имитационная модель однокомпонентной системы, учитывающая влияние календарной профилактики на производительность. Проводится статистическая обработка результатов машинного эксперимента. Выносится суждение о правильности построения математической модели такой системы путем сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования.

Ключевые слова. Имитационная модель, календарная профилактика, машинный эксперимент, AnyLogic.

Моделирование является одним из основных этапов при разработке нового и модернизации имеющегося оборудования [1]. Аналитическое моделирование [2–4] позволяет добиться достаточно высокой точности результатов за счет корректного применения математического аппарата, а также позволяет использовать иерархический подход к построению моделей систем, при котором сложная система разбивается на простейшие составляющие. Однако, не смотря на выше сказанное, правильность построения аналитических моделей, для исключения вероятных ошибок, проверяется путем сравнения результатов моделирования с машинным экспериментом (имитационным моделированием) [5–9].

В данной работе рассматривается модель функционирования однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики. Предлагается в среде AnyLogic построить имитационную модель такой системы, провести ряд экспериментов и сравнить результаты моделирования с аналитической моделью [10].

Рассмотрим функционирование такой системы. Время ее безотказной работы – СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t)$, время восстановления системы – СВ β_1 с ФР $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t)$. В случайные моменты времени (через промежутки времени α_2 с ФР $F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$) проводится профилактика, время проведения профилактики – СВ β_2 с ФР $G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$. Профилактика проводится, если момент начала профилактики попал на период работы системы. После проведения профилактики работа системы начинается сначала (рабочие свойства системы полностью обновляются). СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические

ожидания и дисперсии; у ФР $F_1(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$ существуют плотности $f_1(t)$, $g_1(t)$, $g_2(t)$.

Для описания функционирования системы используем ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующий ему ПМП $\xi(t)$. Физические состояния системы: 1 – системы исправна, 0 – системы восстанавливается, 2 – системы профилактируется. Расширим ФПС, введя полумарковские состояния:

$$E = \{221, 210, 102x, 112z, 200y\},$$

где 221 – началась профилактика, работа системы прервана; 210 – профилактика завершена, работа системы началась сначала; 102x – системы завершила работу, началось восстановление; время, оставшееся до проведения профилактики $x > 0$; 112z – произошло восстановление системы; время, оставшееся до проведения профилактики $z > 0$; 200y – профилактика не проводится, т.к. момент профилактики попал на момент восстановления системы; время, оставшееся до окончания восстановления $y > 0$.

Граф состояний системы приведен на **Рис.1**.

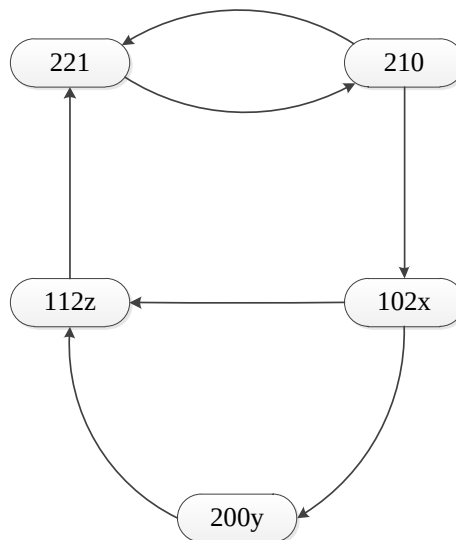


Рис.1 – Граф состояний системы

При построении полумарковской модели приняты следующие допущения:

- за время восстановления происходит не более одного события, начало профилактики;
- за время между профилактиками происходит не более 1 отказа.

Для данной системы подмножества работоспособных E_+ и неработоспособных E_- состояний имеют вид:

$$E_+ = \{221, 210, 112z\}, E_- = \{200y, 102x\}.$$

В [10] определены функции распределения времен пребывания системы в подмножествах E_+ работоспособных $F_+(s)$ и E_- неработоспособных $F_-(s)$ состояний:

$$F_-(s) = F_{102}(s) * F_{200}(s),$$

$$F_+(s) = F_{112}(s) * \frac{F_{221}(s)}{c_{221} - (c_{221} - 1)f_{221}(s)} * \frac{F_{210}(s)}{c_{210} - (c_{210} - 1)f_{210}(s)},$$

где $*$ – знак операции свертки, $c_{221} = \frac{m_{221}^0}{P_{221} \cdot m_{221}}$, $c_{210} = \frac{m_{210}^0}{P_{210} \cdot m_{210}}$,

$$\bar{F}_{221}(t) = \bar{G}_2(t), \bar{F}_{210}(t) = \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_2(t), \bar{F}_{112}(t) = \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_x(t),$$

$$\bar{F}_{200}(t) = \bar{F}_2(t) \cdot \bar{F}_y(t), \bar{F}_{102}(t) = \bar{G}_1(t) \cdot \bar{F}_z(t),$$

$$\bar{F}_x(t) = \frac{\int_0^\infty [F_2(t+x) - F_2(x)] f_1(x) dx}{\int_0^\infty [1 - F_2(x)] f_1(x) dx}, \bar{F}_y(t) = \frac{\int_0^\infty [G_1(t+x) - G_1(x)] f_x(x) dx}{\int_0^\infty [1 - G_1(x)] f_x(x) dx},$$

$$\bar{F}_z(t) = P_{102}^{112} \frac{\int_0^\infty [F_x(t+x) - F_x(x)] g_1(x) dy}{\int_0^\infty [1 - F_x(x)] g_1(x) dx} + P_{102}^{200} \frac{\int_0^\infty [F_y(t+x) - F_y(x)] g_1(x) dy}{\int_0^\infty [1 - F_y(x)] g_1(x) dx}.$$

Построение имитационной модели однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики проводилось в среде AnyLogic.

Система AnyLogic [11] предоставляет пользователю законченную высокоуровневую информационную технологию создания имитационных моделей. В этой системе имеются средства формализованного описания параллельных дискретных процессов в виде условных графических изображений или с помощью операторов собственного языка [12]. Координация процессов осуществляется автоматически в едином модельном времени. Пользователь в случае необходимости может ввести свои правила синхронизации событий. Имеются средства управления моделью, динамической отладки и автоматизации обработки результатов [13–15].

На **Рис.2** приведена часть модели, построенной в среде AnyLogic, имитирующая обслуживание заявок исследуемой системой.

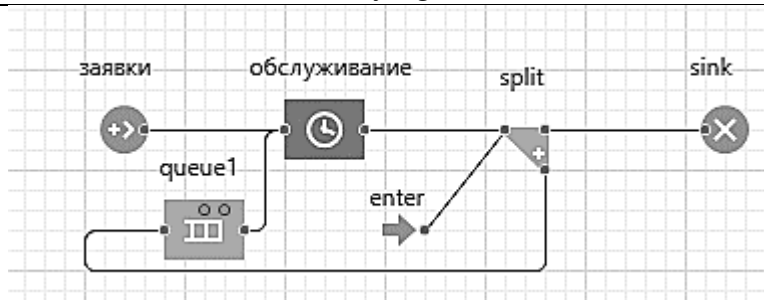


Рис.2 – Модель обслуживания в среде AnyLogic

Для моделирования потоков заявок на обслуживание используем блок Source – «заявки», который генерирует только одну заявку, которая в дальнейшем дублируется в блоке Split и отправляется в блок Sink и снова на обслуживание в блок Delay – «обслуживание».

На Рис.3 приведена часть модели, построенной в среде AnyLogic, имитирующая наработку на отказ и восстановление исследуемой системы.

