

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№4(8)
2019

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

Выходит 4 раза в год

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО- ПРИБОРОСТРОЕНИИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Брянск 2019 г.

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

Осипов К.Н., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Пашков Е.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Краснодубец Л.А., д.т.н.,

проф.

(г. Севастополь)

Скатков А.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Песчанский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Рзаев Р.Р., д.т.н., проф.

(г. Баку)

Прейс В.В., д.т.н., проф.

(г. Тула)

Кристалль М.Г., д.т.н., проф.

(г. Волгоград)

Дьяченко В.А., д.т.н., проф.

(г. Санкт-Петербург)

Волков А.Н., д.т.н., проф.

(г. Санкт-Петербург)

Доронина Ю.В., д.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Качур С.М., д.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Васютенко А.П., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Балакин А.И., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Круговой А.Н., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Скидан А.А., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н.

(г. Севастополь)

Майстришин М.М., к.т.н.

(г. Севастополь)

Учредитель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, Севастополь, ул. Университетская 33. № рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт.2018 г.

Издатель: 1. ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», 241035, Российская Федерация, г. Брянск, бул.50 лет Октября, 7;

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

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Авторы статей

СОДЕРЖАНИЕ

В номере отпечатаны материалы международной научно-технической конференции «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения» АППР-2019

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

- Вартанов М.В., Чанг Та, Чун** Обеспечение технологической надежности роботизированной сборки на основе эффекта вращения выходного звена работа 3
- Осипов К.Н.** К вопросу оценки телеметрии в задачах автоматизированного мониторинга крупномасштабных объектов и систем 19
- Осадченко А.Е.** Автоматизированная система управления многокоординатной платформой на основе микроконтроллера 26
- Круговой А.Н.** Автоматизация операций холодной штамповки с применением электромеханических модулей линейного типа 33
- Бохонский А.И., Майстришин М.М., Рыжков А.И.** Моделирование оптимального переносного вращательного движения упругой системы 40
- Альчаков В.В., Крамарь В.А., Крамарь О.А.** Терминальный подход к построению управления антропоморфным манипулятором 49
- Васютенко А.П.** Пневматический прибор на базе терморезистивного расходомера 57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Заморёнов М.В., Копп В.Я., Заморёнова Д.В., Владимирова Е.С.** Имитационная модель структуры «накопитель – технологическая ячейка – накопитель» 64
- Балакин А.И., Копп В.Я., Балакина Н.А.** Имитационное моделирование автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание с исправлением брака на специальных технологических ячейках 72
- Волошина Н.А., Васютенко А.П.** Исследование статических характеристик плоских эжекторных преобразователей с двумя выносными соплами 81
- Филипович О.В.** Имитационная модель двухпараметрической селективной сборки с учетом погрешностей измерения параметров 89

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Филипович О.В., Еременко Н.С., Кошечая Д.О.** Исследование особенностей конструкций гибких сочленений эндоскопов 95

УДК 621.757–52

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА
ВРАЩЕНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА РОБОТА**

Вартанов М.В.¹, Чанг Та, Чун²

***Аннотация.** Обеспечение безотказности является одним из основных требований при выполнении сборочных операций. Наиболее часто для удовлетворения этого требования применяют адаптивные головки или схваты, которые рассматриваются с позиции расширения диапазонов размеров и конфигураций собираемых деталей. Однако, принимая во внимание известные недостатки предлагаемых адаптивных методов, в данной работе предлагается новый метод обеспечения заданной надежности сборочных операций, который основан на использовании свойств низкочастотных колебаний.*

***Ключевые слова.** Роботизированные системы, сила-моментный датчик, вибрация.*

В современном производстве задачи обеспечения надежности сборочных операций, в результате которых формируются заданные параметры изделий, являются очень актуальными и своевременными, особенно в условиях интенсивного развития методов роботизированной сборки [1-3].

Анализ современной научной и технической литературы, а также накопленный производственный опыт позволяет сделать вывод о том, что в подавляющем большинстве случаев в современном роботизированном производстве задачи обеспечения надежности сборочных операций решаются путем использования пассивных адаптивных систем, например, построенных на базе динамических моделей [1-3, 4, 5], используемых для управления плоскопараллельным движением собираемых деталей. К сожалению, при малых зазорах в сопряжениях использование подходов с пассивной адаптацией на основе существующих динамических моделей, часто, вызывает возникновение значительных по величине сил трения скольжения в местах контактов деталей, вызывая в итоге заклинивание собираемых деталей и срыв процесса сборки. Альтернативные подходы, связанные с использованием методов сканирования движений деталей по различным траекториям также не позволяет обеспечить требуемую надежность сборочных операций, т.к. при сканировании решается задача совмещения контуров деталей и не рассматривается непосредственно сборочный процесс.

Построена динамическая модель процесса сборки цилиндрического соединения с применением промышленного робота типа ABB IRB-140 и виброопоры. Схват робота может совершать в процессе сопряжения деталей вращательное движение вокруг своей вертикальной оси, совпадающей с осью вращения выходного звена робота. Виброопора имеет возможность колебаний относительно взаимно перпендикулярных горизонтальных осей и вращения вокруг вертикальной оси (**Рис.1**).

Будем считать, что вибрационные колебания опоры 2 вокруг взаимно перпендикулярных осей Oy_1 , $O\xi$ происходят соответственно по следующим законам:

где A – амплитуда колебаний; k – круговая частота.

The diagram illustrates a mechanical system. A horizontal plate, labeled 1, is supported by two vertical columns. The plate is tilted at an angle φ relative to the horizontal. A coordinate system (x_1, y_1) is shown on the plate, with x_1 along the tilt and y_1 perpendicular to it. A vertical axis z passes through the center of the plate. A ring, labeled 3, is suspended from the vertical axis at a height h above the plate. The ring has an inner radius ξ and an outer radius ζ . A coordinate system (ξ, ζ) is shown for the ring. The plate is labeled 0. The vertical axis is labeled z . The horizontal axis is labeled y_1 . The angle of tilt is labeled φ . The height of the ring is labeled h . The inner radius is labeled ξ and the outer radius is labeled ζ .

4

Цилиндрический вал базируется в схвате робота и имеет возможность перемещения вертикально вниз, а также вращения вокруг собственной вертикальной оси с выходным звеном робота. При этом система координат ($CX_2Y_2Z_2$) связанная с валом, в текущий момент времени t занимает относительно неподвижной системы координат $OXYZ$ положение, определяемое углом θ , вычисляемым по формуле:

$$\theta = \omega t \quad (2)$$

Рабочими движениями манипулятора робота на этапе сопряжения деталей является поступательное перемещение схвата вертикально вниз в заданное положение, а также его вращения относительно вертикальной оси.

Рассмотрим случай первоначального контакта детали с плоскостью вибрационного диска в одной точке (**Рис.2**). При этом предполагаем, что угол перекоса осей сопрягаемых деталей настолько мал, что им можно пренебречь.

Система координат $C_2X_2Y_2Z_2$ жестко связана с валом. Начало координат системы $C_2X_2Y_2Z_2$ совпадает с центром масс вала.

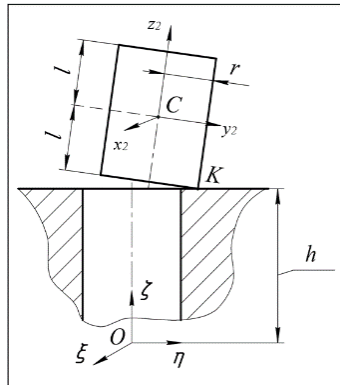


Рис.2 – Кинематическая схема первоначального контакта вала с вибрирующим диском: $2l$ – высота устанавливаемой детали

На основании теоремы о движении центра масс системы для абсолютного движения цилиндрической детали при наличии ее контакта с поверхностью ориентирующего диска получим:

$$m\vec{a}_C = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{TP} + \vec{P} \quad (3)$$

где: m – масса цилиндрической детали; $\vec{a}_C$ – абсолютное ускорение центра масс цилиндрической детали; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения; $\vec{N}$ – нормальная реакция плоскости вибрационного диска; $\vec{F}_{TP}$ – сила трения скольжения; $\vec{P}$ – сборочное усилие, развиваемое приводом робота.

Дифференциальное уравнение относительного движения центра масс детали (по отношению ко втулке) в векторной форме имеет вид:

$$m\vec{a}_{cr} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{TP} + \vec{F}_{ce}^{un} + \vec{F}_{ck}^{un} + \vec{P} \quad (4)$$

где $\vec{F}_{ce}^{un}$ – переносная сила инерции центра масс детали; $\vec{F}_{ck}^{un}$ – кориолисова сила инерции центра масс детали.

Дифференциальное уравнение (4) представим в проекциях на оси подвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$, жёстко связанной с втулкой:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c &= (m\bar{g})_\xi + F_{TP\xi} + F_{ce\xi}^{un} + F_{ck\xi}^{un} + P_\xi, \\ m\ddot{\eta}_c &= (m\bar{g})_\eta + F_{TP\eta} + F_{ce\eta}^{un} + F_{ck\eta}^{un} + P_\eta, \\ m\ddot{\zeta}_c &= (m\bar{g})_\zeta + F_{ce\zeta}^{un} + F_{ck\zeta}^{un} + N + P_\zeta. \end{aligned} \quad (5)$$

где ξ_c, η_c, ζ_c – координаты центра масс детали (точка С) в системе координат $O\xi\eta\zeta$.

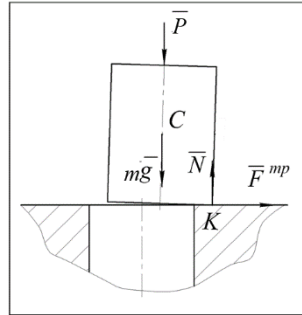


Рис.3 – Расчетная схема сил при одноточечном контакте с поверхностью вибрационного диска

Для определения проекций сил на подвижные оси координат $O\xi\eta\zeta$ применяем аппарат матриц преобразования однородных координат [9]. Для этого необходимо, прежде всего, построить ряд матриц размером 4×4 , определяющих положение одной системы координат по отношению к некоторой другой системе координат.

Для определения проекций силы трения $\vec{F}_{mp}$ на оси системы координат $O\xi\eta\zeta$ необходимо найти скорость точки касания цилиндрической детали с плоскостью втулки по отношению к системе координат $O\xi\eta\zeta$. Это объясняется тем, что сила трения направлена противоположно скорости точки «K». С этой целью найдем уравнения движения точки касания в декартовых координатах.

Как следует из кинематической расчетной схемы устройства, характер абсолютного движения вибрационного диска представляет собой сложение вибраций вокруг двух пересекающихся в одной точке «0» осей. При этом вектор абсолютной угловой скорости диска определится по формуле:

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_\psi + \vec{\omega}_\phi, \quad (6)$$

где $\vec{\omega}_\psi = \dot{\psi} \vec{j}_1$ ($\vec{j}_1$ – орт оси Oy_2), $\vec{\omega}_\phi = \dot{\phi} \vec{i}_2$ ($\vec{i}_2$ – орт оси $O\xi$).

Математическая модель динамики относительного движения центра масс устанавливаемой детали при наличии одноточечного контакта с плоскостью вибрационного диска может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned}
m\ddot{\xi}_c &= p \sin \psi - fN \frac{\dot{\xi}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2 + \dot{\eta}_k^2}} + m(\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\psi} \sin \phi - 2\eta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \cos \phi \\
&\quad - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \sin \phi - \zeta_c \ddot{\psi} \cos \phi + 2\zeta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \sin \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \cos \phi \cos \psi \\
&\quad + \xi_c \omega^2 \cos^2 \phi + \eta_c \omega^2 \sin \psi \sin \phi \cos \psi + \zeta_c \omega^2 \sin \psi \cos \phi \cos \psi) \\
&\quad - 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} \cos \phi + \omega \cos \psi \sin \phi) + 2m\dot{\eta}_c (-\dot{\psi} \sin \phi + \omega \cos \psi \cos \phi); \\
m\ddot{\eta}_c &= -p \cos \psi \sin \phi - fN \frac{\dot{\eta}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2 + \dot{\eta}_k^2}} + m(\xi_c \ddot{\psi} \sin \phi + \eta_c \dot{\psi}^2 \sin^2 \phi \\
&\quad + \eta_c \dot{\phi}^2 - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \sin \psi + \zeta_c \dot{\psi}^2 \cos \phi \sin \phi \\
&\quad + \xi_c \omega^2 \sin \psi \cos \psi \sin \phi + \zeta_c \ddot{\phi} + \eta_c \omega^2 \sin^2 \phi \sin^2 \psi \\
&\quad + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin \phi \cos \phi + 2\xi_c \omega \dot{\psi} \sin \psi \cos \phi \\
&\quad - 2\eta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin \phi \cos \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \cos^2 \phi \\
&\quad + \eta_c \omega^2 \cos^2 \phi - \zeta_c \omega^2 \sin \phi \cos \phi) - 2m\dot{\xi}_c (-\dot{\psi} \sin \phi + \omega \cos \psi \cos \phi) \\
&\quad + 2m\dot{\zeta}_c (\dot{\phi} - \omega \sin \psi).
\end{aligned} \tag{7}$$

При этом нормальная реакция плоскости вибрационного диска N , примет вид:

$$\begin{aligned}
N &= m\ddot{\zeta}_c + -m(\xi_c \omega^2 \cos \psi \sin \psi \cos \phi + \\
&\quad + \eta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin \phi \cos \phi - \eta_c \omega^2 \sin \phi \cos \phi \\
&\quad + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \psi \cos^2 \phi + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \sin \psi \\
&\quad + \xi_c \ddot{\psi} \cos \phi + \eta_c \dot{\psi}^2 \sin \phi \cos \phi - \eta_c \ddot{\phi} + \zeta_c \dot{\psi}^2 \cos^2 \phi \\
&\quad + \zeta_c \dot{\phi}^2 - 2\xi_c \omega \dot{\psi} \sin \psi \sin \phi + 2\eta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin^2 \phi \\
&\quad + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin \phi \cos \phi) + 2m\dot{\eta}_c (\dot{\phi} - \omega \sin \psi) - \\
&\quad - 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} \cos \phi + \omega \cos \psi \sin \phi) + p \cos \psi \cos \phi.
\end{aligned} \tag{8}$$

Производные $\dot{\xi}_k$ и $\dot{\eta}_k$ определятся по формулам:

$$\begin{aligned}
 \dot{\xi}_k &= r\omega \cos \theta \cos \psi - r \sin \theta \sin \psi \cdot \dot{\psi} \\
 &\quad + l \cos \psi \cdot \dot{\psi} + \dot{\xi}_c; \\
 \dot{\eta}_k &= r(\omega \cos \theta \sin \psi \sin \phi + \sin \theta \cos \psi \cdot \dot{\psi} \sin \phi \\
 &\quad + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \cdot \dot{\phi} - \omega \sin \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \cdot \dot{\phi}) \\
 &\quad - l(-\sin \psi \cdot \dot{\psi} \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \cdot \dot{\phi}) + \dot{\eta}_c.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Координата ζ_c определяется соотношением вида:

$$\begin{aligned}
 \dot{\zeta}_c &= -r(\cos \theta \omega \sin \psi \cos \phi + \sin \theta \cos \psi \dot{\psi} \cos \phi \\
 &\quad - \sin \theta \sin \psi \sin \phi \cdot \dot{\phi} + \sin \theta \cdot \omega \sin \phi - \cos \theta \cos \phi \cdot \dot{\phi}) \\
 &\quad - l(\sin \psi \cdot \dot{\psi} \cos \phi + \cos \psi \sin \phi \cdot \dot{\phi}).
 \end{aligned} \tag{10}$$

В момент отрыва цилиндрической детали от плоскости вибрационного диска нормальная реакция N и сила трения $F_{тр}$ равны нулю. Следовательно, момент отрыва $t = t_{om}$ устанавливаемой детали от плоскости вибрационного диска определяется на основании условия обнуления нормальной реакции N .

Таким образом, дифференциальные уравнения относительного движения центра масс детали при отсутствии ее контакта с плоскостью вибрационного диска могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\xi}_c &= F_{ce\xi}^{un} + F_{ck\xi}^{un} + P_{\xi}, \\
 m\ddot{\eta}_c &= F_{ce\eta}^{un} + F_{ck\eta}^{un} + P_{\eta}, \\
 m\ddot{\zeta}_c &= F_{ce\zeta}^{un} + F_{ck\zeta}^{un} + P_{\zeta}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

В результате получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
m\ddot{\xi}_c = m & \left[\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\psi} \sin \phi - 2\eta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \cos \phi - \right. \\
& - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \sin \phi - \zeta_c \ddot{\psi} \cos \phi + 2\zeta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \sin \phi \\
& - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \cos \phi \cos \psi + \xi_c \omega^2 \cos^2 \psi \\
& + \eta_c \omega^2 \sin \psi \sin \phi \cos \psi \\
& + \zeta_c \omega^2 \sin \psi \cos \phi \cos \psi \left. \right] \\
& - 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} \cos \phi + \omega \cos \psi \sin \phi) \\
& + 2m\dot{\eta}_c (-\dot{\psi} \sin \phi + \omega \cos \psi \cos \phi) + p \sin \psi; \\
m\ddot{\eta}_c = m & \left[\xi_c \ddot{\psi} \sin \phi + \eta_c \dot{\psi}^2 \sin^2 \phi + \eta_c \dot{\phi}^2 - \right. \\
& - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \sin \psi + \zeta_c \dot{\psi}^2 \cos \phi \sin \phi \\
& + \zeta_c \omega^2 \sin \psi \cos \psi \sin \phi + \zeta_c \ddot{\phi} + \eta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin^2 \phi \\
& + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin \phi \cos \phi + 2\xi_c \omega \dot{\psi} \sin \psi \cos \phi - \\
& - 2\eta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin \phi \cos \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \cos^2 \phi) \\
& + \eta_c \omega^2 \cos^2 \phi - \zeta_c \omega^2 \sin^2 \phi \cos \phi \left. \right] \\
& - 2m\dot{\xi}_c (-\dot{\psi} \sin \phi + \omega \cos \psi \cos \phi) \\
& + 2m\dot{\zeta}_c (\dot{\phi} - \omega \sin \psi) - p \cos \psi \sin \phi;
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
m\ddot{\zeta}_c = m & \left[\xi_c \omega^2 \cos \psi \sin \psi \cos \phi + \eta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin \phi \cos \phi - \right. \\
& - \eta_c \omega^2 \sin \phi \cos \phi + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \psi \cos^2 \phi \\
& + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \sin \psi + \xi_c \ddot{\psi} \cos \phi \\
& + \eta_c \dot{\psi}^2 \sin \phi \cos \phi - \eta_c \ddot{\phi} + \zeta_c \dot{\psi}^2 \cos^2 \phi \\
& + \zeta_c \dot{\phi}^2 - 2\xi_c \omega \dot{\psi} \sin \psi \sin \phi + 2\eta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin^2 \phi \\
& + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin \phi \cos \phi \left. \right] - 2m\dot{\eta}_c (\dot{\phi} - \omega \sin \psi) \\
& + 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} \cos \phi + \omega \cos \psi \sin \phi) - p \cos \psi \cos \phi.
\end{aligned} \tag{13}$$

Начальными условиями для интегрирования системы дифференциальных уравнений (12) будут значения трех координат центра масс детали (

$\xi_{co}, \eta_{co}, \zeta_{co}$), найденных в момент отрыва детали от плоскости вибрационного диска (то есть при $t = t_{om}$) при решении системы дифференциальных уравнений (12), а также значения проекций относительной скорости центра масс на оси системы координат (то есть $\dot{\xi}_{co}, \dot{\eta}_{co}, \dot{\zeta}_{co}$), найденных в тот же момент времени. Момент времени ($t = t_k$), когда деталь снова коснется плоскости вибрационного диска, определится формуле:

$$\begin{aligned} \zeta_c = h - r(\sin \theta \sin \psi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi) \\ + l \cos \psi \cos \phi \quad \text{при } t = t_k \end{aligned} \quad (14)$$

При дальнейшем интегрировании системы дифференциальных уравнений (7) будем предполагать, что при возникновении контакта детали со втулкой удар был абсолютно неупругим.