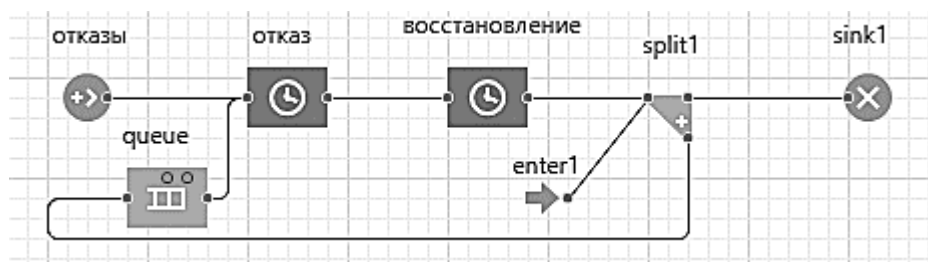


Рис.3 – Модель наработки на отказ и восстановления в среде AnyLogic

Для моделирования потоков отказов и восстановлений создан Агент «Аотказ». Блок Source – «отказы», который создает одного агента «Аотказ», который в дальнейшем дублируется в блоке Split1 и отправляется в блок Sink1 и снова на обслуживание в блок Delay – «отказ». Перед блоком «отказ» стоит очередь, в которой агент «Аотказ» ожидает возможности занять этот блок.

При попадании агента «Аотказ» в блок «восстановление» производится следующие действия (Рис.4):

- приостанавливается обслуживание заявок;
- заявка удаляется из блока «обслуживание»;
- агент «Апрофилактика» удаляется из блока «наработка», при наличии
- агент «Апрофилактика» удаляется из блока «проведение», при наличии

При выходе агента «Аотказ» из блока «восстановление» возобновляется обслуживание заявок.

🕒

восстановление - Delay

Имя:

восстановление

☒ Отображать имя

☐ Исключить

Тип задержки:

⇒

☒ Определенное время
☐ До вызова функции stopDelay()

Время задержки:

⇒

exponential(0.4)+exponential(0.1333)

секунды ▼

Вместимость:

⇒

1

Максимальная вместимость:

⇒

☐

Место агентов:

⇒

🔗

► Специфические

▼ Действия

При входе:

≡

```

обслуживание.suspend();
if (обслуживание.size()>0)
  enter.take(обслуживание.remove(обслуживание.get(0)));
if (наработка.size()>0) enter2.take(наработка.remove(нарабо
if (проведение.size()>0) enter2.take(проведение.remove(пров
        
```

При подходе к выходу:

≡

При выходе:

≡

if (обслуживание.isSuspended()) обслуживание.resume()

Рис.4 – Блок «восстановление»

На Рис.5 приведена часть модели, построенной в среде AnyLogic, имитирующая наработку на и проведение профилактики исследуемой системы.

Для моделирования потоков наработки и проведения профилактики создан Агент «Апрофилактика». Блок Source – «Профилактики», который создает одного агента «Апрофилактика», который в дальнейшем дублируется в блоке Split2 и отправляется в блок Sink1 и снова на обслуживание в блок Delay – «наработка». Перед блоком «наработка» стоит очередь, в которой агент «Апрофилактика» ожидает возможности занять этот блок. При попадании агента «Апрофилактика» в блок SelectOutput – «test» проводится проверка занятости блока «восстановление»: если он свободен, то агент «Апрофилактика» помещается в блок «проведение», в котором имитируется проведение профилактики; иначе – в блок Split2.

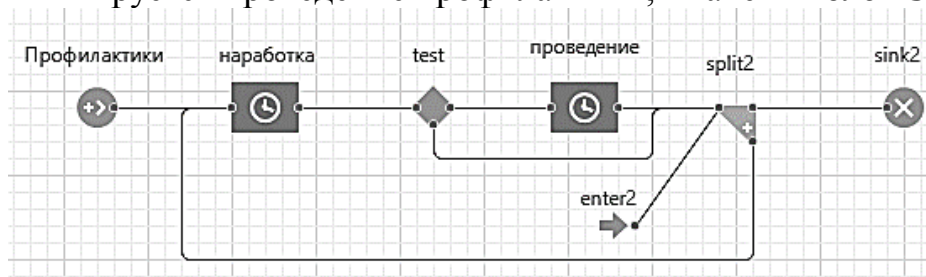


Рис.5 – Модель наработки на отказ и восстановления в среде AnyLogic

При попадании агента «Апрофилактика» в блок «проведение» приостанавливается обслуживание заявок.

При выходе агента «Апрофилактика» из блока «проведение» производятся следующие действия (**Рис.6**):

- возобновляется обслуживание заявок;
- агент «Аотказ» удаляется из блока «отказ», при наличии

🕒 проведение - Delay

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Тип задержки: ☒ Определенное время
☐ До вызова функции stopDelay()

Время задержки:

Вместимость:

Максимальная вместимость:

Место агентов:

► Специфические

▼ Действия

При входе:

При подходе к выходу:

При выходе:

При извлечении:

Рис.6 – Блок «проведение»

Приведем пример расчета коэффициента готовности исследуемой системы при следующих исходных данных: $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$ распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами λ_1 , λ_2 ; μ_1 , μ_2 ; ν_1 , ν_2 ; γ_1 , γ_2 соответственно; причем

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad f_2(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

$$g_1(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1}, \quad g_2(t) = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1},$$

где

$\lambda_1 = 0,2 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}$; $\mu_1 = 0,4 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = 0,1333 \text{ ч}^{-1}$;
 $\nu_1 = 0,4 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_2 = 0,1333 \text{ ч}^{-1}$; $\gamma_1 = 0,8 \text{ ч}^{-1}$, $\gamma_2 = 0,2667 \text{ ч}^{-1}$.