Приближенная математическая модель динамики движения центра масс устанавливаемой детали по отношению к неинерциальной системе координат, жестко связанной с базовой деталью имеет вид:

Вибрационные колебания происходят с малыми по величине амплитудами, то есть углы ψ и ϕ , определяемые по формулам (1) являются малыми. Таким образом, можно приближенно считать:

$$\begin{aligned} \sin \psi \approx \psi, \quad \sin \phi \approx \phi, \\ \cos \psi = 1, \quad \cos \phi = 1. \end{aligned} \quad (15)$$

В результате дифференциальные уравнения движения центра масс цилиндрической детали при наличии ее контакта с плоскостью вибрационного диска (7) на основе (15) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c = p \cdot \psi - fN \frac{\dot{\xi}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2 + \dot{\eta}_k^2}} + m(\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\psi} \cdot \phi - 2\eta_c \dot{\phi} \dot{\psi} - \\ - 2\dot{\eta}_c \omega \dot{\phi} \phi - \zeta_c \ddot{\psi} + 2\zeta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} + \xi_c \omega^2 + \\ + \zeta_c \omega^2 \psi) - 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} + \omega \phi) + 2m\dot{\eta}_c (-\dot{\psi} \phi + \omega); \\ m\ddot{\eta}_c = -p\psi - fN \frac{\dot{\eta}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2 + \dot{\eta}_k^2}} + m(\xi_c \ddot{\psi} \phi + \\ + \eta_c \dot{\phi}^2 - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \psi + \zeta_c \dot{\psi}^2 \phi + \xi_c \ddot{\phi} + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \psi - \\ - 2\eta_c \omega \dot{\psi} \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\psi} + \eta_c \omega^2 \\ - \zeta_c \omega^2 \phi) - 2m\dot{\xi}_c (-\dot{\psi} \phi + \omega) + 2m\dot{\zeta}_c (\dot{\phi} - \omega \psi). \end{aligned} \quad (16)$$

При этом нормальная реакция плоскости вибрационного диска N , определяемая выражением (8) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
N = & m\ddot{\zeta}_c - m(\xi_c \omega^2 \psi - \eta_c \omega^2 \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \cdot \phi + \xi_c \ddot{\psi} \\
& + \eta_c \ddot{\psi}^2 \phi - \eta_c \ddot{\phi} + \zeta_c \ddot{\psi}^2 + \zeta_c \dot{\phi}^2 \\
& + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \phi + 2m\dot{\eta}_c(\dot{\phi} - \omega \psi) - 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi} + \omega \phi) + P.
\end{aligned} \quad (17)$$

Производные по времени $\dot{\xi}_k$ и $\dot{\eta}_k$ (9) при этом определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
\dot{\xi}_k &= r\omega \cos \theta - r \sin \theta \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\psi} + l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c \\
\dot{\eta}_k &= r(\sin \theta \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} + \sin \theta \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} - \omega \sin \theta \\
&\quad - \cos \theta \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\phi}) - l\dot{\phi} + \dot{\eta}_c.
\end{aligned} \quad (18)$$

Функция ζ_c и ее первая и вторая производные по времени $\dot{\zeta}_c$ и $\ddot{\zeta}_c$ имеют вид:

$$\zeta_c = h - r(\sin \theta \cdot \psi - \cos \theta \cdot \phi) + l(\cos \psi \sin \phi), \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
\dot{\zeta}_c &= -r(\cos \theta \cdot \omega \cdot \psi + \sin \theta \cdot \dot{\psi} + \sin \theta \cdot \omega \cdot \phi - \cos \theta \cdot \dot{\phi}) \\
&\quad - l(\dot{\psi} \psi + \dot{\phi} \phi),
\end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\zeta}_c &= -r(-\omega^2 \psi \sin \theta + 2\omega \dot{\psi} \cos \theta - \sin \theta \cdot \psi(\dot{\psi}^2 + \dot{\phi}^2) \\
&\quad - 2\dot{\psi} \dot{\phi} \sin \theta \cdot \phi + 2\omega \dot{\phi} \sin \theta + \sin \theta \cdot \ddot{\psi} \\
&\quad + (\omega^2 + \dot{\phi}^2) \cos \theta \cdot \phi - \cos \theta \cdot \ddot{\phi}) \\
&\quad - l(\dot{\psi}^2 + \dot{\phi}^2 + \ddot{\psi} \psi + \ddot{\phi} \phi).
\end{aligned} \quad (21)$$

Приближенные выражения, определяющие закон движения точки контакта цилиндрической детали с плоскостью вибрационного диска имеют вид:

$$\begin{cases} \xi_k = r \sin \theta + l\psi + \xi_c, \\ \eta_k = r \cos \theta - l\phi + \eta_c. \end{cases} \quad (22)$$

Приближенные дифференциальные уравнения движения центра масс цилиндрической детали после ее отрыва от плоскости ориентирующего диска получены на основе (12) с учетом (15):

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\xi}_c &= m \left[\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\psi} \cdot \phi - 2\eta_c \dot{\phi} \dot{\psi} - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \phi - \zeta_c \ddot{\psi} \right. \\
 &\quad \left. + 2\zeta_c \dot{\phi} \dot{\psi} \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} + \xi_c \omega^2 + \zeta_c \omega^2 \psi \right] \\
 &\quad - 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} + \omega \phi) + 2m\dot{\eta}_c (-\dot{\psi} \phi + \omega) + P\psi; \\
 m\ddot{\eta}_c &= m \left[\xi_c \ddot{\psi} \phi + \eta_c \dot{\phi}^2 - 2\eta_c \omega \dot{\phi} \psi + \zeta_c \dot{\psi}^2 \phi + \zeta_c \ddot{\phi} \right. \\
 &\quad \left. + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \psi - 2\eta_c \omega \dot{\psi} \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\psi} + \eta_c \omega^2 \right] \\
 &\quad - 2m\dot{\xi}_c (-\dot{\psi} \phi + \omega) + 2m\dot{\zeta}_c (\dot{\phi} - \omega \psi) - P\phi; \\
 m\ddot{\zeta}_c &= m \left[\xi_c \omega^2 \psi - \eta_c \omega^2 \phi - 2\zeta_c \omega \dot{\phi} \psi + \xi_c \ddot{\psi} + \eta_c \dot{\psi}^2 \phi - \right. \\
 &\quad \left. - \eta_c \ddot{\phi} + \zeta_c \psi^2 + \zeta_c \dot{\phi}^2 + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \phi \right] \\
 &\quad - 2m\dot{\eta}_c (\dot{\phi} - \omega \psi) + 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} + \omega \phi) - P.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Следует отметить, что приближенные соотношения (16) ÷ (23) получены с точностью до величины первого порядка малости относительно углов ψ и ϕ .

Уравнения, определяющие закон движения точки контакта по плоскости вибрационного диска могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} \xi_k &= r \sin \theta + \xi_c + l A \sin kt \\ \eta_k &= r \cos \theta + \eta_c - l A \cos kt \end{aligned} \right\}. \tag{24}$$

Исключая из (23) параметр t , получим уравнение траектории точки контакта собираемых деталей относительно плоскости вибрационного диска.

$$\left[\xi_k - (\xi_c + r \sin \theta) \right]^2 + \left[\eta_k - (\eta_c + r \cos \theta) \right]^2 = A^2 \cdot l^2 \tag{25}$$

Как следует из (24), траекторией точки контакта (точки «К») по плоскости вибрационного диска будет окружность с центром в точке, имеющей координаты $(\xi_c + r \sin \theta, \eta_c + r \cos \theta)$. При этом радиус этой окружности:

$$R = A \cdot l \tag{26}$$

Так как координаты центра масс детали ξ_c , η_c и угол θ непрерывно меняются, то непрерывно будет изменяться положение центра окружности, описываемой точкой контакта «К».

В силу того, что амплитуда вибрационных колебаний «А» является малой величиной то радиус этой окружности, определяемый по (26), тоже будет малой величиной.

Для проверки адекватности разработанной математической модели была разработана экспериментальная установка.

Общий вид ее представлен на **Рис.3**. Между схватом 2 и торцом выходного звена промышленного робота установлен силомоментный датчик

Schunk FT AXIA. На специальном постаменте установлена виброопора 5, описанная в работах [10] и [11], которая в центре вибрационного диска имеет жестко закрепленную базовую втулку 4.

Методика проведения эксперимента такова. Устанавливаемый вал удерживается схватом робота. Втулка установлена в центре диска виброопоры. Вибрации опоры обеспечиваются генератором низкочастотных колебаний 9. Частота колебаний контролируется электронным частотомером, а фактическая амплитуда колебаний виброопоры отслеживается бесконтактными лазерными датчиками 3. Все сигналы собираются и обрабатываются компьютером. Таким образом, в процессе экспериментов обеспечен непрерывный контроль текущих значений технологических параметров.

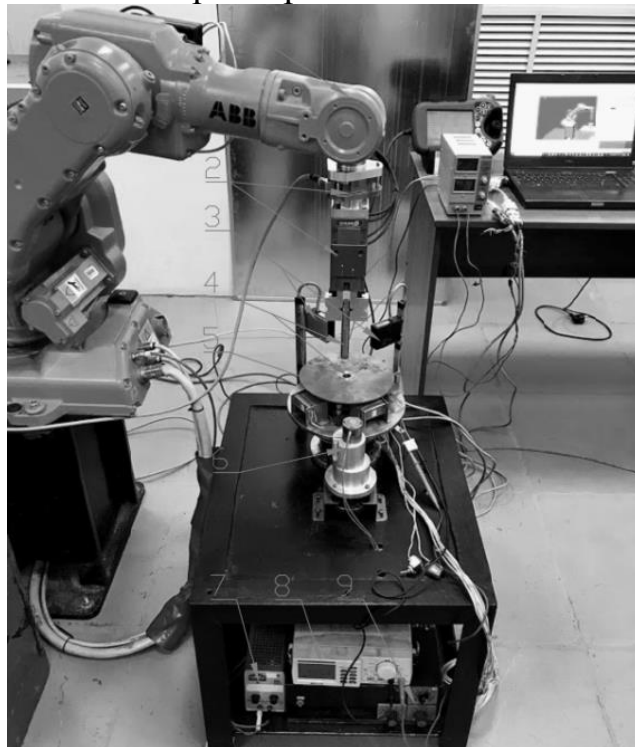


Рис.3 – Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки при наличии вибраций и вращения схвата (либо опоры): 1. Промышленный робот ABB IRB 140; 2. Схват с силомоментным датчиком Schunk FT AXIA; 3. Триангуляционные лазерные датчики Riftek RF603.2 4. Экспериментальные образцы; 5. Виброопора 6. Электродвигатель постоянного тока. 7. Управляемый преобразователь (частотно - регулируемый двигатель). 8. Электронный частотомер (цифровой мультиметр Mastech M 9803R). 9. Генератор низкочастотных колебаний

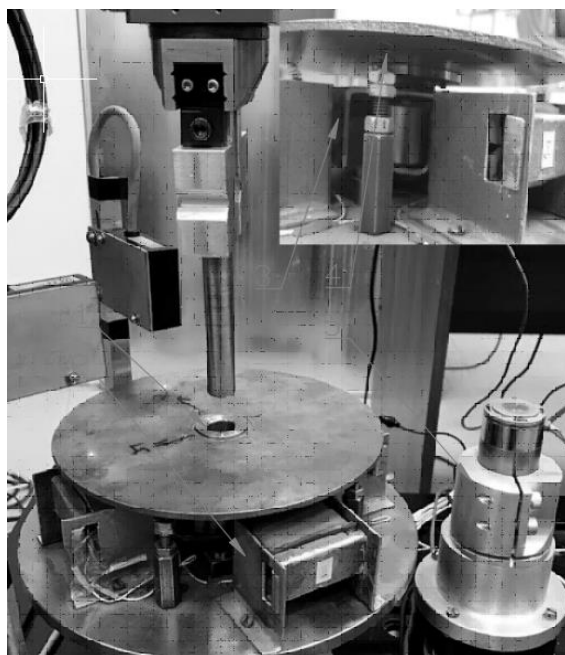


Рис.4 – Конструкция виброопоры: 1 – базовая втулка, 2 – электромагнит, 3 – постоянный магнит, 4 – пружина сжатия, 5 – электродвигатель

Физические эксперименты проводились на созданной экспериментальной установке. На **Рис.5** показано изменение сил в точках контакта, когда собираемые цилиндрические детали собраны с зазором $0,03 \text{ мм}$ при угловой скорости вращения схвата $\omega = 0,3 \text{ об/сек}$. Смещение z вала относительно втулки измерялось вдоль вертикальной оси. Манипулятор перемещал собираемую деталь с шагом $0,5 \text{ мм}$. Чтобы пройти все 46 точек нижний конец вала должен быть смещен на 23 мм относительно верхнего торца втулки. При этом операция сборки считалась завершенной. Эксперимент показал, что увеличение сил в зоне сборки до 25 Н не приводило к заклиниванию. На **Рис.5б** показано изменение сил в зоне сборки, когда собирались те же цилиндрические детали без вращения. В экспериментах найдены условия возникновения заклинивания. При этом сила F_z резко возрастала и в точке 8 происходила остановка перемещения манипулятора.

Зависимости изменения компонентов силы позволили обнаруживать заклинивание и могут использоваться при создании алгоритмов для коррекции положения манипулятора, чтобы избежать заклинивания. Разработка таких алгоритмов выходит за рамки настоящей работы. Созданная экспериментальная установка будет в дальнейшем использоваться нахождению технологических условий, гарантирующих сборку без заклиниваний.

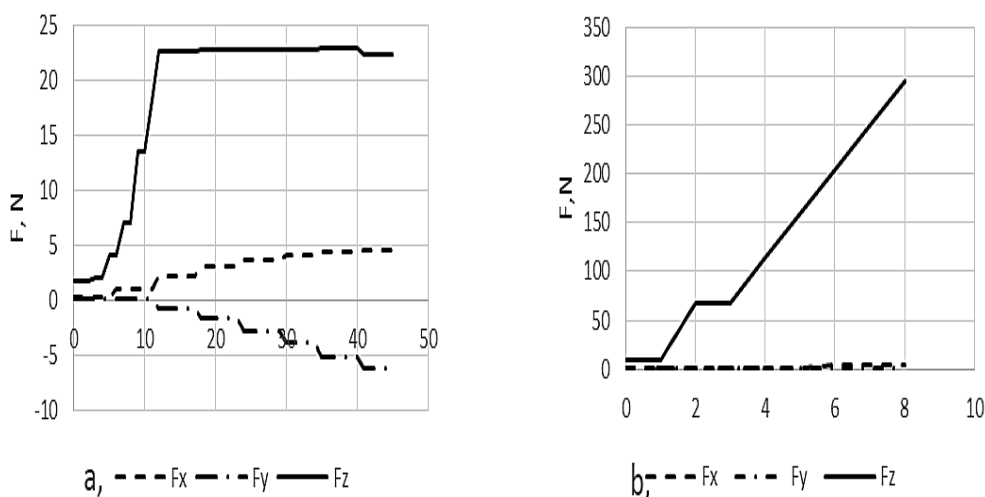


Рис.5 – Изменение компонентов силы сопряжения при наличии вращения схвата (слева) и без вращения схвата (справа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные математические модели, дающие возможность решать, как прямую, так и обратную задачу динамики в условиях роботизированной сборки с использованием эффекта вращательного движения схвата позволят провести математическое моделирование процесса и определить условия выполнения сборки без заклинивания деталей, повысить технологическую надежность процесса.

Библиографический список

1. Oscari, F. Functional Design of a Robotic Gripper for Adaptive Robotic Assembly / F.Oscari, S. Minto, G. Rosati // *Advances in Italian Mechanism Science. Mechanisms and Machine Science*. –2016. – vol 47. – P. 257-265.
2. C. Canali, F. High Reconfigurable Robotic Gripper for Flexible Assembly / C. Canali, F. Cannella, F. Chen, T. Hauptman, G. Sofia, D. G. Caldwell, A. A. Eytan // *ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 17–20 august. 2014. – Buffalo, New York, 2014. DOI:10.1115/DETC2014-35245
3. Кузнецова, С.В. Условия потери управляемости при относительной и угловой адаптации положения детали при сборке // *Материалы V международного научно-технического семинара «Современные технологии сборки» 19-20 октября 2017 г. – Москва : Изд-во Московский Политех, 2017 – С. 155–165.*
4. Божкова, Л.В. Метод роботизированной сборки с использованием вибрационных колебаний / Л.В. Божкова, М.В. Вартанов, Е.И. Кольчугин // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2006. – №9. – С. 62-67.

5. Симаков, А.Л. Обоснование методов и средств адаптации соединяемых деталей на базе принципов автоматического управления и выявленных взаимосвязей при автоматизированной сборке : дисс. д.т.н.: 12.03.2004 / Житников Ю.З. – Ковров, 2003. – 373 с.
6. Ghalyan I.F.J. Industrial Applications. In: ForceControlled Robotic Assembly Processes of Rigid and Flexible Objects. Springer, Cham. 2016. – 195 p.
7. Кристаль М.Г. Производительность и надежность сборочных автоматов: монография. – Волгоград, ВолГТУ, 2011. – 160 с.
8. Левчук Д. М. Исследование и разработка методов относительного ориентирования сборочных единиц соединения во вращающемся потоке газов по автоматической сборке : дисс. к.т.н. : 05.02.08 Москва, 1974 – 143 с.
9. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 736 с.
10. Божкова, Л.В. Вопросы вибрационной технологии / Л.В. Божкова, М.В. Вартанов, Е.И. Кольчугин // Межвузовский сборник научных статей «Вопросы вибрационной технологии». – 2006. – С.62-67.
11. Божкова, Л.В. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки с вибрациями / Л.В. Божкова, М.В. Вартанов, Н.А. Мартынович //В сборнике трудов международного научного симпозиума «Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях». – 2014. – С.30-33.

Bibliografichekij spisok

1. Oscari, F. Functional Design of a Robotic Gripper for Adaptive Robotic Assembly / F.Oscari, S. Minto, G. Rosati // Advances in Italian Mechanism Science. Mechanisms and Machine Science. –2016. – vol 47. – P. 257-265.
2. C. Canali, F. High Reconfigurable Robotic Gripper for Flexible Assembly / C. Canali, F. Cannella, F. Chen, T. Hauptman, G. Sofia, D. G. Caldwell, A. A. Eytan // ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 17–20 august. 2014. – Buffalo, New York, 2014. DOI:10.1115/DETC2014-35245
3. Kuznecova, S.V. Usloviya poteri upravlyaemosti pri otnositel'noj i uglovoj adaptacii polozheniya detali pri sborke // Materialy V mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminaru «Sovremennye tekhnologii sborki» 19-20 oktyabrya 2017 g. – Moskva : Izd-vo Moskovskij Politekh, 2017 – S. 155–165.
4. Bozhkova, L.V Metod robotizirovannoj sborki s ispol'zovaniem vibracionnyh kolebanij / L.V. Bozhkova, M.V. Vartanov, E.I. Kol'chugin // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii». – 2006. – №9. – S. 62-67.
5. Simakov, A.L. Obosnovanie metodov i sredstv adaptacii soedinyaemyh detalej na baze principov avtomaticheskogo upravleniya i vyyavlennyh vzai-

- mosvyazej pri avtomatizirovannoj sborke : diss. d.t.n.: 12.03.2004 / ZHitnikov YU.Z. – Kovrov, 2003. – 373 s.
6. Ghalyan I.F.J. Industrial Applications. In: ForceControlled Robotic Assembly Processes of Rigid and Flexible Objects. Springer, Cham. 2016. – 195 p.
 7. Kristal' M.G. Proizvoditel'nost' i nadezhnost' sborochnyh avtomatov: monografiya. – Volgograd, VolGTU, 2011. – 160 s.
 8. Levchuk D. M. Issledovanie i razrabotka metodov odnositel'nogo orientirovaniya sborochnyh edinic soedineniya vo vrashchayushchemsya potoke gazov po avtomaticheskoy sborke : diss. k.t.n. : 05.02.08 Moskva, 1974 – 143 s.
 9. Butenin, N.V. Kurs teoreticheskoy mekhaniki / N.V. Butenin, YA.L. Lunc, D.R. Merkin. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2008. – 736 s.
 10. Bozhkova, L.V. Voprosy vibracionnoj tekhnologii / L.V. Bozhkova, M.V. Vartanov, E.I. Kol'chugin // Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh statej «Voprosy vibracionnoj tekhnologii». – 2006. – S.62-67.
 11. Bozhkova, L.V. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya robotizirovannoj sborki s vibracijami / L.V. Bozhkova, M.V. Vartanov, N.A. Martynovich // V sbornike trudov mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Volnovye, vibrovolnovye tekhnologii v mashinostroenii, metalloobrabotke i drugih otraslyah». – 2014. – S.30-33.

¹*Вартанов Михаил Владимирович, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», m.v.vartanov@mospolytech.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет*

²*Чанг Та, Чун, аспирант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», Россия, Москва, Московский политехнический университет*

ENSURING TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF ROBOTIC ASSEMBLY BASED ON THE EFFECT OF ROTATION OF THE OUTPUT LINK OF THE ROBOT

M.V. Vartanov, Chang Ta, Chun

The main stage of automatic assembly is the process of parts mating. At this stage, there are problems associated with the probability of jamming the parts. To solve this problem, adaptive assembly heads are usually used. In this case, considerable frictional forces arise that prevent mating. The article deals with the assembly method using the rotational movement effect of the installed part. The presence of rotation makes it possible to significantly reduce the friction force of the part. The effect is achieved through the use of vibration's device supporting the basic part. The description of the experimental device is provided.

ed. A dynamic model of the assembly process with the use of the industrial robot ABB IRB140, equipped with a force/torque sensor, is constructed.

Keywords: robotic assembly, a force/torque sensor, the effect of rotation, vibrations device.

Vartanov Mikhail Vladimirovich, Doctor of Engineering sciences, prof., professor of the chair “Technologies and equipment of mechanical engineering”, m.v.vartanov@mospolytech.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

Chang Ta, Chun, post graduate student of the chair “Technologies and equipment of mechanical engineering”, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

К ВОПРОСУ ОЦЕНКА ТЕЛЕМЕТРИИ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ

Осипов К.Н.¹

Аннотация. Показано, что решение задач повышения эффективности систем автоматизированной обработки телеметрических измерений в ходе реализации бесконтактных методов контроля свойств продукции, в том числе механических, вибрационных, акустических и т.д. возможно путем использования современных алгоритмов оценивания измерительной информации, построенных на основе информационных критериев.

Ключевые слова. Телеметрия, адаптивная фильтрация, моделирование.

Повышения эффективности (быстродействия, точности, безаварийности) современных систем первичной обработки результатов телеметрических измерений, получаемых в ходе производственных испытаний сложных технических систем, а также в процессе функционирования систем внешнего мониторинга крупномасштабных объектов по-прежнему остаются актуальным [1,2], особенно при решении задач, связанных с первичной обработкой телеметрии в системах аэрокосмического мониторинга, используемых для оценки экологических состояний морских акваторий, а также для разведки месторождений углеводородов в режиме реального времени [3].

Обзор технической и научной литературы последних лет показал, что в нашей стране, ровно так же, как и за рубежом, решение задач первичной обработки телеметрических измерений в системах мониторинга крупномасштабных объектов сводится к использованию адаптивных ортогональных цифровых алгоритмов фильтрации, основанных на методах преобразования Фурье в сочетании с алгоритмами регрессионного и корреляционного анализа [3,4]. К сожалению, несмотря на известный ряд преимуществ цифровых адаптивных фильтров, связанных с простотой их реализации и универсальностью, они имеют ряд недостатков. Так, например, многие цифровые фильтры, построенные на базе фильтра Калмана или Винера, обладают высокой чувствительностью к полноте априорных данных об исследуемых процессах, что выражается в необходимости получения оценочных значений ковариационных матриц шумов в канале состояния системы, а также в измерительных каналах, что, в свою очередь, определяет необходимость существования некоторой обучающей последовательности данных и параметров желаемого отклика. При отсутствии обучающих выборок и информации о параметрах желаемого отклика реа-

лизация цифровых фильтров становится невозможной, т.к. получаемые оценки смещаются относительно истинных значений.

Использование методов «слепой адаптации», настройка которых проводится в отсутствие желаемого отклика, а в некоторых случаях и обучающих выборок, также не позволяют решить проблему первичной обработки телеметрии в условиях отсутствия информации о параметрах шума. В результате этого возникает научно-техническая задача дальнейшего совершенствования существующих методов адаптивной фильтрации с целью построения алгоритмов, обеспечивающих устойчивую работу фильтрующих устройств в условиях априорной неопределенности.

Целью данной работы является построение алгоритма и схемы практической реализации метода оценки телеметрических данных, получаемых в условиях отсутствия достоверной информации о параметрах внешнего зашумления.

Пусть наблюдаемый телеметрический сигнал $y(t)$ может быть описан линейным дифференциальным уравнением второго порядка с коэффициентами, зависящими от времени:

$$\ddot{y}(t) + G(t) \cdot \dot{y}(t) + P(t) \cdot y(t) = F(t), \quad (1)$$

где G, P – матрицы, описывающие диссипативные параметры демпфирования, а также жесткости, $F(t)$ – вектор внешних возмущений в системе с изменяющимися компонентами.

Предполагая, что значения матриц G, P зависят не только от времени, но и от вектора неизвестных параметров, определяющих состояние исследуемой системы $x(t)$, выражение (1) можно переписать в виде:

$$\ddot{y}(t) + G(x, t) \cdot \dot{y}(t) + P(x, t) \cdot y(t) = F(t). \quad (2)$$

Решение уравнения (2) – некоторый вектор:

$$y(t) = W(x, t) \cdot F(x, t). \quad (3)$$

Очевидно, что для продолжительного промежутка времени, в течение которого реализуется мониторинг крупномасштабных объектов, считать вектор $x(t)$ постоянным было бы неверно. Поэтому для нахождения точного аналитического описания уравнения (3) необходимо составление дифференциального уравнения, описывающего процесс изменения вектора $x(t)$. Однако данный подход является полностью детерминированным. В действительности процесс изменения вектора $x(t)$ представляет комбинацию двух процессов: детерминированного и стохастического, обусловленного влиянием большого количества внешних факторов. Поэтому, принимая во внимание то, что телеметрия представляет смесь детерминированного сигнала с наведенными внешними возмущениями, представим вектор $x(t)$, характеризующий состояние системы в виде суммы двух компонент:

$$x(t) = x_0(t) + \tilde{x}(t). \quad (4)$$

где $x_0(t)$ – детерминированная составляющая сигнала, а $\tilde{x}(t)$ – случайная составляющая сигнала.

Вектор $y(t)$, характеризующий изменение измеренных значений сигнала может быть представлен аналогично уравнению (4).

Разобьем исследуемый временной интервал на отдельные непересекающиеся подмножества:

$$[0; T] = \bigcup_{i=0}^n [T_{i-1}; T_i].$$

Тогда, используя методологию, описанную в работах [5,6], вектор состояния системы в дискретные моменты времени i может быть представлен в виде:

$$x_i = A_i(x_{i-1}, (y_m)_{i-1}) \cdot x_{i-1}, \quad (5)$$

где y_{mi} – вектор амплитуд спектральных характеристик сигнала на интервале $[T_{i-1}; T_i]$, $A_i(x_{i-1}, y_{mi})$ – матричный, в том числе нелинейный оператор, определяющий процесс изменения вектора x .

Значения $(y_m)_i$ определены из выражения:

$$(y_m)_i = B_i(x_{i-1}) \cdot x_i, \quad (6)$$

где B – матрица, зависящая от элементов матриц передаточной функции и координат вектора возмущений.

В ходе первичной обработки телеметрии уравнения (6) и (5) используются для оценки вектора параметров $x(t)$ по известным из наблюдений значениям вектора $(y_m)_i$ с учетом параметров зашумления. Однако на практике истинные значения вероятностных характеристик наведенных шумов неизвестны, доступны только их выборочные оценки, использование которых вместо истинных значений может привести к ошибкам в результатах. Поэтому для решения данной задачи предлагается использовать адаптивный алгоритм, работающий в условиях минимальной априорной информации. В качестве такого алгоритма может быть использован алгоритм, использующий в качестве критерия оценивания информационное расхождение Кульбака-Лейблера между параметрами вероятностного распределения истинного вектора состояния и его оценкой [7]. Уравнения алгоритма привязаны к фильтру Калмана и отличаются от него исключением неизвестных истинных характеристик шумов и включением доступной информации о наблюдениях в виде выборочных значений ковариационных матриц наблюдения T_t и оценки вектора состояния $\hat{\Sigma}_t$.

Априорная оценка $\hat{x}_{t/t-1}$ вектора состояния (т.е. оценка в момент времени t по результатам наблюдений до момента $t-1$ включительно)

$$\hat{x}_{t/t-1} = A_t(x_{t-1}, (y_m)_{t-1}) \cdot \hat{x}_{t-1}, \quad (7)$$

при поступлении нового измерения корректируется

$$\hat{x}_t = \hat{x}_{t/t-1} + K_t z_t \quad (8)$$

в зависимости от разницы между ним и априорной оценкой:

$$z_t = (y_m)_t - B(\hat{x}_{t-1}) \cdot \hat{x}_{t/t-1}. \quad (9)$$

Эту разницу называют также невязкой (инновацией, остаточным членом). Матрица K_t весовых коэффициентов (коэффициентов усиления) рассчитывается по формуле:

$$K_t = A \hat{\Sigma}_{t-1} A^T B [B A \hat{\Sigma}_{t-1} A^T B^T + T_t]^{-1}; \quad t=1, \dots, T. \quad (10)$$

где

$$\hat{\Sigma}_t = [I - K_t B] A \hat{\Sigma}_{t-1} A^T [I - K_t B]^T + K_t T_t K_t^T \quad (11)$$

Предлагаемый адаптивный фильтр работает следующим образом.

Отсчеты обрабатываемого сигнала, поступающие с измерительного устройства, поступают на вход первого сумматора 1, который является входом фильтра (Рис.1). Параллельно этому каждый пришедший на обработку отсчет сигнала поступает на вход первого вычислителя ковариации 24. Затем, сигнал, сформированный на выходе сумматора 9, поступает на второй вход умножителя 11. На первый вход умножителя 11 поступает сигнал, сформированный на выходе умножителя 9, но смещенный на один шаг назад в блоке задержки 10.

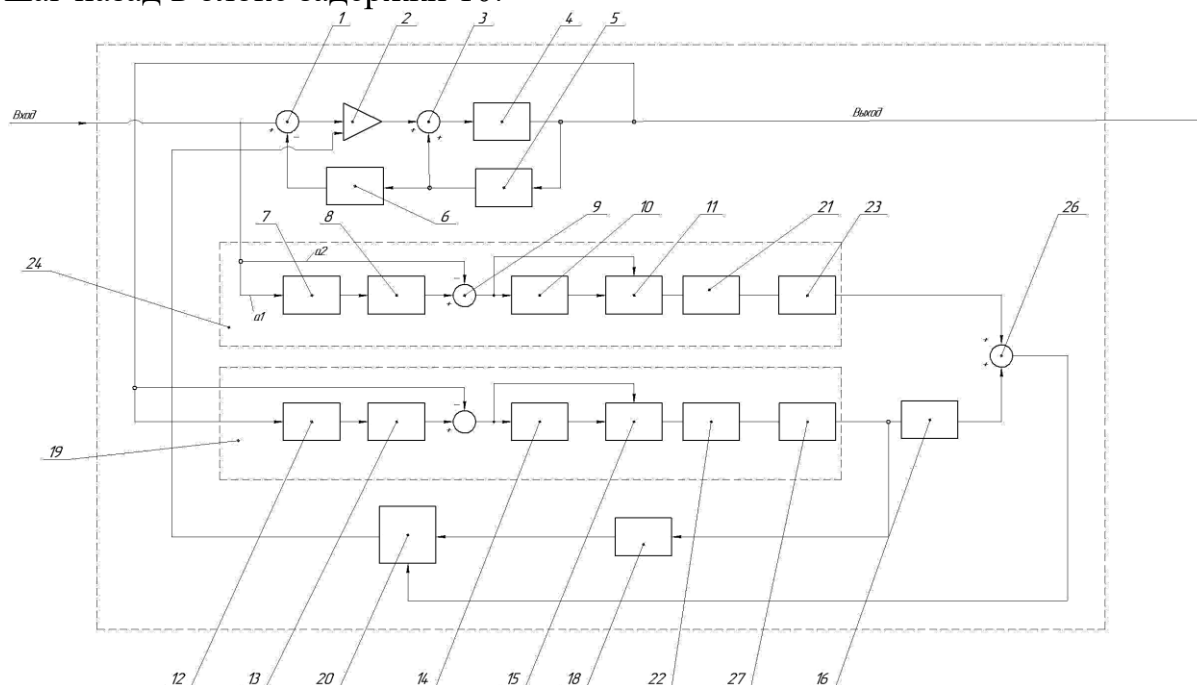


Рис.1 – Схема адаптивного цифрового фильтра

Сигнал, сформированный в блоке 11, последовательно поступает в ячейку памяти 21 и в усреднитель 23, на выходе которого формируется значение ковариации сигнала, поступившего на вход ячейки памяти 7 в

дискретный момент времени t . К этому моменту времени на выходе первого сумматора 1 формируется невязка, вычисленная по формуле (9), которая поступает на вход умножителя 2, где она взвешивается коэффициентом усиления фильтра (10). Сигнал, взвешенный в блоке 2, поступает на вход второго сумматора, где происходит коррекция оценочных значений сигнала (формула (8)), после чего скорректированная оценка сигнала поступает в блок задержки на один шаг 4, на вход третьего умножителя 5, на второй вход второго сумматора 3, на вход четвертого умножителя 6 и на вход второго вычислителя ковариации 19, инициализируя его работу. После этого выходной сигнал с блока 24 поступает на вход четвертого умножителя 16, а также на вход пятого умножителя 18. Взвешенное значение ковариации оценок сигнала, сформированное в блоке 16, поступает на первый вход сумматора 26. На второй вход сумматора 26 поступает выходной сигнал блока расчета ковариации входных отсчетов 24. Сигнал, сформированный на выходе сумматора 26, поступает на второй вход делителя 20, на выходе которого формируется коэффициент усиления фильтра, определяемый формулой (10), поступающий на второй вход первого умножителя 2, после чего на выходе умножителя 4 формируется выходной сигнал фильтра.