Результаты имитационного моделирования приведены на **Рис.7**

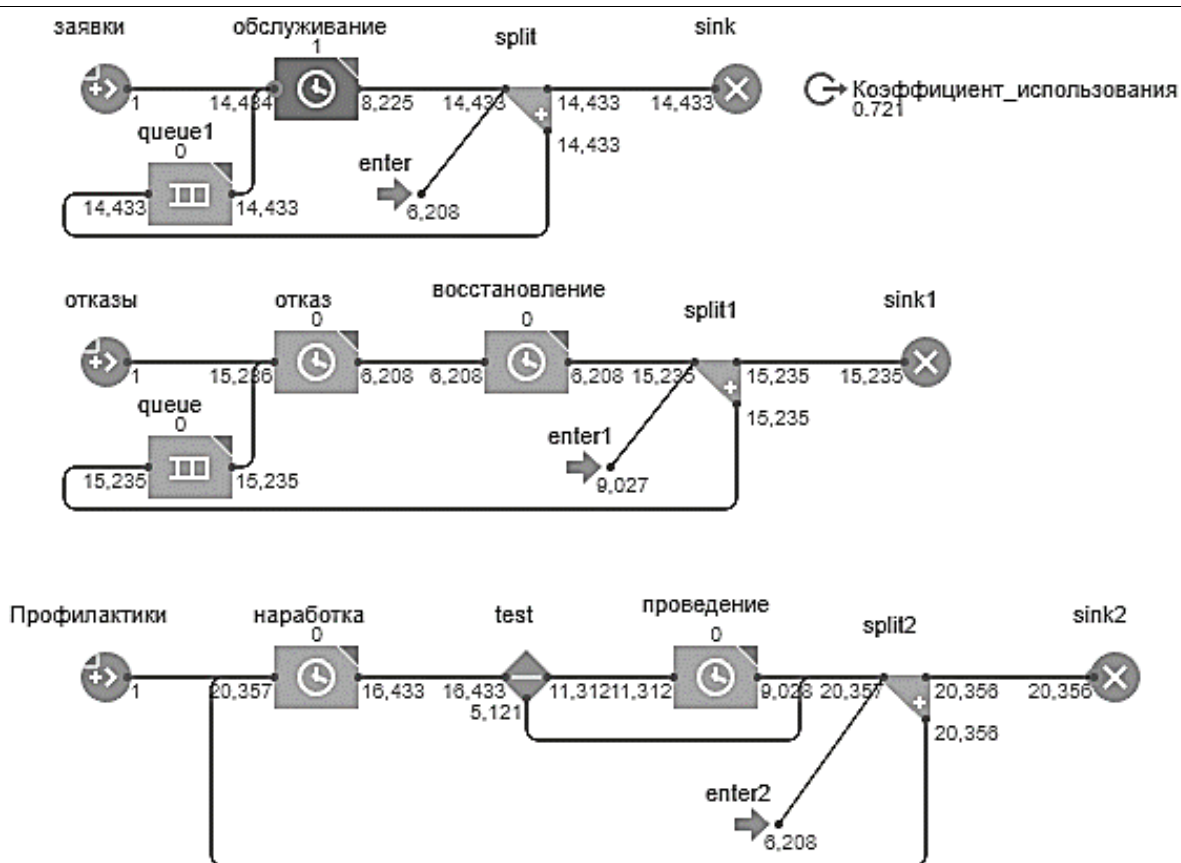


Рис.7 – Результаты моделирования системы в AnyLogic

Как видно из **Рис.7**, коэффициент готовности исследуемой системы составил 0,721, в то же время коэффициент готовности, полученный аналитически, равен 0,717.

Относительная погрешность результатов составляет 0,56%, что говорит о высокой точности построенных моделей.

В дальнейших исследованиях планируется проведение расчетов оптимального распределения времени проведения профилактики и времени между профилактиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-01-00704а.

Библиографический список

1. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем. Монография / В.Я.Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 700с.
2. Королук В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.
3. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.

4. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: СевНТУ, 2000. – 284 с.
5. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В.Д. Боев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004 – 368 с.
6. Советов Б.Я. Моделирование систем: Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов по спец. АСУ / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1988. – 135 с.
7. Томашевский В.Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
8. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS / Т.Дж. Шрайбер; под ред. М.А. Файнберг. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
9. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е.М. Кудрявцев. – ДМК Пресс 2004. – 320 с.
10. Копп В.Я. Исследование функционирования однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики / В.Я. Копп, П.Н. Флоря, М.В. Заморёнов // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении, №1(9), 2020. – С. 28-39.
11. Боев В.Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: Монография / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2011. – 404 с.
12. Дискретно-событийное моделирование. [Электронный ресурс] // AnyLogic. – URL: <http://www.anylogic.ru/discrete-event-simulation> (дата обращения: 27.03.2021).
13. Борщев А.В. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf> (дата обращения: 27.03.2021).
14. Кудрявцев, Е.М. Основы имитационного моделирования различных систем. / Е.М. Кудрявцев. – М.: ДМК пресс, 2004. – 320 с.
15. Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic. XJ Technologies : [электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.xjtek.ru>

Bibliograficheskiy spisok

1. Kopp V.YA. Modelirovanie avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem. Monografiya / V.YA.Kopp. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 700s.
2. Korolyuk V.S. Polumarkovskie processy i ih prilozheniya / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. Dumka, 1976. – 181 s.
3. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.

4. Kopp V.YA Stohasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol': SevNTU, 2000. – 284 s.
5. Boev V.D. Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World / V.D. Boev. – SPb.: BHV-Peterburg, 2004 – 368 s.
6. Sovetov B.YA. Modelirovanie sistem: Kursovoe proektirovanie: Ucheb. posobie dlya vuzov po spec. ASU / B.YA. Sovetov, S.A. YAkovlev. – M.: Vyssh. shk., 1988. – 135 s.
7. Tomashevskij V.N. Imitacionnoe modelirovanie v srede GPSS / V.N. Tomashevskij, E.G. ZHDanova. – M.: Bestseller, 2003. – 416 s.
8. SHrajber T.Dzh. Modelirovanie na GPSS / T.Dzh. SHrajber; pod red. M.A. Fajnberg. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 592 s.
9. Kudryavcev E.M. GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyh sistem / E.M. Kudryavcev. – DMK Press 2004. – 320 s.
10. Kopp V.YA. Issledovanie funkcionirovaniya odnokomponentnoj sistemy s uchetom kalendarnoj profilaktiki / V.YA. Kopp, P.N. Florya, M.V. Zamoryonov // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii, №1(9), 2020. – S. 28-39.
11. Boev V.D. Issledovanie adekvatnosti GPSS World i AnyLogic pri modelirovanii diskretno-sobytnykh processov: Monografiya / V.D. Boev. – SPb.: VAS, 2011. – 404 s.
12. Diskretno-sobytnoe modelirovanie. [Elektronnyj resurs] // AnyLogic. – URL: <http://www.anylogic.ru/discrete-event-simulation> (data obrashcheniya: 27.03.2021).
13. Borshchev A.V Ot sistemnoj dinamiki i tradicionnogo IM – k prakticheskim agentnym modelyam: prichiny, tekhnologiya, instrumenty. [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf> (data obrashcheniya: 27.03.2021).
14. Kudryavcev, E.M. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyh sistem. / E.M. Kudryavcev. – M.: DMK press, 2004. – 320 s.
15. Mnogopodhodnoe imitacionnoe modelirovanie v AnyLogic. XJ Technologies : [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.xjtek.ru>

¹*Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент, Zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Заморёнова Дарья Викторовна, к.т.н., доцент, Zamik@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³Владимирова Елена Сергеевна, старший преподаватель,
lena_vladimir@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

⁴Малицкая Александра Александровна, ассистент,
malitskaya@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

**ANALYSIS OF THE FUNCTIONING OF A SINGLE-COMPONENT
SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT CALENDAR PREVENTION IN
ANYLOGIC ENVIRONMENT**

M.V. Zamoryonov, D.V. Zamoryonova, E.S. Vladimirova, A.A. Malitskaya

In this article, a simulation model of a one-component system is developed in the AnyLogic environment, taking into account the impact of calendar maintenance on performance. Statistical processing of the results of a machine experiment is carried out. A judgment is made about the correctness of constructing a mathematical model of such a system by comparing the results of analytical and simulation modeling.

Key words: simulation model, calendar prophylaxis, machine experiment, AnyLogic.

Zamoryonov Mikhail Vadimovich, candidate of technical science, docent, Zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

Zamoryonova Darya Viktorovna, candidate of technical science, docent, Zamik@ukr.net, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

Vladimirova Elena Sergeevna, senior lecturer, lena_vladimir@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Malitskaia Aleksandra Aleksandrovna, assistant, malitskaya@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ РЕЗЬБОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЗАКАЛЕННОЙ ЗАГОТОВКЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Липка В.М.¹, Рапацкий Ю.Л.², Копп В.Я.³, Карташов Л.Е.⁴

Аннотация. *Качество деталей с наружной резьбой в значительной мере определяется различными проявлениями технологической наследственности при их изготовлении. В частности, наружные дефекты резьбонакатных роликов наследуются накатываемыми с их помощью деталями с наружной резьбой. Для учета влияния охлаждения на тепловые процессы при шлифовании резьбы на резьбонакатных роликах предложена конечно-элементная модель в среде COMSOL Multiphysics. Результаты моделирования позволяют сформировать исходные данные для полумарковских математических моделей, описывающих технологическую наследственность на этапах жизненного цикла изделий, а также могут быть использованы для выбора оптимальных режимов шлифования резьбовых поверхностей.*

Ключевые слова. *Технологическая наследственность, резьбонакатные ролики, резьбошлифование, охлаждение, прижоги.*