Основным преимуществом предлагаемого адаптивного фильтра по сравнению с существующими алгоритмами – он может быть использован для решения задач первичной обработки телеметрии в условиях априорной неопределенности. Предполагая, что реализация алгоритма возможна в условиях доступности информации о параметрах $A(x, y_m)$ и $B(x)$, характеризующих оцениваемую динамическую систему. Дальнейшие исследования в данном направлении связаны с поиском путей построения алгоритмов фильтрации сигналов, работающих, как в условиях априорной неопределенности о параметрах внешних возмущений, так и в условиях отсутствия точных характеристик самих динамических систем.

Библиографический список

1. Технологические газозоодушные системы стендов экспериментальной испытательной базы авиационных двигателей и энергетических установок. / А.Ф. Шульгин и [др.]. – М.: МАТИ, 2009. – 384 с.
2. Лоскутов, А.С. Испытания ДВС: Учебное пособие. / А.С. Лоскутов, А.Н. Григорьев, Д.В. Кожин. – Йошкар-Ола: Марийский ГТУ, 2007. – 136 с.
3. Системное моделирование акторных взаимодействий для облачных сервисов / А.В. Скатков и [др.]. – Симферополь: Ариал, 2018. – 420 с.
4. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян и [др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
5. Голикова В.В. Идентификация стохастических объектов и процессов в автоматизированной системе производственных приемосдаточных испытаний двигателей внутреннего сгорания. дис. канд. тех. наук по спе-

циальности 05.13.07 / Голикова Виктория Викторовна. – Севастополь: СевНТУ – 2008 г. – 205 с.

6. Голикова, В.В. Моделирование измерительных последовательностей диагностических параметров ДВС / В.В. Голикова, Е.Л. Первухина, П.К. Сопин // Двигатели внутреннего сгорания – №2 – 2012. – С 114–117.
7. Pervukhina, E. Adaptive time series filters obtained by minimization of the Kullback-Leibler divergence criterion / E. Pervukhina, J.-F. Emmenegger // International Journal of Applied Mathematics, 2005. – Vol. 17. – № 1. – P.69-89.

Bibliograficheskiy spisok

1. Tekhnologicheskie gazovozdushnye sistemy stendov eksperimental'noj ispytatel'noj bazy aviacionnyh dvigatelej i energeticheskikh ustanovok./ A.F. SHul'gin i [dr.]. – M.: MATI, 2009. – 384 с.
2. Loskutov, A.S. Ispytaniya DVS: Uchebnoe posobie. / A.S. Loskutov, A.N. Grigor'ev, D.V. Kozhin. – Joshkar-Ola: Marijskij GTU, 2007. – 136 s.
3. Sistemnoe modelirovanie aktornyh vzaimodejstvij dlya oblachnyh servisov / A.V. Skatkov i [dr.]. – Simferopol': Arial, 2018. – 420 s.
4. Analiz dannyh i processov: ucheb. posobie / A. A. Barsegyan i [dr.]. – SPb.: BHV-Peterburg, 2009. – 512 s.
5. Golikova V.V. Identifikaciya stohasticheskikh ob"ektov i processov v avtomatizirovannoj sisteme proizvodstvennyh priemosdatochnyh ispytaniy dvigatelej vnutrennego sgoraniya. dis. kand. tekhn. nauk po special'nosti 05.13.07 / Golikova Viktoriya Viktorovna. – Sevasto-pol': SevNTU – 2008 g. – 205 s.
6. Golikova, V.V. Modelirovanie izmeritel'nyh posledovatel'no-stej diagnosticheskikh parametrov DVS / V.V. Golikova, E.L. Pervukhina, P.K. Sopin // Dvigateli vnutrennego sgoraniya – №2 – 2012. – S 114–117.
7. Pervukhina, E. Adaptive time series filters obtained by minimization of the Kullback-Leibler divergence criterion / E. Pervukhina, J.-F. Emmenegger // International Journal of Applied Mathematics, 2005. – Vol. 17. – № 1. – P.69-89.

¹*Осипов Константин Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольский государственный университет, assistenttmm@mail.ru, 299053, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

*TO THE QUESTION OF EVALUATION OF MEASURING INFORMATION IN
THE COURSE OF AUTOMATED PRODUCTION TESTS*

K.N. Osipov

It is shown that the solution of problems of increase of efficiency of systems of the automated processing of telemetry data during the implementation of contactless methods of control of product properties, including mechanical, vibrational, acoustic, etc. is possible by use of modern estimation algorithms measurement information based on information criteria. Keyword. telemetry, adaptive filtering, modeling.

Key words: telemetry, adaptive filtering, modeling.

Osipov Konstantin Nikolaevich, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, PhD, Docent (Associate Professor), Department of Instrument systems and Automation of Technological Processes 299053, Sevastopol, Universytetskay st. 33.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ПЛАТФОРМОЙ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Осадченко А.Е.¹

Аннотация. Обосновывается возможность создания автоматизированной системы управления платформой имитатора морской качки для прогнозирования критических ситуаций, таких как переворачивание и опрокидывание судна. Исследуется возможность использования микроконтроллеров в системе управления шаговыми двигателями для обеспечения необходимых динамических характеристик имитации бортовой и килевой качки. Контроль текущего углового положения платформы осуществляется при помощи датчиков углового положения.

Ключевые слова. Имитатор морской качки, многокоординатная платформа, контроллер шагового двигателя, микроконтроллер, моделирование.

Автоматизированная система управления многокоординатной платформой разрабатывалась в рамках работы по созданию имитатора морской качки (ИМК) для системы прогнозирования критических ситуаций, таких как переворачивание и опрокидывание судна.

При разработке ИМК к системе управления предъявлялось требование имитировать угловые перемещения подвижной платформы в соответствии с данными временных рядов, которые могли быть получены от реальных датчиков на морских объектах или при помощи систем моделирования. Период времени ряда был принят 0,03 с, а время перехода платформы из одного крайнего положения платформы в другое не более 1с. Максимальная длительность временного ряда симуляции морской качки составила 2000 с.

ИМК представляет собой платформу с 6-ю степенями свободы, которая является манипулятором с параллельной кинематической схемой [1].

Использование параллельных подвижных частей позволяет снизить нагрузку на управляющие приводы, а также улучшить динамику, что имеет большое значение для имитации раскачивания судна при движении в море.

В данной работе исследовалась возможность использования микроконтроллеров в системе управления шаговыми двигателями (ШД), для обеспечения необходимых динамических характеристик имитации бортовой и килевой качки.

Механическая часть имитатора состоит из основания, на котором закреплены 6 шаговых двигателей (ШД), на осях которых закреплены рычаги, и соединенной с ними подвижной платформы посредством опорных

направляющих с шаровыми шарнирами на концах. Общий вид ИМК показан на **Рис.1**.



Рис.1 – Общий вид ИМК

Решая обратную задачу кинематики, можно однозначно определить углы поворота роторов ШД из исходного состояния в конечное, для каждого заданного положения подвижной платформы путем решения системы из 6 нелинейных уравнений [2].

Коэффициенты уравнений зависят от длины направляющих и рычагов, а также от углового положения точек соединения осей двигателей с шарнирами. Для каждого коэффициента уравнений существует пространство решений, определяющее допустимые положения подвижной платформы.

Таким образом, система управления многокоординатной платформой в течение цикла длительностью 30 мс должна обеспечивать решение системы 6 нелинейных уравнений и управление 6 ШД.

Для обеспечения необходимых характеристик быстродействия вычислительная часть системы управления разделена на 2 блока:

- управляющий компьютер, вычисляющий углы поворота роторов ШД;
- блок управления ШД, формирующий необходимые уровни для управления контроллерами ШД.

Блок схема автоматизированной системы управления ИМК показана на **Рис.2**.

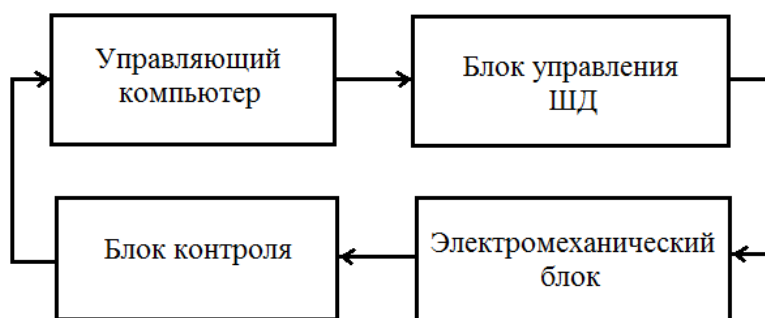


Рис.2 – Блок схема автоматизированной системы управления ИМК

Автоматизированная система управления ИМК ИМК состоит из четырех основных блоков.

1. Управляющий компьютер. Блок выполняет следующие функции:
 - генерация временных рядов угловых положений подвижной платформы симулятора;
 - решение обратной задачи динамики [2], путем решения системы 6 нелинейных уравнений, определяющих требуемые углы поворота ШД;
 - передача временного ряда в блок управления ШД;
 - получение данных из блока контроля о текущем угловом положении подвижной платформы и сравнение их с требуемыми значениями.

В качестве управляющего использован персональный компьютер со следующими параметрами:

- процессор Intel i5;
- последовательного интерфейса USB версии 3.0.
- операционная система версии MS Windows 10;
- объем оперативной памяти 16000 MB;
- накопитель на жестком магнитном диске, предоставляющий под размещение ОС, программ и данных 240 ГВ дискового пространства.

2. Блок управления ШД, выполняющий следующие функции:
 - прием данных от управляющего компьютера;
 - формирование управляющих сигналов для контроллеров ШД при помощи программы выполняемой на микроконтроллере;
 - формирование управляющих импульсов для контроллеров ШД.

3. Электромеханический блок, состоящий из подвижной и неподвижной платформы, ШД, шарниров и рычагов (**Рис.1**).

В ИКС применены биполярные гибридные ШД марки SY57STH41-2804A[3] и контроллеры типа ТВ6560, предназначенными для управления ШД которые допускают максимальный ток 3,5А и максимальное напряжение питания 40 В[4].

4. Блок контроля, выполняющий функции:

– получение информации о текущем угловом положении подвижной платформы при помощи интегральных датчиков углового положения 3DOF (MPU 6050) [5];

– преобразование данных от датчиков для передачи в управляющий компьютер по USB интерфейсу при помощи программы, написанной на языке C, выполняющейся на отладочной плате STM32VLDISCOVERY: UM0919 [6].

Электропитание блоков стенда осуществляется при помощи стабилизированного источника питания с напряжениями 24В/5А и 5В/2А.

Выбор микроконтроллера для блока управления ШД обусловлен требованиями необходимого количества портов для формирования управляющих сигналов для контроллеров ШД.

Управление контроллером ШД TB6560 осуществляется посредством 3 входных цепей [4]:

- EN – включение контроллера;
- DIR – управление направлением вращения ШД;
- STEP – выполнение шага.

Так как работа платформы не требует управления включением ШД, то управляющий ток через входы EN пропускается при включении электропитания платформы от внутренней цепи питания контроллера ШД.

Таким образом, для управления цепями STEP и DIR 6 контроллеров ШД, необходимы 12 выходных портов микроконтроллера.

Для формирования управляющих сигналов контроллеров ШД использован одноплатный компьютер Arduino Mega 2560, который построен на микроконтроллере ATmega 2560. Выбор данной платы обусловлен необходимостью использовать большое количество портов ввода/вывода для управления исполнительной системой, с достаточным быстродействием [7].

Плата имеет 54 цифровых входа/выходов. Для работы необходимо подключить платформу к управляющему компьютеру посредством кабеля USB. Для обмена данными с управляющим компьютером по USB используется микроконтроллер Atmega 8U2, запрограммированный как конвертер USB-to-serial.

Для передачи сигналов в исполнительную систему используются 12 портов. 6 портов задают направление движения шаговых двигателей, 6 портов задают количество шагов. Программное обеспечение микроконтроллера написано на языке Ардуино.

Программа микроконтроллера производит циклическое чтение данных из последовательного порта и управление ШД.

Длительность цикла 30 мс. Работа программы микроконтроллера синхронизирована с работой управляющей программы компьютера.

В начале очередного цикла производится циклическая проверка последовательного порта и ожидание прихода данных о необходимых углах

поворота роторов ШД из управляющего компьютера. Принятые данные используются для вычисления текущего направления вращения роторов ШД и вычисления количества импульсов для управления контроллерами ШД. Далее начинается формирование управляющих импульсов для контроллеров ШД, которое длится 26,5 мс. Если суммарная длительность цикла оказывается менее 30 мс, то происходит приостановка программы.

На **Рис.3** приведен график временного ряда полученного от блока контроля в процессе имитации бортовой качки амплитудой 10 град. и периодом 3,3 с.

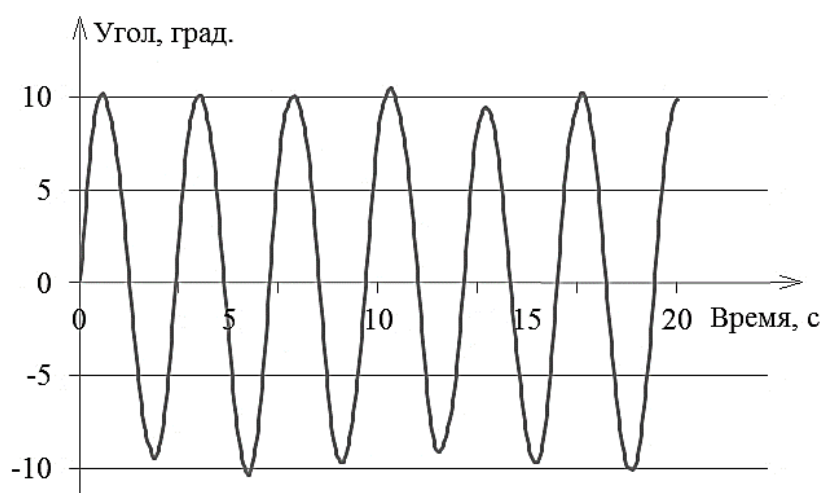


Рис.3 – График имитация бортовой качки

Автоматизированная система управления многокоординатной платформой может быть использована для построения ИМК. В качестве направления дальнейшего исследования предполагается рассмотрение возможностей создания систем управления ИМК на основе одноплатного компьютера.

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57817X0259).

Библиографический список

1. Stewart, D.A. Platform with six degrees of freedom // Proc. Inst. Mech. Engr. – 1965/1966. – Vol.180. – Part I. – N.15. – P. 371–386.
2. Кабанов А.А. Моделирование подвижной платформы мехатронной системы с шестью степенями свободы // Материалы III Междунар. научн.-техн. конференции молодых ученых «АМИТ», 15-16 мая 2013 г. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – С. 96-100.
3. Ресурсы для шагового двигателя SY57STH41-2804A [Электронный ресурс].–Режим доступа: <http://www.micropap.com/pdf/nema23/SY57STH41-2804A.pdf>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.

4. Ресурсы для микросхемы TB6560A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/548481/TOSHIBA/TB6560AHQ.html>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.
5. Ресурсы для Gyro+Accelerometer Sensor, 3 Axis based on MPU-6050 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sunrom.com/p/gyro-accelerometer-sensor-3-axis-based-on-mpu-6050>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.
6. Документация на отладочную плату STM32VLDISCOVERY: UM0919 User Manual STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/f3/16/fb/63/d6/3d/45/aa/CD00267113.pdf/files/CD00267113.pdf/jcr:content/translations/en.CD_00267113.pdf, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.
7. Ресурсы для Arduino Mega 2560 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560>, свободный – Загр. с экрана. Яз. русский.

Bibliograficheskij spisok

1. Stewart, D.A. Platform with six degrees of freedom // Proc. Inst. Mech. Engr. – 1965/1966. – Vol.180. – Part I. – N.15. – P. 371–386.
2. Kabanov A.A. Modelirovanie podvizhnoj platformy mekhatronnoj sistemy s shest'yu stepenyami svobody // Materialy III Mezhdunar. nauchn.-tekhn. konferencii molodyh uchenyh «AMIT», 15-16 maya 2013 g. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2013. – S. 96-100.
3. Resursy dlya shagovogo dvigatelya SY57STH41-2804A [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.micropap.com/pdf/nema23/SY57STH41-2804A.pdf>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.
4. Resursy dlya mikroskhemy TB6560A [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/548481/TOSHIBA/TB6560AHQ.html>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.
5. Resursy dlya Gyro+Accelerometer Sensor, 3 Axis based on MPU-6050 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.sunrom.com/p/gyro-accelerometer-sensor-3-axis-based-on-mpu-6050>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.
6. Dokumentaciya na otladochnuyu platu STM32VLDISCOVERY: UM0919 User Manual STMicroelectronics [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/f3/16/fb/63/d6/3d/45/aa/CD00267113.pdf/files/CD00267113.pdf/jcr:content/translations/en.CD_00267113.pdf, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.
7. Resursy dlya Arduino Mega 2560 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560>, свободный – Загр. с экрана. Яз. русский.

¹*Осадченко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, aeosadchenko@rambler.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.*

*AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF A MULTI-COORDINATE
PLATFORM BASED ON A MICROCONTROLLER*

A.E. Osadchenko

The possibility of creating an automated control system for a pitching simulator for predicting critical situations, such as turning over and overturning a ship, is being investigated. The possibility of using microcontrollers in the control system of stepper motors is studied to ensure the necessary dynamic characteristics of the simulation of rolling and pitching. Monitoring of the current angular position of the platform is carried out using angular position sensors.

Key words: simulator roll of a ship, multi-axis platform, stepper motor controller, microcontroller, modeling.

Osadchenko Alexander Evgenevich, candidate of technical sciences, aeosadchenko@rambler.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО ТИПА

Круговой А.Н.¹

Аннотация. При автоматизации холодной листовой штамповки часто применяют манипуляторы, обеспечивающие подачу заготовки и удаление готовой детали. Такие манипуляторы обычно имеют две руки, установленные на одном поворотном приводе; при этом одна рука подает заготовки, другая – удаляет детали. Общее время транспортных операций составляет около 2,5...3 с, при длительности технологического процесса штамповки 0,5...1 с., т.е. производительность штампа снижается почти в три раза. В настоящее время появились электромеханические линейные модули, обеспечивающие скорость перемещения до 3 м/с. При использовании таких модулей производительность операций холодной штамповки может быть существенно повышена. В работе рассматривается автоматизированный комплекс холодной штамповки, в котором транспортные операции осуществляет электромеханический модуль линейного типа, обоснованы способы повышения быстродействия такого комплекса.

Ключевые слова. Электромеханический модуль, линейное перемещение, холодная штамповка, производительность.

Процессы листовой штамповки получили широкое применение в различных отраслях промышленности, благодаря высокой производительности и экономической эффективности [1]. Холодная листовая штамповка является одним из наиболее прогрессивных технологических методов производства [2]; она имеет ряд преимуществ перед другими видами обработки металлов как в техническом, так и в экономическом отношении.

В техническом отношении холодная штамповка позволяет [3]: получать детали весьма сложных форм, изготовление которых другими методами обработки или невозможно или затруднительно; создавать прочные и жесткие, но легкие по массе конструкции деталей при небольшом расходе материала; получать взаимозаменяемые детали с достаточно высокой точностью размеров, преимущественно без последующей механической обработки.

В экономическом отношении холодная штамповка обладает следующими преимуществами: экономным использованием материала и сравнительно небольшими отходами; весьма высокой производительностью оборудования, с применением механизации и автоматизации производ-

ственных процессов; массовым выпуском и низкой стоимостью изготавливаемых изделий.

Целью работы является исследование способов повышения производительности штамповки при применении электромеханических модулей линейного типа для автоматизации операций загрузки, выгрузки.

В настоящее время многие производители предлагают различные линейные электроприводы для высокой динамики и скорости, точного и энергичного движения. Приводы с зубчатым ремнем, винтовые приводы с шариковой направляющей [4] нового типа позволяют выбрать соответствующие технологии для любых потребностей.

При выполнении операций загрузки-выгрузки предполагается использовать только линейные движения элементов промышленного робота, что, с учетом высоких скоростей перемещения исполнительных механизмов, существенно повысит производительность комплекса.

Основой манипулятора, обеспечивающего загрузку-разгрузку является электромеханический модуль консольного типа. Электромеханические модули консольного типа применяются в случае загрузки или выполнения технических операций в зоне, в которой невозможно расположить точки крепления системы портального типа. На основании конструкторских расчетов выбран типоразмер модуля DGEA-18-400-ZR с серводвигателем MTR-AC-55-3S-GA [4], их внешний вид показан на **Рис.1**, такой модуль допускает максимальную скорость перемещения 3м/с.

Общий вид автоматизированного комплекса штамповки показан на **Рис.2**. В его состав входят кривошипный пресс 6 модели КД 2126 [7], промышленный робот 1 с вакуумным захватом, закрепленный на столе 2, на котором также установлены шаговый транспортер 3, вибробункер 5 с виброприводом и вибролоток 4. Промышленный робот захватывает заготовку на позиции захвата вибролотка, переносит ее в штамп, где устанавливает в матрицу. Захват промышленного робота выходит из технологической зоны штампа, происходит штамповка, робот забирает деталь и устанавливает ее в ориентированном положении на спутник шагового транспортера.

Задачей исследования является нахождение методов повышения быстродействия промышленного робота, осуществляющего загрузку заготовок в штамп и удаление готовых деталей. Время, затрачиваемое на транспортные операции не должно существенно превышать длительность технологической операции штамповки, чтобы не снижать более, чем в два раза максимальную производительность прессы. Разрабатывается методика выбора параметров управления электроприводами промышленного робота для обеспечения максимального быстродействия.

Расчетная схема электропривода показана на **Рис.3**. При управлении электроприводом промышленного робота используется позиционное управление с упреждением, при котором весь путь до точки $X_3 - h$ проходит на максимальной (быстрой) скорости, где h – упреждение. В этой

точке двигатель отключается от источника питания и происходит торможение за счет внешнего момента сопротивления. Расчетная схема показана на **Рис.3**. Двигатель вращает зубчатый шкив, который перемещает зубчатый ремень, связанный с подвижным элементом.



Рис.1 – Внешний вид модуля DGEA-18-400-ZR (слева) и двигателя MTR-AC-55-3S-GA (справа)

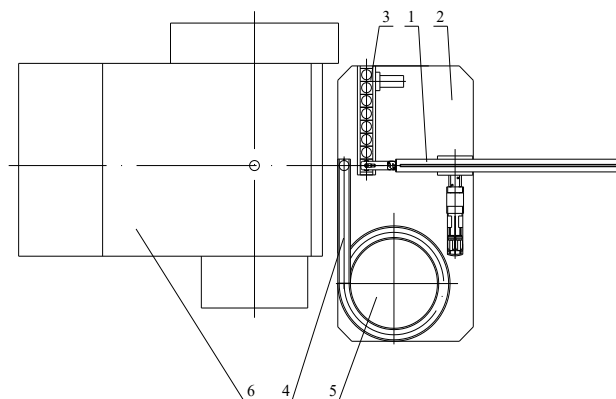


Рис.2 – Общий вид автоматизированного комплекса

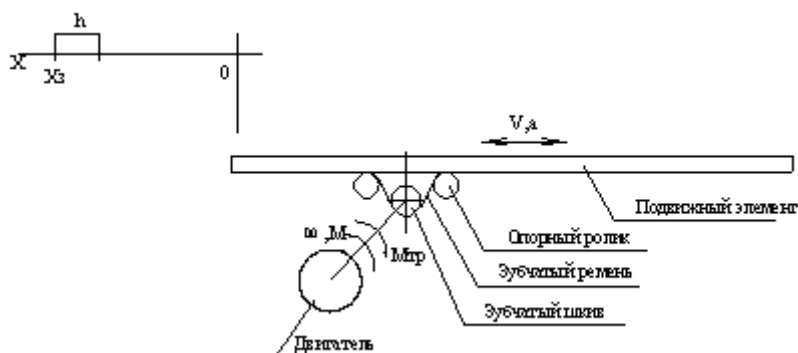


Рис.3 – Расчетная схема

Для описания динамики электропривода используется математическая модель, разработанная в [5,6].

Величина упреждения подбирается таким образом, чтобы погрешность позиционирования не превышала $\pm 0,5$ мм. Результаты моделирования представлены на **Рис.4,5**.

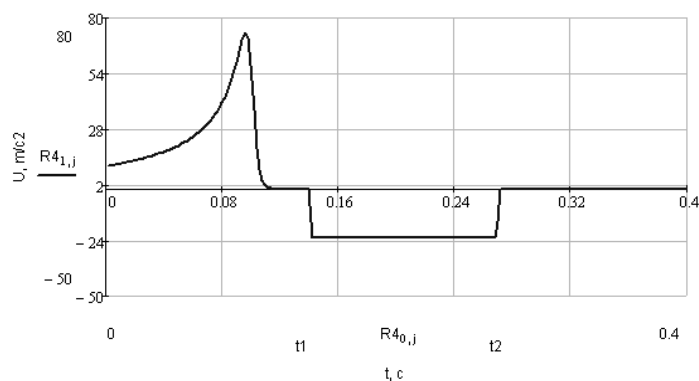


Рис.4 – График зависимости ускорения от времени

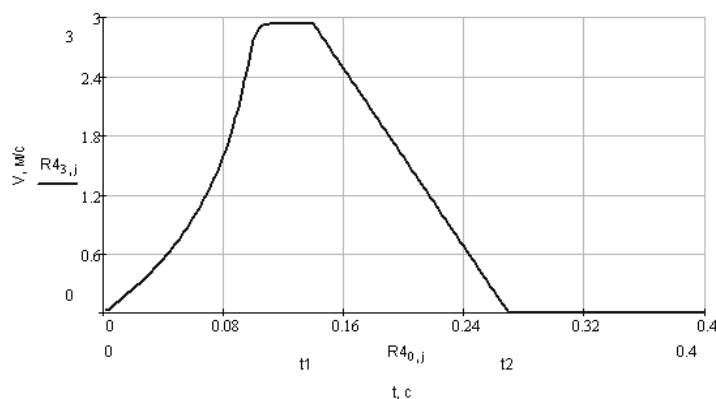


Рис.5 – График зависимости скорости от времени

Таким образом, в результате моделирования можно сделать выводы:

Максимально допустимая для линейного электромеханического модуля скорость 3 м/с достигается при частоте напряжений 35 Гц., максимальное ускорение при разгоне достигает 7g. Время позиционирования при ходе 400 мм составляет 0,27с. Это быстродействие вполне подходит с точки зрения необходимой производительности комплекса; дальнейшее повышение быстродействия может быть достигнуто за счет использования динамического торможения.

На основании проведенных исследований разработана методика повышения быстродействия штамповочного промышленного робота, алгоритм которой представлен на Рис.6. Необходимая последовательность действий: выбрать типоразмер модуля DGEA по исходным данным; создать математическую модель; подобрать частоту напряжения, при которой достигается максимально допустимая скорость; определить необходимую величину упреждения; определить время и точность позиционирования. Если заданное быстродействие не обеспечено применить динамическое торможение и постепенно увеличивать тормозной момент.

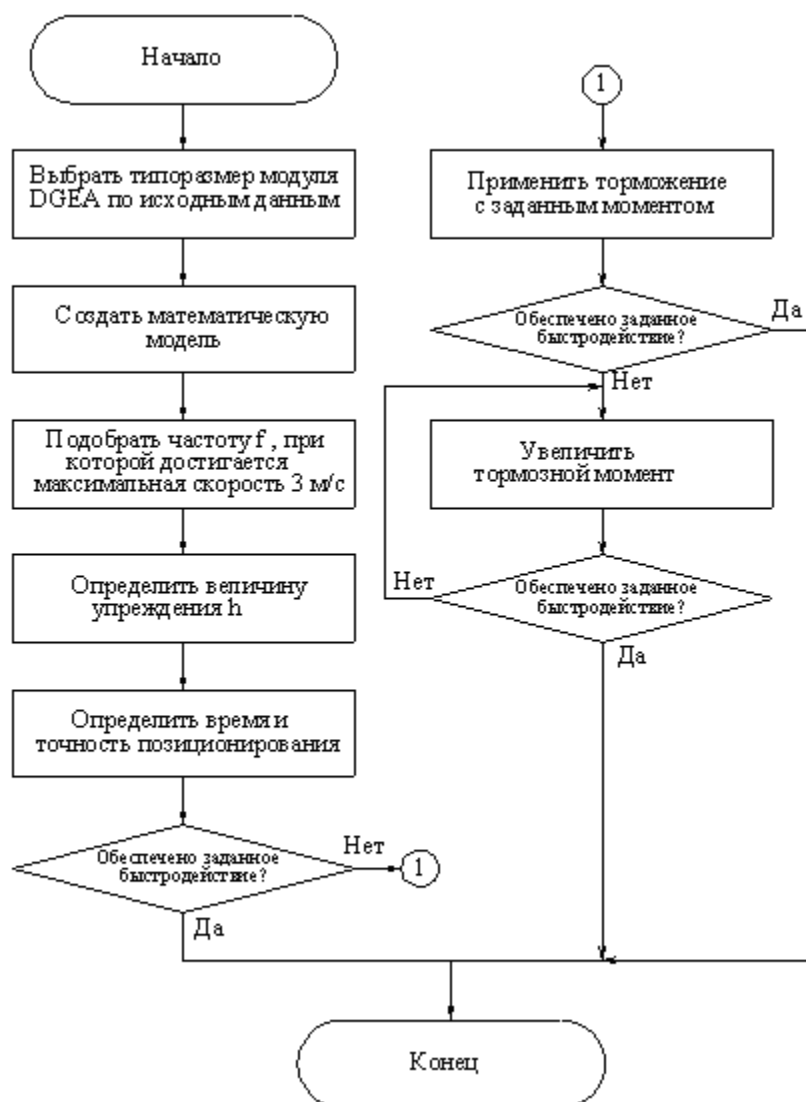


Рис.6 – Алгоритм реализации метода повышения быстродействия

На основании результатов проведенных исследований можно существенно (в 1,5...2 раза) увеличить производительность автоматизированного комплекса холодной штамповки.

В качестве направления дальнейшего исследования предполагается применение законов оптимального управления для уменьшения ускорения при разгоне.

Библиографический список

1. Килов А.С., Килов К.А. Производство заготовок. Листовая штамповка: Серия учебных пособий из шести книг. Книга 2. Получение заготовок из листового материала и гнутые профили. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 182 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., пере раб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.

3. Линц В.П., Максимов Л.Ю. Кузнечно – прессовое оборудование и его наладка. – М.: Металлургия, 1988. – 286с.
4. Продукция 2008/2009. Каталог компании FESTO. – К.: FESTO. – 2009.
5. Круговой, А.Н. Позиционирование автоматизированного электропривода переменного тока с дискретным регулированием частоты / А.Н. Круговой// Журн. автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2018. –Т.1. – №1. – С. 16-22.
6. Пашков, Е.В. Автоматизация в промышленности: Практикум. В 4 ч. Ч. III. Автоматизированный электропривод и моделирование механотронных модулей движения/ Е.В. Пашков и [др]; под ред. Е.В. Пашкова. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 225 с.
7. Паспорт на кривошипный пресс КД2126 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stanok-online.ru/pasporta-na-kpo/krivoshipnie-pressa-p/627-pasport-na-krivoshipnyy-press-kd2126.html>, свободный – Загр. с экрана. Яз. рус.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kilov A.S., Kilov K.A. Proizvodstvo zagotovok. Listovaya shtam-povka: Seriya uchebnyh posobij iz shesti knig. Kniga 2. Poluchenie za-gotovok iz listovogo materiala i gnutye profili. – Orenburg: GOU OGU, 2004. – 182 s.
2. Romanovskij V.P. Spravochnik po holodnoj shtampovke. – 6-e izd., pere rab. i dop. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 520 s.
3. Linc V.P., Maksimov L.YU. Kuznechno – pressovoe oborudovanie i ego naladka. – М.: Metallurgiya, 1988. – 286s.
4. Produkciya 2008/2009. Katalog kompanii FESTO. – К.: FESTO. – 2009.
5. Krugovoj, A.N. Pozicionirovanie avtomatizirovannogo elektro-privoda peremennogo toka s diskretnym regulirovaniem chastoty / A.N. Krugovoj// ZHurn. avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii. – 2018. –Т.1. – №1. – S. 16-22.
6. Pashkov, E.V. Avtomatizaciya v promyshlennosti: Praktikum. V 4 ch. CH. III. Avtomatizirovannyj elektroprivod i modelirovanie mekha-notronnyh modulej dvizheniya/ E.V. Pashkov i [dr]; pod red. E.V. Pashkova. – Sevastopol': SevNTU, 2011. – 225 s.
7. Pasport na krivoshipnyj press KD2126 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://stanok-online.ru/pasporta-na-kpo/krivoshipnie-pressa-p/627-pasport-na-krivoshipnyy-press-kd2126.html>, svobodnyj – Zagr. s ekrana. YAz. rus.

¹*Круговой Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц.,
atpp_krugovoi@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*AUTOMATION OF OPERATIONS OF COLD PUNCHING WITH
APPLICATION OF ELECTROMECHANICAL MODULES OF A LINEAR
TYPE.*

A.N. Krugovoy

At automation of cold sheet punching frequently apply manipulators ensuring submission of preparation and removal(distance) of a ready detail. Such manipulators usually have two hands established on one rotary drive, thus one hand submits preparations, another - deletes details. The general(common) time of transport operations thus makes about 2,5...3 with, at duration of technological process of punching 0,5...1 with., i.e. the productivity of a stamp is reduced almost three times. Electromechanical linear modules ensuring speed of moving up to 3 m/s now have appeared. At use of such modules the productivity of operations of cold punching can be essentially raised(essentially increased). In work the automated complex of cold punching is considered(examined), in which the transport operations are carried out by(with) the electromechanical module of a linear type, the ways of increase of speed of such complex are considered/.

Key words: the electromechanical module, linear moving, cold punching, productivity.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРЕНОСНОГО ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ

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

Аннотация. *Исследованы два типа оптимальных вращений вокруг неподвижной оси упругого консольного стержня с распределенной массой при повороте на заданный угол. Релейное и синусоидальное управления реализуют оптимальные переносные вращательные движения из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя за минимально возможное время, которое находится из моментных соотношений в относительном движении – колебаний упругого объекта с одной степенью свободы. Разработан стенд и обоснована методика экспериментальной проверки оптимального переносного вращательного движения консольного стержня с распределенной массой по его длине (учет первой модели колебаний).*

Ключевые слова. *Упругая система, оптимальное управление, переносное и относительное движения, экспериментальная проверка.*

Теории оптимального управления и ее приложениям в технике посвящены работы [1-10].

В [11-15] исследован класс оптимальных управлений переносным поступательным и вращательным движением упругих систем с конечным и бесконечным числом степеней свободы. До настоящего времени экспериментальным исследованиям оптимального вращательного движения упругих систем должного внимания не уделялось.

Например, для последующего экспериментального исследования поведения упругого стержня необходимо предварительно оценить погрешности задания геометрических и физических параметров образца, точность воспроизведения управлений, влияние линейно-вязкого сопротивления и других факторов на достижение цели движения при оптимальном повороте до конечного состояния абсолютного покоя, как суммы переносного и относительного.

Цель исследований – моделирование динамического поведения упругого стержня при реализации оптимальных переносных вращательных управлений (ускорений) в виде синусоидальной и релейной функций, обоснование методики экспериментальной проверки теоретических результатов.

Постановка задач управления вращательным движением объекта состоит в следующем: найти такие параметры реверсионно конструируемого управления [12-14], которые обеспечивают за минимально возможное время угловое перемещения объекта из исходного состояния абсолютного по-

коя в конечное состояние абсолютного покоя с допущением колебаний в относительном движении только во временном интервале движения.

Определение частот собственных колебаний консольного стержня.

Конструирование оптимальных управлений основано на учёте частоты собственных колебаний (или частоты первого тона – в случае распределённой массы стержня). Определение и анализ частоты иллюстрируется на примерах.

1. Стержень с сосредоточенной массой M на конце, но без учёта распределённой массы по длине. В этом случае частота $\omega_1 = \sqrt{\frac{C}{M}}$, где коэффициент жёсткости $C = \frac{3EI}{L^3}$; E – модуль упругости первого рода; I – осевой момент инерции поперечного сечения; d – диаметр; L – длина консольного образца (с жёстким закреплением одного конца и сосредоточенной массой M на другом конце).