Анализ исследований и публикаций. Качество деталей с наружной резьбой, получаемых резьбонакатыванием, в значительной мере определяется параметрами резьбонакатных роликов. В настоящее время при изготовлении резьбонакатных роликов применяют, как правило, два подхода, первый из которых состоит в предварительном протачивании твердосплавным резцом резьбовой канавки, с последующим шлифованием одноконтурным шлифовальным кругом (ШК), а второй предполагает только шлифование одно- или многоконтурным ШК. Крайне ограниченное пространство для взаимодействия ШК и заготовки, невозможность обеспечения эффективного охлаждения и, вместе с тем, высокие требования к качеству готовой резьбы создают противоречие, преодолеть которое в полной мере не удалось до настоящего времени, несмотря на значительное количество исследований и публикаций [1-5]. При шлифовании резьбы на закаленных заготовках из легированных сталей возникают две наиболее серьезные проблемы, главной из которых является возникновение прижогов в зоне взаимодействия заготовки с вершиной ШК. Вторая проблема – неравномерный износ вершины ШК и нарушение формы резьбовой канавки, в значительной мере связана с первой. Исследование тепловых явлений, происходящих в зоне контакта одно- или многоконтурного ШК с заготовкой при резьбошлифовании, представляет собой сложную задачу,

проявляются в виде фазовых превращений в стали, а также внутренних напряжений, вызывающих деформацию поверхности резбовой канавки, образование микротрещин и других, преимущественно скрытых и опасных при дальнейшей эксплуатации дефектов. Таким, образом, в рассматриваемом случае имеет место двойное негативное проявление технологической наследственности: с одной стороны, сокращается срок службы дорогостоящих резбонакатных роликов, с другой стороны – отклонения формы рабочей поверхности инструментов передаются накатываемым с их помощью деталям с наружной резьбой, что сокращает срок службы изделий, в которые они устанавливаются.

Для количественной оценки тепловыделения при резбошлифовании, зону непосредственного контакта ШК и заготовки будем рассматривать как источник тепла, с мощностью, приближенно вычисленной с использованием эмпирической зависимости [1,2]:

$$Q = cV_k^{0,52}. \quad (1)$$

где c – теплоемкость материала круга, принятая равной 418,7 Дж/кг*К; V_k – линейная скорость заготовки. Подставляя в (1) числовые данные, найдем, что мощность источника тепла $Q = 2660$ Вт.

Тепловой поток на эффективной поверхности контакта ШК и заготовки можно определить из соотношения [1,2]:

$$q = \frac{0,7Q}{Bl_g}. \quad (2)$$

где B – длина зоны контакта ШК и заготовки, м; l_g – эффективная ширина контакта, м, учитывающая неравномерность теплового потока в контактной зоне и геометрию поверхностных элементов, $l_g = l_t * K_1 K_2$, где l_t – теоретическая длина контура соприкосновения ШК и детали, K_1 – коэффициент, учитывающий пористую структуру поверхности ШК, на 50% образуемую абразивными зернами; K_2 – коэффициент, учитывающий неравномерность выделения тепла в контакте; в рассматриваемом случае, исходя из формы и размеров контура соприкосновения ШК и заготовки, можно с достаточной точностью считать l_g равным 2,884 мм; Q – мощность источника тепла, Вт. Коэффициент 0,7 в числителе показывает, что в заготовку при рассматриваемых условиях поступает ориентировочно 70% от количества теплоты, выделяемой источником [3]. Подставляя числовые данные в (2), получим $q = 1,74 * 10^7$ Вт/м². Для верификации модели произведем предварительный расчет максимальной температуры, которая может быть достигнута в зоне шлифования при наличии охлаждения подачей СОЖ через поры ШК под давлением 0,35 МПа, пользуясь эмпирическим приближенным соотношением:

$$T_{\max} = 500 * V_k^{0,18} * K_m * K_o. \quad (3)$$

где: V_k - линейная скорость круга в точке соприкосновения, м/с; коэффициент K_m примем равным 1,1 [1]; коэффициент K_o определим следующим образом: $K_o = 0,93p_0^{-0,08}$, где p_0 - давление СОЖ в подающей магистрали, МПа, в рассматриваемом случае примем $p_0 = 0,35$ МПа [1]. Подставив числовые данные в (3), получим: $T_{\max} = 833,4$ °С.

Рассмотрим данные для построения модели: коэффициент конвективной теплоотдачи при охлаждении может быть принят для СОЖ на водной основе равным 3000 Вт/м²град; температуру окружающей среды до начала моделирования можно считать равной 20°С, диаметр ШК – 500 мм, материал ШК – электрокорунд с зернистостью 240-280 для предварительного шлифования и 280-320- для окончательного; материал заготовки – сталь Х6ВФ горячекатанная по ГОСТ 5950-2000, диаметр заготовки – 160 мм, заготовка предварительно прокована, для достижения балла карбидной неоднородности не более 3, (по ГОСТ 8233-56 (переизд. 2004)) и проточена на токарном станке фасонным твердосплавным резцом для первоначального формирования резьбовой канавки; теплоемкость материала заготовки 810 Дж/кг*град; плотность 7700 кг/м³, твердость после закалки HRC 59-62, линейная скорость точек V_k на режущей кромке круга – 35 м/с; линейная скорость V_o точек на внешней поверхности заготовки – 0,2 м/с.

Проанализируем имеющиеся данные об изменениях физико-механических параметров стали Х6ВФ под. воздействием высокой температуры и их возможное влияние на качество готовых резьбонакатных инструментов при эксплуатации. В частности, твердость закаленной заготовки при нагреве от 100°С до 500°С снижается от HRC 62 до HRC 54, что, с одной стороны, улучшает шлифуемость, а, с другой стороны, снижает коэффициент теплопроводности на 15-20%, что приводит к ухудшению теплоотвода, быстрому испарению СОЖ и повышению вероятности возникновения прижогов и микротрещин. Учитывая сложность аналитических методов моделирования тепловых процессов в зоне контакта ШК с заготовкой, будем строить конечно-элементную модель исследуемого процесса [6], с помощью приложения COMSOL Multiphysics, в которое необходимо импортировать 3D-чертеж моделируемого объекта.

Будем использовать следующие допущения: взаимодействующие между собой участки круга и заготовки имеют абсолютную жесткость; вероятностью возникновения колебаний при их взаимодействии пренебрегаем. Для экономии времени при моделировании будем рассматривать только те части ШК и заготовки, которые находятся в непосредственной близости от области их взаимодействия, в пределах до 40 мм от точки соприкосновения. Влиянием нагрева частей заготовки, не

находящихся в контакте с ШК и соответствующим изменением ее линейных размеров из-за теплового расширения, пренебрегаем.

При моделировании использована сетка из 53047 тетраэдральных конечных элементов, показанная на **Рис.2** и построенная аналогично задаче, решенной в [6].

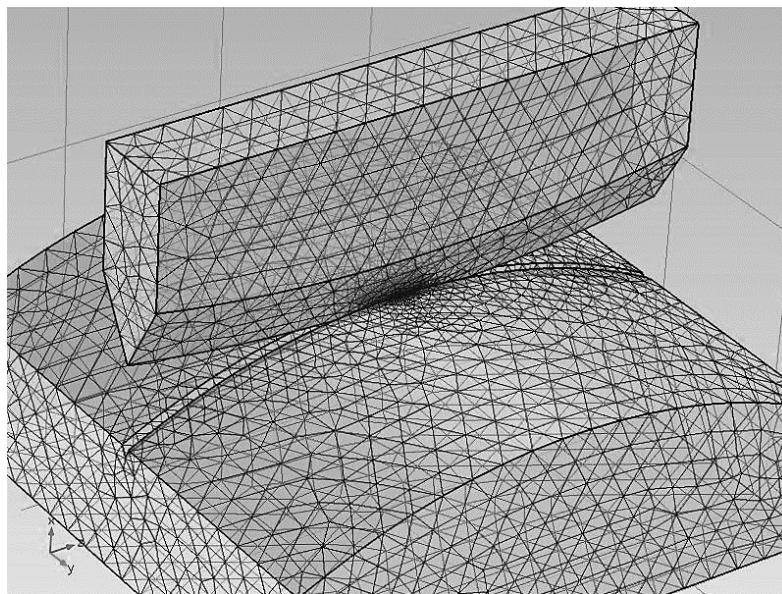


Рис.2 – Сформированная конечно-элементная сетка

Процесс теплообмена в рассматриваемом случае является нестационарным и зависит от времени контакта ШК и заготовки [1,8]. При указанных выше значениях линейных скоростей точек круга и заготовки время контакта составляет (0,03 – 0,04)с. Расчеты были проведены для промежутков времени от 0 до 0,1с с интервалом 0,01с. Выполнено сравнение протекания процесса при наличии и отсутствии принудительного охлаждения зоны шлифования. Примеры визуализации результата моделирования без охлаждения приведены в [6], в данной статье ввиду громоздкости не приводятся.