Для сосредоточенной массы принято: $M = \frac{\pi d^2}{4} \gamma \cdot L$, где γ – плотность материала. Исходные данные: $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $L = 1,05$ м; $\gamma = 7,8 \cdot 10^3$ кг / м³. Результаты: сосредоточенная масса $M = 0,1608$ кг; частота $\omega_1 = 10,19$ с⁻¹; период $T_1 = 2\pi / \omega_1 = 0,617$ с.

2. Определение частоты и периода (первого тона) для стержня с распределённой массой:

$$m_0 = M / L = 0,1608 \text{ кг / м};$$

$$\omega_1 = 1,875^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{m_0 L^4}} = 20,68 \text{ с}^{-1}; T_1 = 2\pi / \omega_1 = 0,304 \text{ с}.$$

3. Частота ω_1 и период T_1 с учётом распределённой массы m_0 и сосредоточенной M и прежних исходных данных. Задача сводится к решению трансцендентного уравнения.

Результат: $\omega_1 = 9,1615$ с⁻¹; $T_1 = 0,686$ с. Интересно, что частота первого тона и период близки к первому случаю – для консольного стержня с сосредоточенной массой на конце.

Для экспериментальной проверки динамики оптимального движения предпочтителен вариант 2, где не предполагается использования дополнительной массы. Варьирование геометрических (L , d) и физических (E , γ) параметров в окрестности 5-10% по отношению к проектируемым расчётным значениям частоты (и периода) собственных колебаний приводит к их изменению на 3-5%. При минимальном времени движения, когда число колебаний мало, влияние линейно-вязкого сопротивления не существенно.

Конструирование синусоидального (кососимметричного) оптимального управления типа разгон – торможение.

Предполагается следующее угловое ускорение стержня $E_e = E \sin(pt)$, где $E, p = \text{const}$. После двукратного интегрирования с учётом краевых условий $\varphi_e(0) = 0, \omega_e(T) = 0, \varphi_e(T) = \varphi^*$, где T – общее время движения, определения произвольных постоянных, параметра E при условии $T = 2\pi / p$, получено:

$$E_e = \frac{\varphi^* p^2}{2\pi} \cdot \sin(pt), \quad \varphi_e = \frac{\varphi^*}{2\pi} \cdot [pt - \sin(pt)], \quad \omega_e = \frac{\varphi^* p}{2\pi} \cdot [1 - \cos(pt)].$$

Дифференциальное уравнение относительного движения

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} + k^2 x_r = -\frac{\varphi^* p^2}{2\pi} \cdot \sin(pt)$$

описывает, с учётом только первой моды, вынужденные колебания упругого стержня около вращающийся продольной оси.

При нулевых начальных условиях перемещение $x_r(t)$ и скорость $\dot{x}_r(t)$ конца стержня:

$$x_r(t) = \frac{\varphi^* p^2}{2\pi(k^2 - p^2)} \cdot \left[\frac{p}{k} \cdot \sin(kt) - \sin(pt) \right],$$

$$\dot{x}_r(t) = \frac{\varphi^* p^3}{2\pi(k^2 - p^2)} [\cos(kt) - \cos(pt)].$$

Моментные соотношения $x_r(T) = 0, \dot{x}_r(T) = 0$ для данного управления (в результате преобразований) принимают наиболее простой вид: $\sin(kT) = 0, \cos(kT) - 1 = 0$.

Общие корни системы трансцендентных уравнений следующее: $kT = n\pi$, где $n = 2, 4, 6 \dots$. Примем $n = 4$; тогда $kT = 4n\pi$, и $T = 4\pi / k$ или $2\pi / p = 4\pi / k$, т.е. частота управляющего воздействия $p = k / 2$.

Для $k = 20,68 \text{ с}^{-1}$, $T = 2T_1 = 0,608 \text{ с}$, $\varphi^* = \pi / 2$, графики переносного вращательного $E_e(t), \omega_e(t), \varphi_e(t)$ изображены на **Рис.1**, а графики относительного движения $x_r(t)$ и $\dot{x}_r(t)$ – на **Рис.2**.

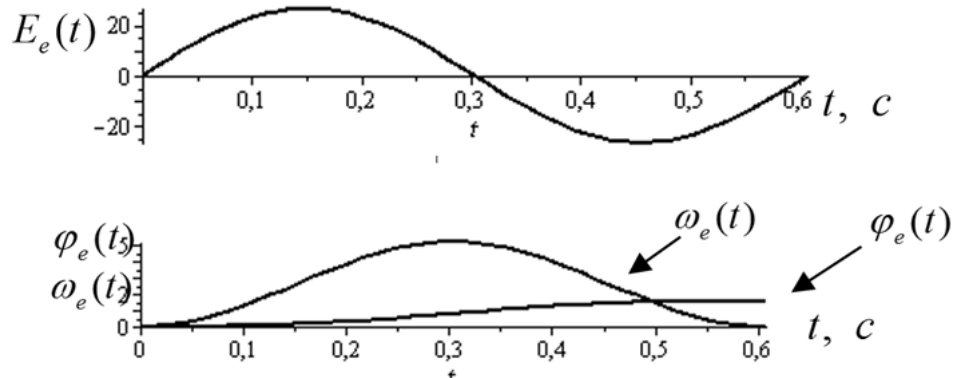


Рис.1 – Графики переносного вращательного движения $E_e(t)$, $\omega_e(t)$, $\varphi_e(t)$

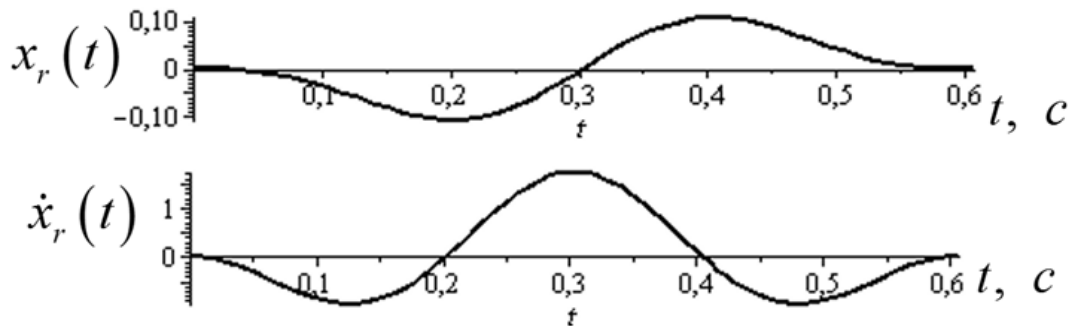


Рис.2 – Графики относительного движения $x_r(t)$ и $\dot{x}_r(t)$

В момент времени $T = 0,608\text{с}$, после поворота стержня на $\varphi^* = \pi / 2$, наступает (теоретически) абсолютный покой.

Релейное оптимальное управление (угловое ускорение) вращением стержня.

График ускорения (управления) вращательного переносного движения изображен на Рис.3.

После интегрирования уравнения $\frac{d^2\varphi_e}{dt^2} = E_e(t)$ на каждом участке и учёта краевых условий в точках $t=0$, $t=T/2$ и $t=T$, получено максимальное по абсолютной величине значение релейного управления

$$E = \frac{4\varphi_e^*}{T^2}, \text{ где } \varphi_e^* - \text{максимальный угол поворота.}$$

Теперь релейное управление с учётом функции Хевисайда записывается следующим образом:

$$E_e(t) = \frac{4\varphi_e^*}{T^2} \left[H(t) - 2H\left(t - \frac{T}{2}\right) + H(t - T) \right].$$

При прежних исходных данных, опустив громоздкие выражения, для угловой скорости и угла поворота, графики изображены на **Рис.4, Рис.5**.

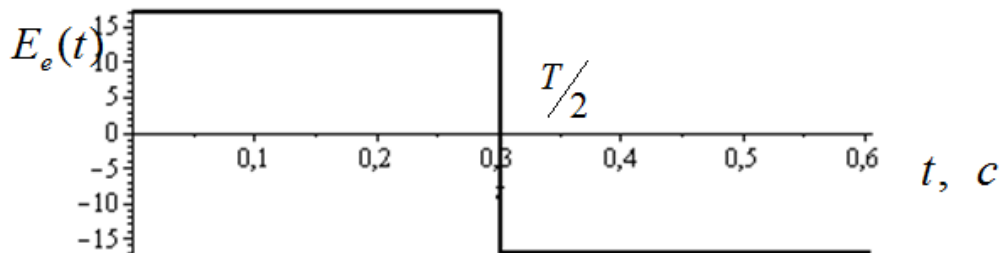


Рис.3 – Релейное управление

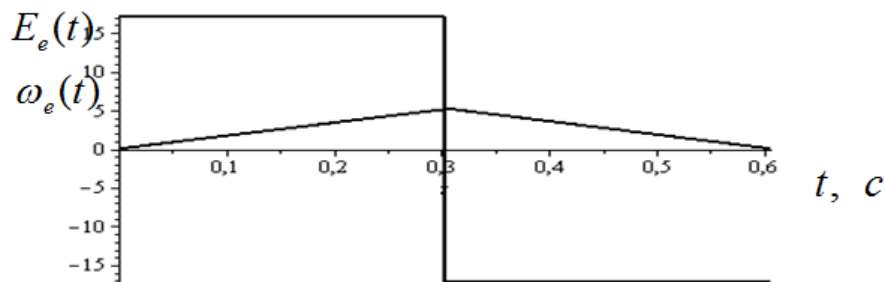


Рис.4 – Графики $E_e(t)$, $\omega_e(t)$,

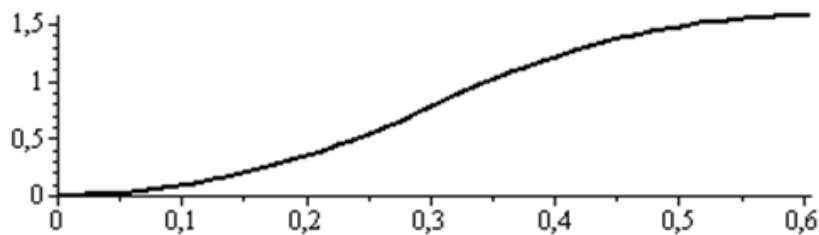


Рис.5 – График $\varphi_e(t)$

Графики относительного перемещения $x_r(t)$ и скорости $\dot{x}_r(t)$ в случае релейного управления изображены на **Рис.6**. Как и в случае синусоидального управления, при релейном управлении за время T наблюдается абсолютный покой при достижении конечного положения, определяемого предельным углом $\varphi_e(T) = \varphi_e^* = \pi / 2$.

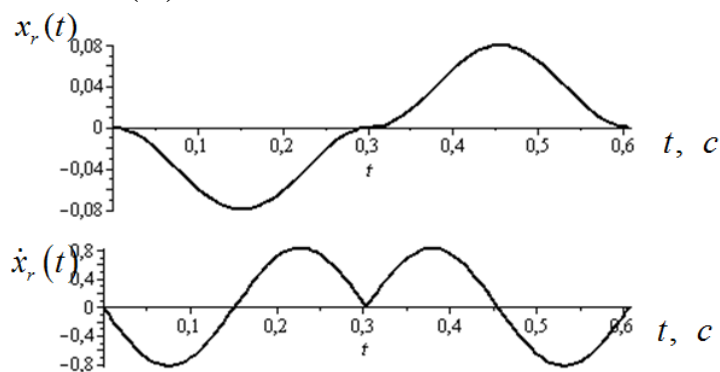


Рис.6 – Графики $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$

Для дополнительной проверки влияния погрешности исходных данных на характер колебаний использована модель Simulink, структурная схема которой изображена на **Рис.7**. Схема отражает решение неоднородного дифференциального уравнения относительного движения с учетом оптимального управления, линейно-вязкого сопротивления, детерминированных и случайных возмущений, погрешностей в задании исходных данных, их влияния на достижение абсолютного покоя свободного конца стержня при достижении заданного угла поворота за приемлемое минимально возможное время.

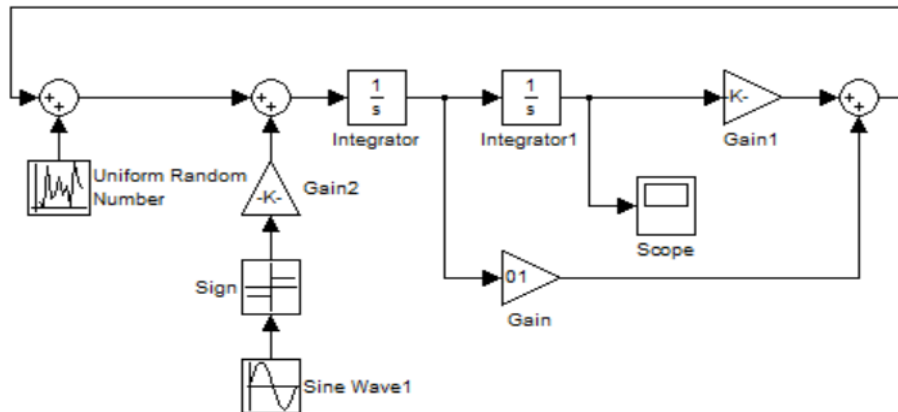


Рис.7 – Структурная схема модели относительного движения упругого объекта

Программа реализации оптимального вращения консольного стержня написана на языке MELFA-BASIK IV для промышленного робота фирмы Mitsubishi Electric (**Рис.8**). На рисунке к роботу жестко прикреплен экспериментальный образец (консольный нежесткий стержень) с возможностью поворота на $\pi / 2$ при реализации программы управления движением. Ниже приведена программа реализации вращения стержня.

```

15 OVRD 100
20 IF M_IN(1)=1 THEN
25 ACCEL 50,50
30 MVS P3
40 ENDIF
50 GOTO 60
60 IF M_IN(3)=1 THEN
70 MVS P2
80 ENDIF
90 GOTO 15
    
```



Рис.8 – Экспериментальный стенд для исследования оптимального вращения стержня конечной жесткости

Методика проведения экспериментальных исследований включает разработку управляющей программы на языке MELFA-BASIK IV, настройку списка позиций (Position list) и анализ результатов измерений с использованием функции Genfit в Mathcad с вычислением среднеквадратичных отклонений экспериментальных данных от полученных теоретически. Для регистрации относительных ускорений применим Arduino Mega 2560 и акселерометр MPU 6050.

Выполнение эксперимента по реализации поступательного оптимального (релейного) управления перемещением упругой системы, завершение цикла экспериментальных исследований вращательным движением позволит перейти к разработке практических рекомендаций для проектирования манипуляторов минимальной масс (конечной жесткости) с использованием специальных кососимметричных управлений.

Библиографический список

1. Воронов А.А. Теория автоматического управления. ч.II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М., Высш. школа, 1977. – 288с.
2. Петров Ю.П. Обеспечение достоверности и надежности компьютерных расчетов. – СПб: БХВ, 2008. – 160с.
3. Портнягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Портнягин и [др]. – М.: Физматиз, 1961. – 392с.
4. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536с.
5. Теория автоматического управления / Под ред. А.В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 1972. – Т.II. – 432с.
6. Абдулаев, Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Н.Д. Абдулаев, Ю.П. Петров. – Л.:Энергоатомиздат, 1985. – 240с.
7. Черноусько, Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 387с.
8. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832с.
9. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304с.
10. Карновский И.А., Почман Ю.М. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем – К. «Высш. школа», 1982. – 416 с.
11. Бохонский, А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения. / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский. - Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь, изд-во Сев НТУ, 2007. – 296 с.
12. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисление в меха-

нике: монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь, СевНТУ, 2007. – 296с.

13. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления / А. Бохонский, – Palmarium Academic Publishing. Deutschland/ Германия, 2013 – 77р.
14. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. Монография. – М. Вузовский учебник. ИНФРА. – М., 2016. – 174с.
15. Bokhonsky, A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion/ Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.

Bibliograficheskiy spisok

1. Voronov A.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. ch.II. Teoriya nelinejnyh i special'nyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. – М., Vyssh. shkola, 1977. – 288s.
2. Petrov YU.P. Obespechenie dostovernosti i nadezhnosti komp'yu-ternyh raschetov. – SPb: BHV, 2008. – 160s.
3. Portnyagin, L.S. Matematicheskaya teoriya optimal'nyh processov / L.S. Portnyagin i [dr]. – М.: Fizmatiz, 1961. – 392s.
4. Solodovnikov, V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomati-cheskogo regulirovaniya / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. YAkovlev. – М.: Mashinostroenie, 1985. – 536s.
5. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. A.V. Netushila. – М.: Vysshaya shkola, 1972. – Т.II. – 432с.
6. Abdulaev, N.D. Teoriya i metody proektirovaniya optimal'nyh regula-torov / N.D. Abdulaev, YU.P. Petrov. – L.:Energoatomizdat, 1985. – 240s.
7. CHernous'ko, F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, L.D. Akunlenko, B.N. Sokolov. – М.: Nauka, 1980. – 387s.
8. Dorf, R. Sovremennye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop; per. s angl. B.I. Kopylova. – М.: Laboratoriya bazovyh znaniy, 2002. – 832s.
9. Krut'ko, P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemyh sistem: linejnye modeli. – М.: Nauka, 1987. – 304s.
10. Karnovskij I.A., Pochman YU.M. Metody optimal'nogo upravle-niya kolebaniyami deformiruemyh sistem – К. «Vyssh. shkola», 1982. – 416 s.
11. Bohonskij, A.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deform-iruemyh ob"ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya. / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevskij. - Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Se-vastopol', izd-vo Sev NTU, 2007. – 296 s.
12. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischislenie v mekha-nike: monografiya / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – Sevastopol', SevNTU, 2007. – 296s.
13. Bohonskij A.I. Aktual'nye zadachi variacionnogo ischisleniya / A. Bohonskij, – Palmarium Academic Publishing. Deutschland/ Germa-niya, 2013 – 77р.

14. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti. Mono-grafiya. – M. Vuzovskij uchebnik. INFRA. – M., 2016. – 174s.
15. Bokhonsky, A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion/ Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.

¹*Бохонский Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

²*Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц., mihail.maistrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

³*Рыжков Александр Игоревич, аспирант, Севастополь, Севастопольский государственный университет.*

MODELING OF THE OPTIMAL PORTABLE ROTATION OF AN ELASTIC SYSTEM

A.I. Bokhonsky, M.M Maistrishin., A.I.Ryzhkov

Abstract. Two optimal rotation motions around the fixed axis at a given angle of the elastic cantilever rod were studied. Relay and sinusoidal controls were applied for implementation of the optimal portable motion from the initial state of rest to the final state of rest in the minimum possible time, which was found from the moment relations in the relative motion – oscillation of an elastic object with one degree of freedom.

Keywords: elastic system, one and two degrees of freedom, optimal control, portable and relative motion, experimental verification.

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

Maystrishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, e-mail: mihail.maistrishin@gmail.com Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

Ryzhkov Aleksandr Igorevich, graduate student, e-mail: ryzhkov2206@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

ТЕРМИНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ

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

Аннотация. Рассматривается применение терминального подхода к построению управления манипулятором антропоморфного робота SAR-401. В основу положен принцип использования терминального и регрессионного полиномов на основе данных из базы знаний, полученных по результатам обучения робота методом *Programming by Demonstration* для генерации назначенных траекторий движения. Приведены основные результаты моделирования системы в пакете Matlab. Даны рекомендации по использованию такого подхода для встроенных систем.

Ключевые слова. Терминальное управление, регрессионная модель, антропоморфный робот, робототехническая система, манипулятор.

Выполнение сложных операций манипуляторами робототехнических систем в различных средах требуют внедрения манипуляторов с большим количеством степеней свободы. Все большее распространение в робототехнических комплексах получают антропоморфные манипуляторы. Это связано с тем, что при взаимодействии робота и человека желательно, чтобы манипуляторы двигались согласно движению руки человека. Люди должны быть в состоянии предсказать поведение манипулятора, основываясь на собственном опыте. Одним из подобных роботов является антропоморфный робот SAR-401 [1], который является прототипом разрабатываемых робототехнических комплексов (РТК) подводного и космического назначения.

Решение задачи построения управления многозвенным (антропоморфным) манипулятором с кинематической избыточностью имеет несколько подходов.

Первый подход, предназначенный для моделирования динамики системы, основан на решении сложных систем нелинейных дифференциальных и конечно-разностных уравнений [2]. Данный подход весьма нетривиален по ряду причин:

– во-первых, математические модели функционально-сложных РТК носят грубый, приближенный характер, не учитывающий различные нелинейности, возникающие из-за насыщения двигателей, дрейфы из-за различного влияния трения, в т.ч. из-за износа оборудования и др. Математические модели сложных РТК с многозвенными манипуляторами имеют значительные ограничения. Различные экземпляры одной и той же модели робота могут иметь различные математические модели в

зависимости от их износа и калибровки. Сложность решения указанных систем уравнений ограничивает их использование в реальном режиме времени;

- во-вторых, проектирование РТК, функционирующих в сложной среде, например морской, требует учета воздействия внешней среды (течений, волн и т.д.);

- в-третьих, математическая модель РТК может быть попросту не известна.

Второй подход, предназначенный для моделирования кинематики системы, основан на применении метода преобразования координат Денавита–Хартенберга [3], позволяющего решить прямую задачу кинематики определения координат положения в пространстве манипулятора и захвата.

Применение метода Денавита–Хартенберга для многозвенного манипулятора требует значительных упрощений. В противном случае, многозвенность манипулятора предполагает учет большого количества параметров, что в свою очередь приведет к большому количеству вычислений, не позволяющих реализовать управление в реальном масштабе времени. Также, данный подход не отражает требования к динамике манипулятора. Так, например, при решении обратной задачи кинематики может возникнуть неопределенность, т.к. захват может попасть в одну и ту же точку пространства разными путями.

Третий подход основан на идеологии обучения робота «Programming by Demonstration» (PbD) [4]. Подход основан на обучении робота выполнению различных операций по результатам действия оператора-учителя. Подход PbD обеспечивает естественный способ программирования роботов, показывая желаемую задачу. Он исключает указанные выше недостатки первого и второго подходов, что делает его интересным для реализации при построении управления для антропоморфного манипулятора, особенно учитывая требования к функционированию манипулятора в условиях неопределенности.

В настоящей статье рассматривается построение терминального управления на основе обучения РТК с многозвенными манипуляторами выполнению типовых действий в рамках заданного сценария.

При получаемых от копирующего костюма данных формируется база знаний, содержащая временные ряды, которые соответствуют изменению углов поворота исполнительных устройств РТК. Данные содержат решение «целевой задачи». На основе этих данных могут быть получены зависимости, отражающие динамику изменения управляющих параметров во времени, что поможет решить задачу нахождения траектории движения манипулятора [4]. Например, зависимость угла поворота манипулятора РТК в относительных координатах имеет вид, приведенный на **Рис.1**.

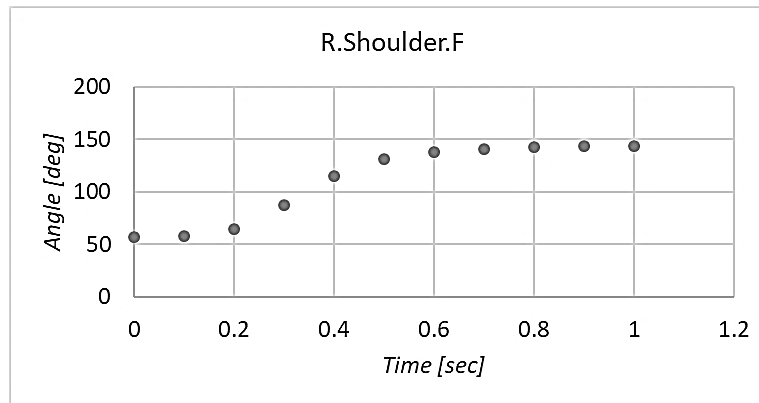


Рис.1 – Экспериментальные данные манипулятора РТК

Приведенный на **Рис.1** временной ряд характеризуется начальным и конечным состоянием в моменты времени $t_0 = 0 \text{ sec}$ и $t_f = 1 \text{ sec}$. Начальное значение угла поворота составляет $\varphi_0 = 57.436 \text{ deg}$, а конечное – $\varphi_f = 144.088 \text{ deg}$. Потребуем, чтобы угловая скорость и угловое ускорение управляемого параметра в начальный и конечный моменты времени были равны нулю: $\dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_f = 0 \text{ deg/sec}$; $\ddot{\varphi}_0 = \ddot{\varphi}_f = 0 \text{ deg/sec}^2$.

Последнее требование характерно для выполнения операции манипулятором. Пример характеристики угла, угловой скорости и углового ускорения манипулятора с заданными начальными и конечными условиями приведен на **Рис.2**.

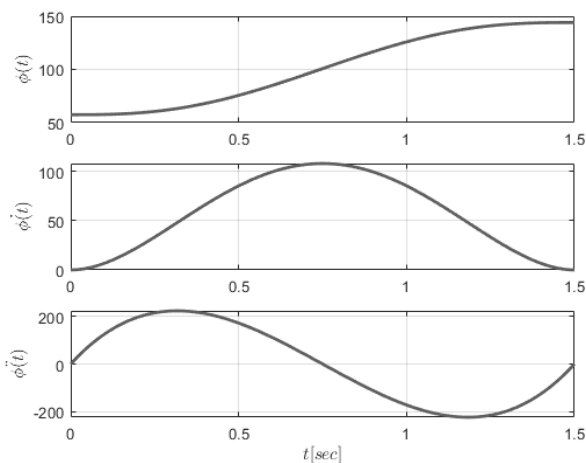


Рис.2 – Пример характеристики угла, угловой скорости и углового ускорения манипулятора

Решение задачи осуществляется при помощи нахождения по значениям из базы знаний полинома, описывающего изменение угла поворота манипулятора во времени таким образом, что значения полинома в начальный и конечный моменты времени будут полностью совпадать с заданными краевыми условиями $X_0 = [\varphi_0 \ \dot{\varphi}_0 \ \ddot{\varphi}_0]$ и $X_f = [\varphi_f \ \dot{\varphi}_f \ \ddot{\varphi}_f]$, при условии достижения этих условий за заданный интервал времени t_f .

В общем виде искомый полином можно записать как

$$\hat{\varphi}(t) = \sum_{j=0}^r a_j t^j, \quad (4)$$

где t – независимая переменная (время), $\varphi(t)$ – зависимая переменная (угол поворота), a_j – искомые коэффициенты полинома степени r .

Подход, использующий полином вида (4) для построения терминального управления изложен в [5]. Этот подход допустим для решения поставленной задачи, т.к. ограничения на траекторию накладываются только на начальном и конечном этапах, а промежуточная траектория должна быть похожа на экспериментальную, не выходя из рабочей области.

В общем виде траектория может быть описана соотношениями вида

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{i=0}^{r+n-1} i c_i t^i \\ \dot{y}(t) &= \sum_{i=1}^{r+n-1} i c_i t^{i-1} \\ \ddot{y}(t) &= \sum_{i=2}^{r+n-1} \frac{i!}{(i-2)!} c_i t^{i-2} \end{aligned} \quad (5)$$

где r – размер вектора начальных условий (в нашем случае $r = 3$), n – размер вектора конечных условий ($n = 3$), коэффициенты c_i определяются исходя из граничных условий, накладываемых на начальную и конечную точку назначенной траектории движения и заданного времени перехода в терминальное состояние.

Коэффициенты c_i , могут быть найдены как решение системы алгебраических уравнений, построенной на основе полиномиального представления (5) и его производных, а также на основе заданных граничных условий, определяемых векторами $X(t_0)$ и $X(t_f)$. В общем виде данная система имеет вид

$$\left. \begin{aligned} x(t_0) &= c_0 + c_1 t_0 + c_2 t_0^2 + \dots + c_n t_0^n \\ x^{(1)}(t_0) &= c_1 + 2c_2 t_0 + \dots + n c_n t_0^{n-1} \\ &\dots \\ x^{(n)}(t_0) &= n! c_n \\ x(t_f) &= c_0 + c_1 t_f + c_2 t_f^2 + \dots + c_n t_f^n \\ x^{(1)}(t_f) &= c_1 + 2c_2 t_f + \dots + n c_n t_f^{n-1} \\ &\dots \\ x^{(n)}(t_f) &= n! c_n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для заданного временного ряда построенный полином может быть представлен в виде

$$\varphi(t) = 68.466t^5 - 256.747t^4 + 256.747t^3 + 57.436 \quad (7)$$

Графическая зависимость, соответствующая данному полиному, приведена на **Рис.3**. Отметим, что расчетная кривая, полученная с помощью найденного полинома, полностью совпадает с

экспериментальными данными только на концах временного интервала – в точках t_0 и t_f . Тем не менее, выполняется главное требование – ошибка между экспериментальными данными и полиномиальной зависимостью в начальной и конечной точках интервала равна нулю, а время достижения конечного интервала равно заданному. Траектория, отвечающая этим условиям, называется терминальной [5-7].

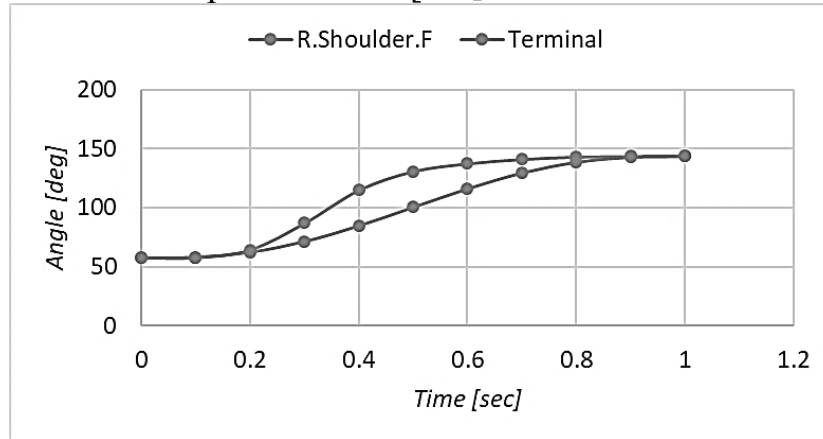


Рис.3 – Экспериментальные данные и полиномиальная терминальная траектория

В качестве альтернативы рассмотрим применение распространенного подхода нахождения полиномиального представления на основе регрессионной модели с помощью обучения нейронной сети.

Для решения этой регрессионной задачи воспользуемся библиотекой численных методов Accord.NETFramework. Данная библиотека содержит описание класса реализацию класса PolynomialLeastSquares который использует метод наименьших квадратов для построения наилучшей, с точки зрения минимизации ошибки, модели системы. При создании экземпляра класса указывается желаемая степень итогового полиномиального представления. (в отличие от предыдущего терминального метода, где степень полинома определяется количеством начальных и конечных условий и не может быть изменена произвольно).

В примере, по аналогии создадим экземпляр класса с полиномом 5-й степени. Экземпляру класса передается обучающая выборка, которая состоит из набора значений независимой переменной (для рассматриваемой задачи в качестве независимой переменной выступают отсчеты времени) и соответствующего набора атрибутов (для рассматриваемой задачи набор атрибутов представляет собой значения угла поворота двигателя узла манипулятора РТК).

В результате расчетов получен полином 5-го порядка, который имеет вид:

$$\varphi(t) = -470.865t^5 + 2119620t^4 - 3149.538t^3 + 1789.2t^2 - 202.475t + 58.648. \quad (8)$$

Графическая зависимость, соответствующая данному полиному, приведена на **Рис.4**.

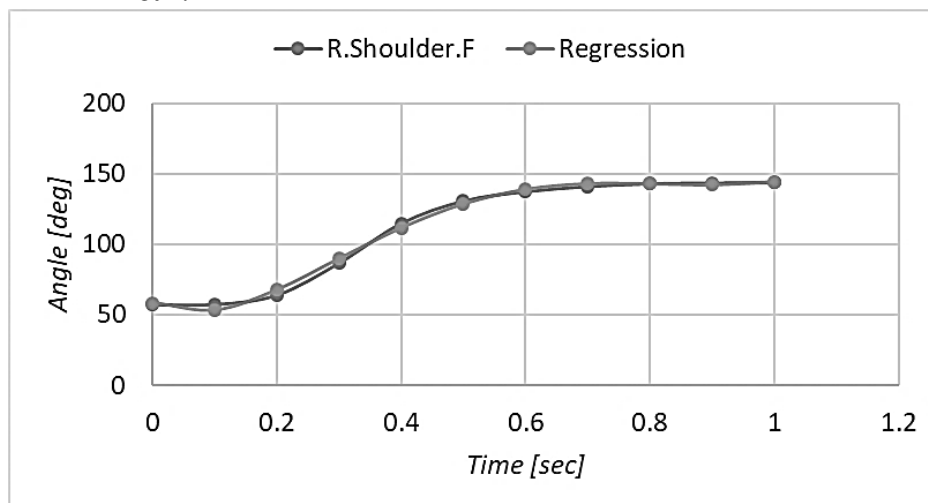


Рис.4 – Экспериментальные данные и траектория, полученная с помощью регрессионной модели при степени полинома равной 5

Из **Рис.4**. видно, что несмотря на высокую степень соответствия между исходной экспериментальной траекторией и траекторией построенной для регрессионной модели, на концах интервала ошибка между экспериментальными и расчетными значениями не является нулевой, также видны значительные отклонения на начальном и конечном участках траектории, вызванных так называемым переобучением модели.

Попытка уменьшить степень полинома при применении регрессионной модели с помощью обучения нейронной сети, например, полином 3-го порядка дает неприемлемые с точки зрения точности результаты, т.к. краевые условия на концах траектории практически не соблюдаются.

Вывод. На основе данных из базы знаний, предлагается построить терминальное управление манипулятором РТК, определяющее динамику изменения управляющих параметров во времени, с точки зрения достижения заданных краевых условий за заданный интервал времени, что поможет решить задачу «траектория движения манипулятора». Предложенный подход воспроизведения назначенных движений манипулятора РТК позволяет хранить в базе знаний не весь временной ряд экспериментальной траектории, а лишь коэффициенты полиномиальной терминальной траектории.

Библиографический список

1. Zhidenko, I.G. Basis of structural scheme selection of space application robots / I.G. Zhidenko, I.M. Kutlubayev, A.A. Bogdanov, V.B. Sychkov // Reshetnev's readings – 2017. – P. 278-280.

2. Robot learning. Handbook of robotics Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.) / J. Peters, D. Lee, J. Kober, J. Andrew Bagnell, S. Schaal // Springer-Verlag Berlin Heidelberg – 2016. – 2227 p.
3. Munch, S. Robot Programming by Demonstration (RPD) – Using Machine Learning and User Interaction Methods for the Development of Easy and Comfortable Robot Programming Systems / S. Munch, J. Kreuziger, M. Kaiser, R. Dillmann // In: Proceedings of the 24th International Symposium on Industrial Robots – 2019. – P. 658-696.
4. Skoglund, A. Programming by Demonstration of Robot Manipulators // Orebro University – 2009. – P. 200-256.
5. Батенко А.П. Системы терминального управления. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с.
6. Антипин, А.С. О краевой задаче терминального управления с квадратичным критерием качества / А.С. Антипин, Е.В. Хорошилова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика, 2014. – №8. – С. 7–28.
7. Пшихопов, В.Х. Алгоритмы терминального управления подвижными объектами мультикоптерного типа / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, Б.В. Гуренко // Мехатроника, автоматизация, управление, 2019 – №20 (1). – С. 44-51.

Bibliograficheskiy spisok

1. Zhidenko, I.G. Basis of structural scheme selection of space application robots / I.G. Zhidenko, I.M. Kutlubayev, A.A. Bogdanov, V.V. Sychkov // Reshetnev's readings – 2017. – P. 278-280.
2. Robot learning. Handbook of robotics Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.) / J. Peters, D. Lee, J. Kober, J. Andrew Bagnell, S. Schaal // Springer-Verlag Berlin Heidelberg – 2016. – 2227 p.
3. Munch, S. Robot Programming by Demonstration (RPD) – Using Machine Learning and User Interaction Methods for the Development of Easy and Comfortable Robot Programming Systems / S. Munch, J. Kreuziger, M. Kaiser, R. Dillmann // In: Proceedings of the 24th International Symposium on Industrial Robots – 2019. – P. 658-696.
4. Skoglund, A. Programming by Demonstration of Robot Manipulators // Orebro University – 2009. – P. 200-256.
5. Batenko A.P. Sistemy terminal'nogo upravleniya. – М.: Radio i svyaz', 1984. – 160 s.
6. Antipin, A.S. O kraevoy zadache terminal'nogo upravleniya s kvadraticnym kriteriem kachestva / A.S. Antipin, E.V. Horoshilova // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika, 2014. – №8. – S. 7–28.
7. Pshihopov, V.H. Algoritmy terminal'nogo upravleniya podvizhnymi ob"ektami mul'tikopternogo tipa / V.H. Pshihopov, M.YU. Medvedev, B.V.