Результаты моделирования для различных наборов исходных данных сведены в таблицу 1.

Таблица 1. – Результаты моделирования

Время процесса, с	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Температура, °С							
С охлаждением	-	169	334	450	587	823	898
Без охлаждения	20	386	530	659	858	1007	1190

Выводы. Значение максимальной температуры $833,4^{\circ}\text{C}$, найденное по эмпирическому соотношению (3), в достаточной мере соответствует значению для времени процесса $0,05\text{ с}$, погрешность составила $1,25\%$, что, в целом, подтверждает адекватность построенной конечно-элементной модели исследуемому процессу. Полученная погрешность не превышает результаты, полученные в [7,8]. Из анализа результатов моделирования, представленных в таблице 1, видно, что нарастание температуры в зоне контакта ШК с заготовкой без охлаждения происходит катастрофически быстро, за $0,04\text{ с}$ от 386°C до 1007°C , т.е., более, чем на 620°C , что практически неизбежно приводит к прижогам, структурным превращениям в стали, снижению ее твердости, обезуглероживанию, возникновению микротрещин и других дефектов. Таким образом, без охлаждения обработка при данных условиях невозможна. При достижении времени процесса $t=0,6\text{ с}$ значение температуры, несмотря на наличие охлаждения, становится недопустимым, что приводит к необходимости прекращения обработки и корректировки технологических режимов. Из рассмотренных различных вариантов охлаждения, наиболее целесообразным следует, по-видимому, считать подачу СОЖ на водной основе под давлением через поры в ШК, несмотря на значительные технические трудности, связанные с поддержанием давления в подающей магистрали не ниже $0,35\text{ МПа}$ [1]. Расход СОЖ следует обеспечить не менее 10 л/мин , скорость ее подачи в зону обработки не менее 3 м/с , более точно значения параметров необходимо подбирать экспериментально. Рекомендации по выбору СОЖ для рассматриваемого случая требуют дополнительных исследований, могут быть рекомендованы российские жидкости EFELE CF-621, Lenox Saw Master, «Модус» производства ТПК «Синтез», Bohre фирмы Kerner.

Анализ приведенных в таблице 1 результатов моделирования показывает, что охлаждение с подачей СОЖ через ШК позволяет эффективно замедлить нарастание температуры в зоне обработки, но не гарантирует полностью бесприжоговое шлифование. Высокая стоимость заготовок резбонакатных роликов, значительное негативное влияние прижогов на надежность готовых инструментов обусловили необходимость выбора в инструментальном производстве оптимальных технологических режимов шлифования, исходя из заданной производительности и предотвращения прижогов. В [6] предложена методика определения формы вершины ШК, позволяющая значительно снизить вероятность возникновения прижогов, за счет обеспечения равномерного износа ШК.

Построенная конечно-элементная модель позволяет не только осуществлять проверку предварительно вычисленных технологических режимов шлифования резбовых поверхностей одноконтурным ШК, для предотвращения прижогов и оценки времени на выполнение операции, а

также для параметрической оптимизации резбошлифовальной обработки, но и дает возможность формализовать представление результатов в виде исходных данных для полумарковских математических моделей [9], описывающих вероятность передачи негативных признаков при технологическом наследовании на этапах жизненного цикла изделий. Полученные результаты могут быть использованы также для обеспечения бесприжоговой обработки резбовых поверхностей многониточными ШК.

Направление дальнейших исследований связано с изучением механизмов технологического наследования на этапах жизненного цикла резбонакатных роликов, в том числе с оценкой влияния условий охлаждения, режимов обработки и свойств ШК на тепловые процессы, происходящие при шлифовании резбовых поверхностей и на качество готовых изделий,

Библиографический список

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
3. Li Y.Y. Моделирование процесса шлифования / Y.Y. Li, Y. Chen // Современное машиностроение, сер. Б, №8. – С. 36-44.
4. Киричек А.В. Резбонакатывание.: Библиотека технолога / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
5. Липка В.М. Обеспечение качества наружной резьбы при шлифовании резбонакатных роликов / В.М. Липка, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацкий // Вестник современных технологий, №4(16), 2019 – С. 59-65.
6. Копп В.Я. Моделирование методом конечных элементов тепловых явлений при шлифовании односточным кругом резьбы на заготовках резбонакатных роликов / В.Я. Копп, В.В. Леонтьев, В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Автоматизация и измерения в машиностроении, №4, 2020. – С.114-121.
7. Фокин В.Г. Трехмерное моделирование МКЭ нагрева внутреннего кольца подшипника при шлифовании дорожки качения / В.Г. Фокин, В.А. Дмитриев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.18, №4(2), 2016. – С.403-407.
8. Фокин В.Г. Моделирование МКЭ нагрева кольца роликового подшипника при шлифовании дорожки качения. / В.Г. Фокин, В.А. Дмитриев // Вестн. Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки, №4(40), 2014. – С. 126-131.
9. Rapatskiy Yu. Research of reliability and efficiency of technological processes

of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model // Yu. Rapatskiy, M. Zamorenov, V. Kopp, Yu. Obzherin, V. Gusev, V. Lipka // MATEC Web of Conferences 224, ICMTMTE 218, 01138 (2018), 2018. – P.1-8. DOI 10.1051/201822401138.

Bibliograficheskiy spisok

1. Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik / Pod red. A.N. Reznikova. – M: Mashinostroenie, 1977. – 391 s.
2. Sipajlov V.A. Teplovye processy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverhnosti / V.A. Sipajlov. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 166 s.
3. Li Y.Y. Modelirovanie processa shlifovaniya / Y.Y. Li, Y. Chen // Sovremennoe mashinostroenie, ser. B, №8. – S. 36-44.
4. Kirichek A.V. Rez'bonakatyvanie.: Biblioteka tekhnologa / A.V. Kirichek, A.N. Afonin. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 312 s.
5. Lipka V.M. Obespechenie kachestva naruzhnoj rez'by pri shlifovanii rez'bonakatnyh rolikov / V.M. Lipka, S.M. Bratan, YU.L. Rapackij // Vestnik sovremennyh tekhnologij, №4(16), 2019 – S. 59-65.
6. Kopp V.YA. Modelirovanie metodom konechnykh elementov teplovykh yavlenij pri shlifovanii odnonitochnym krugom rez'by na zagotovkah rez'bonakatnyh rolikov / V.YA. Kopp, V.V. Leont'ev, V.M. Lipka, YU.L. Rapackij // Avtomatizaciya i izmereniya v mashinostroenii, №4, 2020. – S.114-121.
7. Fokin V.G. Trekhmernoe modelirovanie MKE nagreva vnutrennego kol'ca podshipnika pri shlifovanii dorozhki kacheniya / V.G. Fokin, V.A. Dmitriev // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, t.18, №4(2), 2016. – S.403-407.
8. Fokin V.G. Modelirovanie MKE nagreva kol'ca rolikovogo podshipnika pri shlifovanii dorozhki kacheniya. / V.G. Fokin, V.A. Dmitriev // Vestn. Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitetata. Ser.: Tekhnicheskie nauki, №4(40), 2014. – S. 126-131.
9. Rapatskiy Yu. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model // Yu. Rapatskiy, M. Zamorenov, V. Kopp, Yu. Obzherin, V. Gusev, V. Lipka // MATEC Web of Conferences 224, ICMTMTE 218, 01138 (2018), 2018. – P.1-8. DOI 10.1051/201822401138.

*Липка Виктория Михайловна, старший преподаватель,
lipka.vita@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

Рапацкий Юрий Леонидович, к.т.н., доцент, директор Центра оценки

качества образования, заведующий кафедрой, u.l.rapatskiy@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

Копп Вадим Яковлевич, д.т.н., профессор, v_kopp@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

Карташов Леонид Евгеньевич, к.т.н., доцент, LEKartashov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

MODELING THE GRINDING PROCESS OF THE THREADED SURFACE ON THE HARDENED BILLET BY THE FINITE ELEMENT METHOD

V.M. Lipka, Yu.L. Rapatsky, V.Ya. Kopp, L.E. Kartashov

The quality of parts with an outer thread is largely determined by various manifestations of technological heredity in their manufacture. In particular, the external defects of the thread-car rollers are inherited to the outdoor threads with an external thread. To account for the effect of cooling on thermal processes during grinding of threads on threaded rollers, a finite-element model is proposed in the Comsol Multiphysics environment. The simulation results allow for generating source data for semi-market mathematical models describing technological heredity at the stages of the life cycle of products, and can also be used to select optimal grinding modes of threaded surfaces.

Keywords: technological heredity, threaded rollers, threaded, cooling, fiction.

Victoria Lypka, senior lecturer, lipka.vita@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Yuriy Rapatskiy, candidate of technical science, docent, Director of the Center for education quality assessment, chief of chair, u.l.rapatskiy@mail.ru Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Vadim Kopp, doctor of technical sciences, professor, v_kopp@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Leonid Kartashov, candidate of technical science, docent, LEKartashov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 621.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В АППАРАТАХ ЖИДКОСТНОГО ДЫХАНИЯ

Круговой А.Н.

Аннотация. В настоящее время принудительное жидкостное дыхание стало применяться в медицинских целях для восстановления легких у младенцев, больных, переболевших COVID-19. Изучается также вопрос использования жидкостного дыхания для спасения моряков с большой глубины. В Российской Федерации исследовательские работы ведутся, но серийно аппараты жидкостного дыхания не производятся. В данной работе предпринята попытка разработать автоматизированное устройство принудительного жидкостного дыхания, которое может использоваться в медицинских целях в условиях нормального давления и для спасательных целей в условиях высокого давления.

Ключевые слова. Двигатель постоянного тока, принудительное жидкостное дыхание, нормальное давление, высокое давление.

В работе [1] исследована возможность использования двигателей постоянного тока (ДПТ) в условиях высокого гидростатического давления. Такая возможность позволяет применять ДПТ в качестве привода насосов в аппаратах принудительного жидкостного дыхания.

Полная жидкостная вентиляция лёгких (жидкостное дыхание) заключается в полном заполнении лёгких жидкостью. Эксперименты по полной жидкостной вентиляции лёгких проводились на животных в 1970... 1980-е годы в СССР и США [2–4]. Например, в 1975 г. в институте сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева профессор Ф. Ф. Белоярцев впервые в стране выполнил работы по длительной внелёгочной оксигенации с использованием фторуглеродных оксигенаторов и по замене газовой среды в лёгких на жидкий перфторуглерод.

Пандемия коронавирусной инфекции в 2020 году акцентировала другой аспект применения технологии — лечение тяжелых патологий бронхолегочных заболеваний.

Иллюстратор жидкостного дыхания при нормобарии изображена на **Рис.1**. Жидкостное дыхание при нормобарии (когда окружающее давление равно атмосферному) осуществляется следующим образом: оксигенированная (насыщенная кислородом) дыхательная жидкость размещается в левом баке, а сливной бак в начале пуст. Аппарат жидкостного дыхания АЖД, внутри которого находится воздух под атмосферным давлением, выкачивает жидкость из бака и подает в легкие биологического объекта (БО). Таким образом происходит «Вдох».

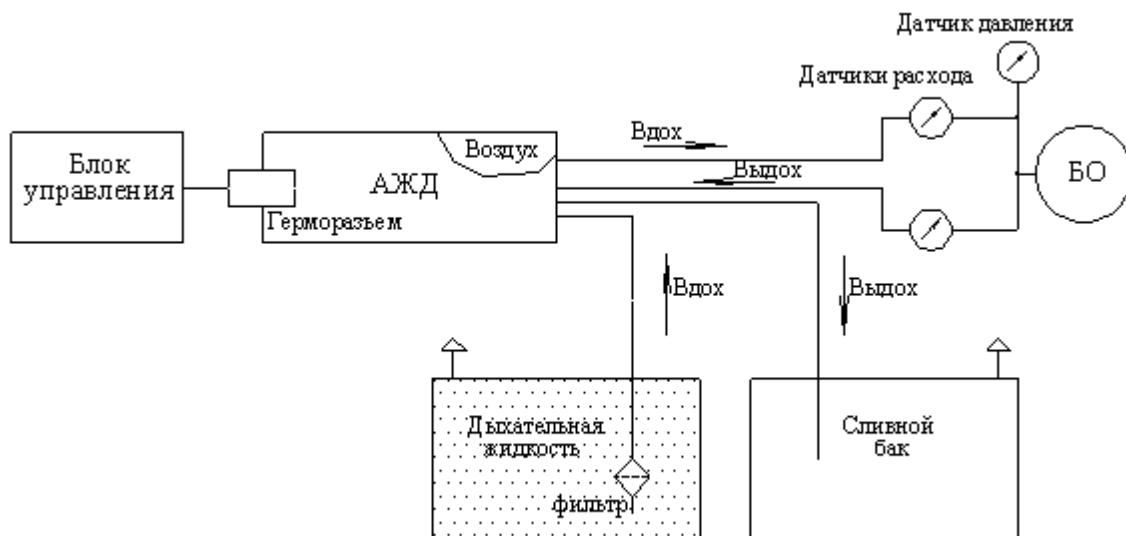


Рис.1 – Иллюстратор процесса принудительного жидкостного дыхания при нормобарии

Затем дыхательная жидкость выкачивается из легких и сливается в сливной бак – происходит «Выдох». Управление АЖД осуществляется от блока управления через герморазъем. Для контроля параметров жидкости используют два датчика расхода, один на входе, второй – на выходе, и датчик давления, который может показывать, как избыточное, так и пониженное давление. Для настройки аппарата предварительно может использоваться имитатор биологического объекта – упругая оболочка.

Разработанный АЖД может использоваться и при гипербарии, когда окружающее давление больше атмосферного. Для создания избыточного давления может использоваться специальный стенд с источником избыточного давления, либо устройство можно погружать на глубину. Иллюстратор жидкостного дыхания при гипербарии представлен на **Рис.2**.

При гипербарии вовнутрь АЖД заливается технологическая жидкость, например глицерин, а блок управления помещается в специальную герметичную капсулу, способную выдержать создаваемое избыточное давление. Для уравнивания давления в среде и внутри АЖД используется компенсатор давления, представляющий собой упругую оболочку, внутренняя полость которой соединена со средой погружения.

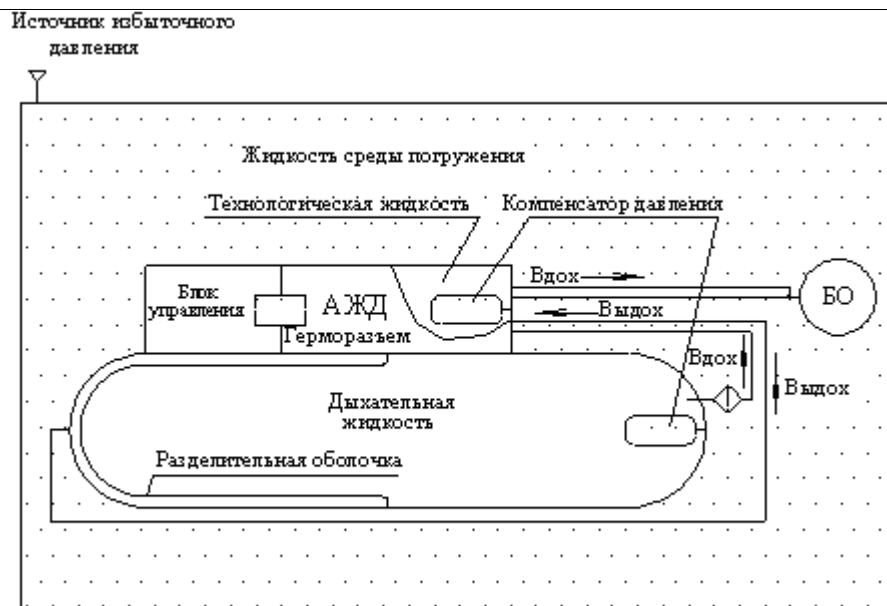


Рис.2 – Иллюстратор процесса принудительного жидкостного дыхания при гипербарии

Соединение блока управления и АЖД осуществляется через герморазъем специальной конструкции.

Дыхательная жидкость находится в баке, имеющем разделительную упругую оболочку. При полном баке, оксигенированная дыхательная жидкость заполняет весь объем, а разделительная оболочка находится в левом положении. Для уравнивания давления внутри бака и средой погружения используется аналогичный компенсатор давления. Дыхательная жидкость выкачивается из бака, подается в легкие биологического объекта, а затем сливается снова в бак, но уже с левой стороны от разделительной оболочки.

Использовать датчики расхода и давления не представляется возможным, так как не существует датчиков, способных работать при высоком внешнем давлении.

Таким образом, один и тот же аппарат жидкостного дыхания может использоваться и при нормобарии и при гипербарии.

Аппарат жидкостного дыхания (АЖД) предназначен для обеспечения принудительного жидкостного дыхания биологических объектов с массой тела до двадцати килограммов в спасательной капсуле в условиях нормо-, и гипербарии на испытательном стенде. Конструкция аппарата для принудительного жидкостного дыхания при нормобарии представлена на **Рис.3**, а для гипербарии – на **Рис.4**.

Устройство размещено в гильзе 6, расположенной между задней 8 и передней 9 крышками и соединенных шпильками 5. Внутри гильзы на основании 7 закреплены три микронасоса 15 с двигателями постоянного тока [5–7] (два на вдох, один – на выдох) и электромагнитный клапан 14. На задней крышке

установлен герморазъем 1. На передней крышке установлены компенсатор давления 2, четыре штуцера 17 для подключения гибких гидрошлангов, а также пробки, предназначенные для залива дыхательной жидкости.

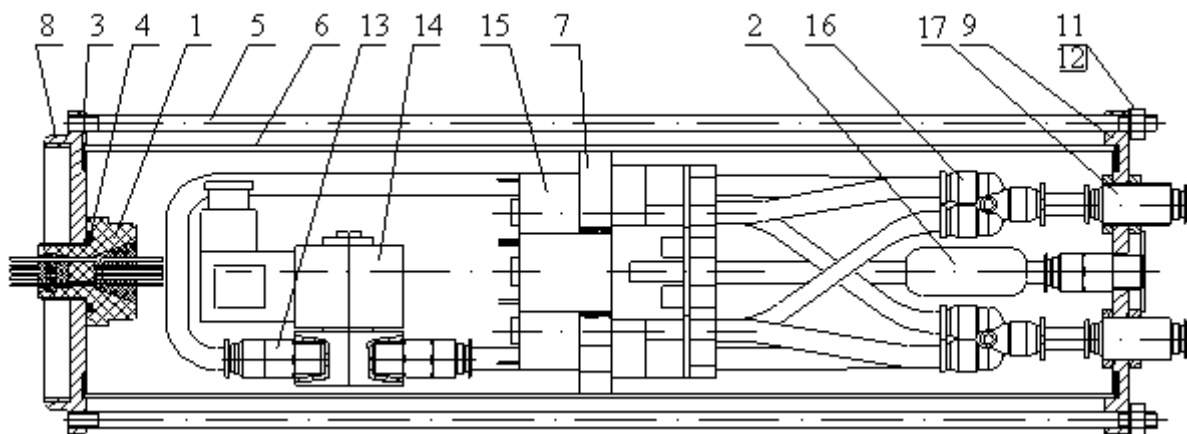


Рис.3 – Конструкция аппарата для принудительного жидкостного дыхания при нормобарии

В состав устройства аппарата для принудительного жидкостного дыхания при гипербарии входят: устройство 3 для жидкостного дыхания при нормобарии, к которому присоединен корпус 5, закрывающийся крышкой 8 с помощью накидной гайки 7. В этой крышке установлен герморазъем 1, предназначенный для заряда аккумуляторов, программирования системы управления и запуска устройства без снятия крышки.

В состав устройства входит также бак 4, внутри которого размещена гибкая разделительная мембрана 11. С левой стороны бака установлен штуцер для слива дыхательной жидкости. В крышке 10 бака размещены: штуцер для забора дыхательной жидкости и компенсатор давления 13.

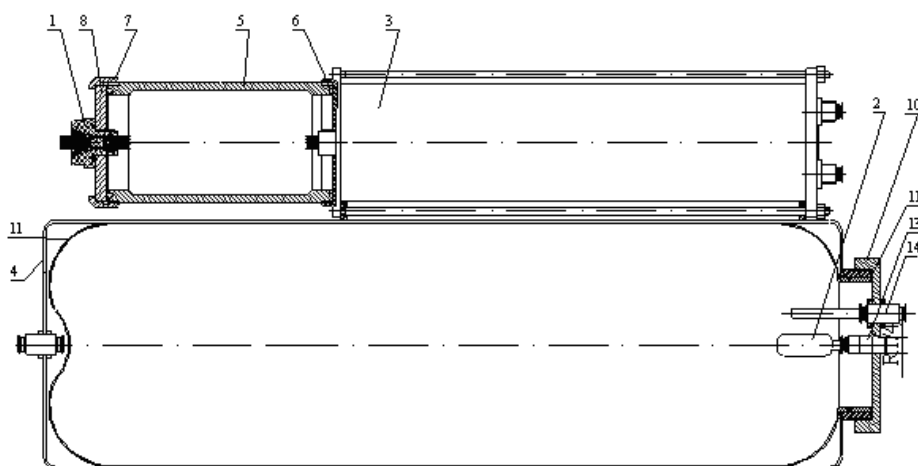


Рис.4 – Конструкция аппарата для принудительного жидкостного дыхания при гипербарии

Гидравлическая схема устройства принудительного жидкостного дыхания при нормобарии приведена на **Рис.5а**. В ее состав входят два микронасоса Н1 и Н2, обеспечивающие вдох, и насос Н3, обеспечивающий выдох. Все насосы приводятся в действие двигателями постоянного тока. Выходы насосов соединены между собой и подключены к имитатору легких ИЛ. В линиях связи установлены датчики расхода DR1 и DR2 и датчик давления DD1.

Входы насосов Н1 и Н2 через входной фильтр F2 забирают дыхательную жидкость из бака В2. Насос Н3 через распределитель Р3 сливает отработанную дыхательную жидкость в бак В1. Распределитель Р3 необходим для предотвращения перетекания дыхательной жидкости при вдохе, минуя ИЛ.

Гидравлическая схема устройства принудительного жидкостного дыхания при гипербарии приведена на **Рис.5б**. Схема аналогична предыдущей, однако в ней отсутствуют датчики, а микронасосы помещены в корпус, в котором установлен компенсатор давления.

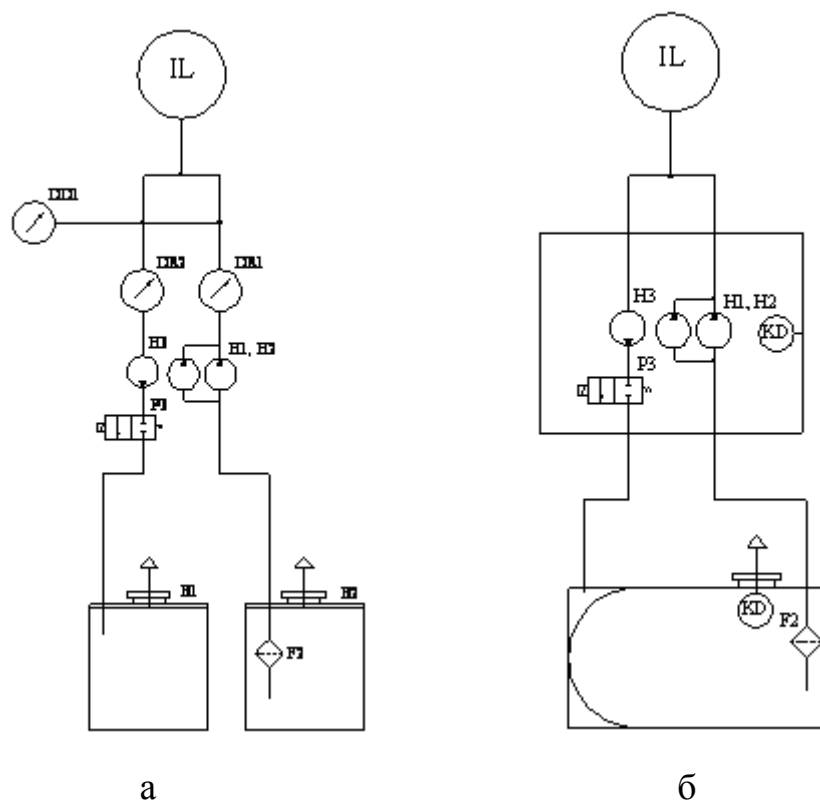


Рис.5 – Гидравлические схемы устройств принудительного жидкостного дыхания: а – при нормобарии, б – при гипербарии

Бак используется один, но внутри он разделен мембраной. Оксигенированная дыхательная жидкость забирается из бака с правой стороны, а сливается в левую сторону, при этом перемешивания жидкостей не происходит благодаря разделительной мембране.

В результате выполнения исследований изучены методы жидкостного дыхания. Разработаны автоматизированные устройства, обеспечивающие принудительное жидкостное дыхание при нормальном внешнем давлении (нормобарии) и в условиях повышенного внешнего давления (гипербарии).

Разработана конструкция автоматизированного устройства для обеспечения принудительного жидкостного дыхания при гипербарии. В будущем оно может использоваться при спасательных операциях по подъему биологических объектов с большой глубины (до 1500 м.)

В дальнейшем предполагается проводить исследования по использованию электропривода для аппаратов принудительного жидкостного дыхания, встроенных в спасательный костюм подводников.

Библиографический список

1. Круговой А.Н. Автоматизированное управление двигателями постоянного тока в условиях повышенного гидростатического давления / А.Н. Круговой // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении, №1(9), 2020. – С.3-9.
2. Белоярцев Ф.Ф. Оценка возможности и адекватности газообмена при вентиляции легких жидкими средами / Ф.Ф. Белоярцев, Х.Х. Хапий, В.С. Черников, Р.А. Мейтина, В.М. Курочкин // Анестезиология и реаниматология, №1, 1978. – С. 49–52.
3. Белоярцев Ф.Ф. Перфторированные углероды в биологии и медицине / Ф.Ф. Белоярцев. – 1980. – 182 с.
4. Авсаджанишвили В.Н. Особенности состояния здоровья у детей, страдающих заболеваниями органов дыхания / В.Н. Авсаджанишвили, В.В. Полунина // Вестник Росздравнадзора, №5, 2012. – С.37-40.
5. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов / Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН. 2003. – 320 с.
6. Справочник по электрическим машинам: в 2 т./ Под. общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Пашков Е.В. Автоматизация в промышленности: Практикум. В 4 ч. Ч. III. Автоматизированный электропривод и моделирование механотронных модулей движения / Е.В. Пашков, А.Н. Круговой, В.А. Крамарь, Л.Л. Беляева, В.В. Альчаков; под ред. Е.В. Пашкова. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 225 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Krugovoj A.N. Avtomatizirovannoe upravlenie dvigatelyami postoyannogo toka v usloviyah povyshennogo gidrostaticheskogo davleniya / A.N. Krugovoj // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii, №1(9), 2020. – S.3-9.
2. Beloyarcev F.F. Ocenka vozmozhnosti i adekvatnosti gazoobmena pri ventilyacii legkih zhidkimi sredami / F.F. Beloyarcev, H.H. Napij, V.S. CHernikov, R.A.

-
- Mejtina, V.M. Kurochkin // Anesteziologiya i reanimatologiya, №1, 1978. – S. 49–52.
3. Beloyarcev F.F. Perftorirovannye uglerody v biologii i medicine / F.F. Beloyarcev. – 1980. – 182 s..
4. Avsadzhanishvili V.N. Osobennosti sostoyaniya zdorov'ya u detej, stradayushchih zabolevaniyami organov dyhaniya / V.N. Avsadzhanishvili, V.V. Polunina // Vestnik Roszdravnadzora, №5, 2012. – S.37-40.
5. Onishchenko G.B. Elektricheskij privod. Uchebnik dlya vuzov / G.B. Onishchenko. – M.: RASKHN. 2003. –320 s.
6. Spravochnik po elektricheskim mashinam: v 2 t./ Pod. obshch. red. I.P. Kopylova, B.K. Klokova. – M.: Energoatomizdat, 1988.
7. Pashkov E.V. Avtomatizaciya v promyshlennosti: Praktikum. V 4 ch. CH. III. Avtomatizirovannyj elektroprivod i modelirovanie mekhanotronnyh modulej dvizheniya / E.V. Pashkov, A.N. Krugovoj, V.A. Kramar', L.L. Belyaeva, V.V. Al'chakov; pod red. E.V. Pashkova. – Sevastopol': SevNTU, 2011. – 225 s.

Круговой Александр Николаевич, к.т.н., доцент, atpp_krugovoi@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

USE OF ENGINES OF A CONSTANT CURRENT IN DEVICES OF LIQUID BREATH

A.N. Krugovoy

Now compulsory liquid breath began to be applied in the medical purposes to restoration easy at the babies, patients who have had been ill COVID-19. The question of use of liquid breath for rescue of the seamen from the large depth is studied also. In Russian Federation the research works are conducted, but serially devices of liquid breath are not made. In the given work the attempt is undertaken to develop the automated device of compulsory liquid breath, which can be used in the medical purposes in conditions of normal pressure and for the saving purposes in conditions of high pressure.

Key words: the engine of a constant current, compulsory liquid breath, normal pressure, high pressure.

Krugovoy Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, atpp_krugovoi@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №3(15) 2021 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные
приборы и системы

05.02.00 Машиностроение и машиноведение

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.

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.

№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 16.11.2021. Заказ 017К. Дата выхода в свет: 22.11.2021. Тираж: 50 экз.

Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 11.04.

Севастополь, 2021