Gurenko // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie, 2019 – №20 (1). – S. 44-51.

¹Крамарь Вадим Александрович, д-р техн. наук, проф., kramar@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

²Альчаков Василий Викторович, канд. техн. наук, доц., Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

³Крамарь Олег Александрович, в.н.с., Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

TERMINAL APPROACH TO CONTROL OF ANTHROPOMORPHIC MANIPULATOR

V.A. Kramar, V.V. Alchakov, O.A. Kramar

The application of the terminal approach to the construction of the manipulator control of the anthropomorphic robot SAR-401 is considered. The principle of using terminal and regression polynomials on the basis of data from the knowledge base obtained by Programming by Demonstration method for generation of the assigned motion trajectories is put in a basis. The main results of system modeling in Matlab package are given. This approach is recommended for embedded systems.

Key words: terminal control, regression model, anthropomorphic robot, robotic system, manipulator.

Kramar Vadim Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, kramar@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Alchakov Vasiliy Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, alchakov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Kramar Oleg Alexandrovich, researcher, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПРИБОР НА БАЗЕ ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО РАСХОДОМЕРА

Васютенко А.П.¹

Аннотация. Приведен анализ характеристик пневматических преобразователей, сформулирована цель работы, дано теоретическое обоснование работы пневмотерморезистивного расходомера, получены выражения для – мощности и току пневмотерморезистивного преобразователя и, связывающие между собой входные и выходные параметры с учётом конструктивных особенностей расходомера. Приводится пневмо-кинематическая схема прибора активного контроля диаметра вала в процессе шлифования.

Ключевые слова. Измерение, сопло, преобразователь, прибор активного контроля, расходомер.

Большое распространение в машиностроении получили измерительные приборы, основанные на пневматическом принципе измерения. Высокая чувствительность и точность пневматических измерительных систем позволяет разрабатывать приборы, реагирующие на изменение размера изделия в пределах долей микрометра. Пневматический принцип действия удобен для бесконтактного измерения и дистанционной передачи результатов измерений. Мощный измерительный сигнал (давление) в большинстве случаев не требует дополнительного усиления, что упрощает конструкцию приборов. При помощи пневматических устройств осуществляются математические операции с запоминанием и записью результатов. В качестве положительных свойств пневматического принципа действия следует отметить также малую зависимость результатов измерений от вибрации металлорежущего оборудования и воздействия охлаждающей жидкости, высокую надежность, простоту и безопасность эксплуатации пневматических измерительных средств [1-3].

Целью статьи является разработка схемы и теоретическое обоснование пневматического прибора для линейных измерений на базе терморезистивного расходомера

На **Рис.1** представлена пневмо-кинематическая схема прибора активного контроля диаметра вала в процессе шлифования [4-6]. Измерительная станция включает следующие основные узлы: измерительную скобу для контроля наружного диаметра, шариковую направляющую, стойку для крепления измерительной скобы, отсчетно-командное устройство.

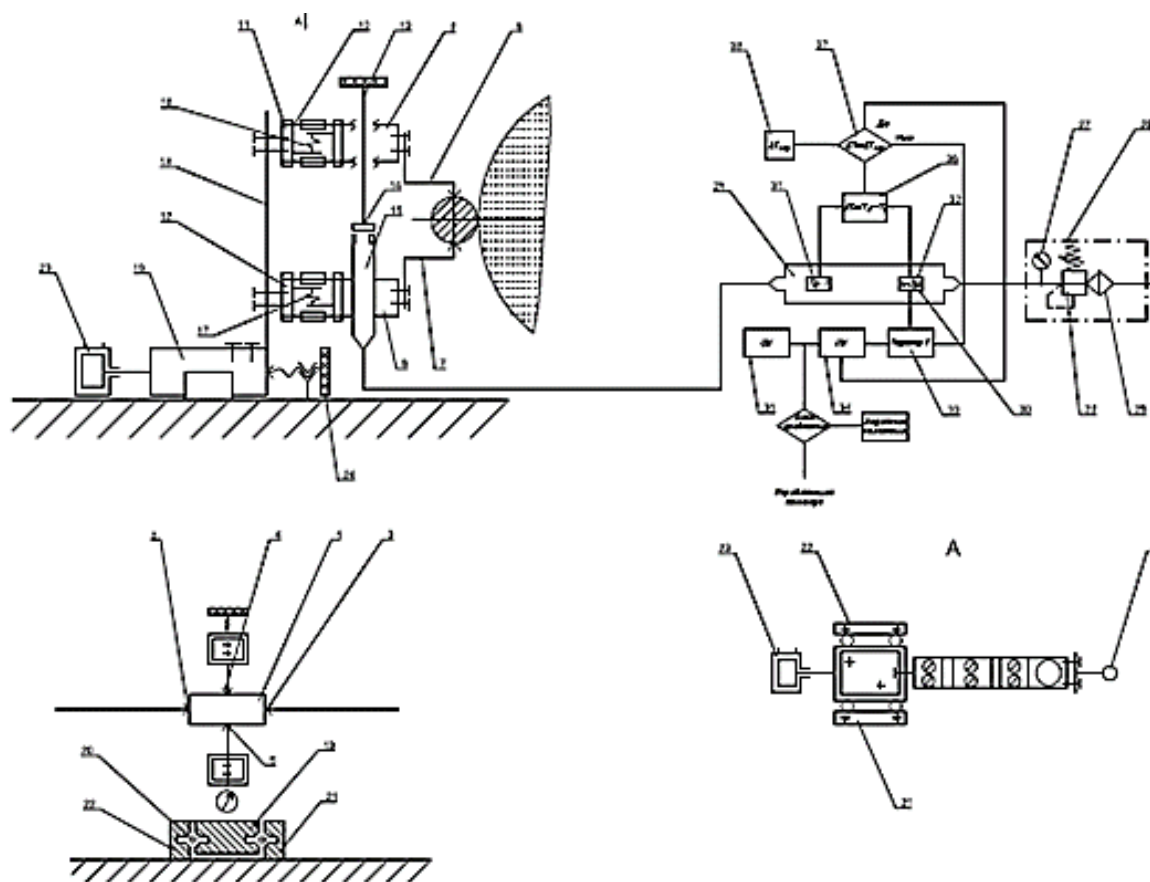


Рис.1 – Пневмо-кинематическая схема прибора активного контроля диаметра вала

Принцип работы следующий. Базирование детали 1 осуществляется в центрах станка 2 и 3. Измерительные наконечники 4, 5 после подвода измерительной скобы устанавливаются на поверхность обрабатываемой детали. Наконечники установлены в губках 6, 7, которые закреплены на подвижных каретках 8, 9 пружинных параллелограммов. Каретки 8, 9 подвешены к неподвижным кареткам 11, 12 с помощью прямых плоских пружин 10. В подвижной каретке 8 установлен настроечный винт 13 с заслонкой 14, а в каретке 9 измерительное сопло 15. Измерительные усилия создаются пружинами 16, 17. Измерительная скоба крепится с помощью угольника 18 на подвижной каретке 19 шариковой направляющей, которая включает в себя шарики 20, и неподвижные направляющие 21 и 22. Перемещение подвижной каретки 19 осуществляется пневмоцилиндром 23 до регулируемого упора 24. Измерительное сопло 15 соединено с расходомером 25. Воздух к расходомеру подается от блока подготовки 26, который включает в себя манометр 27, регулятор – стабилизатор давления воздуха 28 и фильтр 29. Расходомер включает в себя нагревательный элемент 30, терморезисторы 31 и 32.

На поверхности нагревателя 30 (его температура T_2) поддерживается постоянная разность температур между ним и потоком воздуха. Температура потока T_1 контролируется термопреобразователем 31, а нагревателя – термопреобразователем 32. Вычислительное устройство 36 определяет разность температур, которая должна поддерживаться постоянной.

$$T_2 - T_1 = \Delta t = \text{const.}$$

Электрическая энергия Рэл, используемая для поддержания постоянной разности температур потока и нагревательного элемента, характеризует расход воздуха, проходящего через расходомер. Схема расходомера включает регулятор температуры 33, пороговое устройство 34, подключающее отсчётное устройство 35 к регулятору температуры, когда измеренная разность температур ΔT будет равна заданной величине $\Delta T_{\text{зад}}$. Для этих целей преобразователь содержит вычислительное устройство 36, логический элемент 37 и задатчик 38.

В качестве первичного пневматического преобразователя используется измерительное сопло и заслонка. Сопло и заслонка образуют пневмосопротивления турбулентного типа, расходная характеристика которого описывается зависимостью [3]:

$$G = \alpha F_1 P_1 \sqrt{\left\{ \frac{2}{RT_1} \cdot \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\chi - 1}{\chi}} \right] \right\}} \quad (1)$$

Это выражение трудно использовать для практических расчётов, но его можно упростить и представить при малых перепадах давления воздуха на пневмосопротивлении в следующем виде:

$$G = \alpha F \varepsilon \sqrt{2 \rho_1 (P_1 - P_2)}, \quad (2)$$

где ρ_1 – плотность воздуха до сопротивления; ε – коэффициент, учитывающий изменение плотности воздуха при прохождении через пневмосопротивление; α – коэффициент расхода; F – площадь сечения сопротивления.

С учётом принятых обозначений при переходе к избыточным давлениям формула (2) переписывается так:

$$G = \alpha_2 F_2 \varepsilon_2 \sqrt{2 \rho_2 P}. \quad (3)$$

Площадь истечения воздуха через измерительное сопло равна:

$$F_2 = \pi d_2 z, \quad (4)$$

где d_2 – диаметр измерительного сопла; z – зазор между соплом и заслонкой.

Теперь выражение (3) примет вид:

$$G = \alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2 \sqrt{2 \rho_2 P}. \quad (5)$$

При переходе от массового расхода воздуха к объёмному получим:

$$Q = \frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2} \sqrt{2 \rho_2 P}. \quad (6)$$

Зависимость (6) описывает линейную статическую характеристику преобразователя.

Из выражения тепловой мощности W [7], теряемой проволокой диаметра d , и длиной l , при обтекании ее перпендикулярным потоком воздуха имеющего скорость V , следует

$$V = \left(\frac{\frac{W}{(T_{\Pi} - T_C) * l} - a}{b} \right)^2. \quad (7)$$

Объемный расход воздуха равен

$$Q = F * V, \quad (8)$$

где F – площадь поперечного сечения канала расходомера.

После подстановки V в формулу (8) получим:

$$Q = F * \left(\frac{\frac{W}{(T_{\Pi} - T_C) * l} - a}{b} \right)^2. \quad (9)$$

Подставим вместо Q выражение (6), тогда

$$\frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2} \sqrt{2 \rho_2 P} = F * \left(\frac{\frac{W}{(T_{\Pi} - T_C) * l} - a}{b} \right)^2. \quad (10)$$

Откуда зависимость $W=f(z)$, после преобразования, имеет вид,

$$\frac{\frac{W}{(T_{\Pi} - T_C) * l} - a}{b} = \frac{\sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2} * \sqrt{2 \rho_2 P}}}{\sqrt{F}}, \quad (11)$$

$$W = \left(\frac{b \cdot \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2} \cdot \sqrt{2 \rho_2 P}}}{\sqrt{F}} + a \right) \cdot (T_{\Pi} - T_c) \cdot l. \quad (12)$$

Используя значение тепловой мощности как $W = RI^2$ получим значение силы тока I

$$RI^2 = \left(\frac{b \cdot \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2} \cdot \sqrt{2 \rho_2 P}}}{\sqrt{F}} + a \right) \cdot (T_{\Pi} - T_c) \cdot l \quad (13)$$

$$I = \sqrt{\frac{\left(\frac{b \cdot \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2} \cdot \sqrt{2 \rho_2 P}}}{\sqrt{F}} + a \right) \cdot (T_{\Pi} - T_c) \cdot l}{R}}. \quad (14)$$

Выводы.

Зависимость (14) описывает статическую характеристику измерительной системы по току. Таким образом, исследование основных теоретических зависимостей, описывающих работу пневматического и терморезистивного преобразователя, позволило получить зависимости по мощности и току, описывающие работу измерительного устройства на базе терморезистивного преобразователя расхода, связывающие между собой входные и выходные параметры с учётом конструктивных особенностей расходомера и измерительной оснастки первичного пневматического преобразователя.

Библиографический список

1. Ахмеджанов, Р.А. Физические основы получения информации: учебное пособие/ Р.А. Ахмеджанов, А.И. Чередов.— М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013.— 212 с.
2. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. Пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 253 с.
3. Рабинович А.И. Пневматические устройства и системы в машиностроении. Справочник. — К.:Техника, 1970.- 396с.

4. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. Пособие. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с.
5. Этингوف М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках. – М.: АПР, 2016.–336 с.
6. Сурков, И.В. Применение КИМ для контроля линейных и угловых параметров зубчатых колес / И.В. Сурков, М.В. Мягкова // Оборудование и инструмент, 2007. – №5. – С. 86-89
7. Кремлевский П.П. Измерение расхода и количества жидкости, пара и газа/ П.П. Кремлевский . –М.: Изд-во стандартов, 1980г.-192с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Ahmedzhanov, R.A. Fizicheskie osnovy polucheniya informacii: uchebnoe posobie/ R.A. Ahmedzhanov, A.I. Cheredov.— М.: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transpor-te, 2013.— 212 s.
2. Gol'dshtejn A.E. Fizicheskie osnovy izmeritel'nyh preobrazovaniy: uchebn. Posobie. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2008. – 253 s.
3. Rabinovich A.I. Pnevmaticheskie ustrojstva i sistemy v mashino-stroenii. Spravochnik. – К.:Tekhnika, 1970.- 396s.
4. Legaev V.P. Pribory avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya v mashino-stroenii: ucheb. Posobie. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009. – 123 s.
5. Etingof M.I. Avtomaticheskij razmernyj kontrol' na metallo-re-zhushchih stankah. – М.: АПР, 2016.–336 s.
6. Surkov, I.V. Primenenie KIM dlya kontroglya linejnyh i uglovyh parametrov zubchatyh koles / I.V. Surkov, M.V. Myagkova // Oborudovanie i instrument, 2007. – №5. – S. 86-89
7. Kremlevskij P.P. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti, para i gaza/ P.P. Kremlevskij . –М.: Izd-vo standartov, 1980g.-192s.

¹*Васютенко Александр Павлович, канд. техн. наук, доцент,
vasutenko50@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государ-
ственный университет*

PNEUMATIC DEVICE BASED ON A THERMORESISTIVE FLOWMETER

A.P. Vasyutenko

The analysis of the characteristics of pneumatic converters is given, the purpose of the work is formulated, the theoretical justification for the operation of a pneumatic thermoresistive flowmeter is given, expressions of the power and current dependencies of the pneumatic thermoresistive transducer are obtained, and the input and output parameters are interconnected, taking into account the design features of the flowmeter. The pneumatic-kinematic diagram of an active shaft diameter control device during grinding is given.

Keywords: measurement, nozzle, transducer, active control device, flow meter.

Vasyutenko Alexander Pavlovich, Cand. tech. Sciences, associate Professor vasutenko50@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

УДК 519.87:004.94

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ «НАКОПИТЕЛЬ – ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА – НАКОПИТЕЛЬ»

Заморёнов М.В.¹, Копп В.Я.², Заморёнова Д.В.³, Владимирова Е.С.⁴

Аннотация: Проводится верификация аналитической модели сопряженного участка, построенной с использованием метода траекторий, путем сравнения ее результатов аналитического моделирования с результатами имитационного моделирования. Разрабатывается имитационная модель на языке GPSS, приводится ее листинг. С помощью имитационной модели определяются коэффициенты готовности работы сопряженного участка на выдачу продукции и на ее прием. Сравниваются указанные коэффициенты готовности безотказной работы сопряженного участка, полученные с помощью имитационной и аналитической моделей. Проводится расчет относительной погрешности результатов.

Ключевые слова. Имитационная модель, верификация, относительная погрешность, сопряженный участок

Все большее значение в современной технике приобретает временное моделирование систем. Данный вид резервирования намного менее затратен, чем аппаратное резервирование, хотя служит той же цели – повышение надежности функционирования системы. В производственных системах классическим примером является асинхронные автоматизированные линии, а в информационных – различные буферные устройства. Кроме того, данный вид резервирования позволяет согласовать работу различных последовательно расположенных устройств.

При моделировании сложных систем с временным резервированием необходимо использовать модель участка, состоящего из технологической ячейки и пристыкованных к ней входного и выходного накопителей, так называемого сопряженного участка. Входной накопитель при отказе технологической ячейки позволяет функционировать какое-то время ячейкам, стоящим до него, а выходной – после него. Поэтому моделирование данной структуры необходимо производить, например, в тех случаях, когда поток обслуживаемых объектов сначала разделяется, а потом сходится. Аналитическая модель такой структуры известна из литературы [1, 2].

Функционирование данного участка характеризуется тремя основными параметрами:

- Функцией распределения времени наработки на отказ, при условии одновременного приема и выдачи продукции данным участком;
- функцией распределения времени наработки на отказ, при условии только приема продукции данным участком;
- функцией распределения времени наработки на отказ, при условии только выдачи продукции данным участком.

Для моделирования процесса функционирования указанной структуры используется аппарат теории полумарковских процессов [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Постановка задачи

В [1,2] приведена модель структуры, содержащую «входной накопитель – обслуживающее устройство-выходной накопитель». Такая структура названа полным сопряженным участком (Рис.1). Приведенная модель позволяет определять указанные времена.

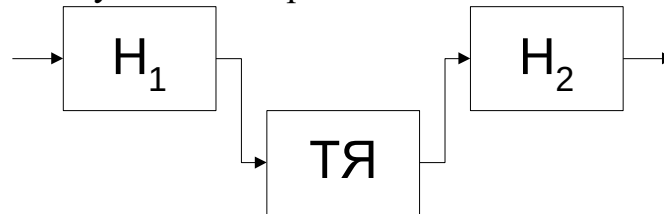


Рис.1 – Структура полного сопряженного участка (ветви)

Граф состояний указанной структуры изображен на Рис.2.

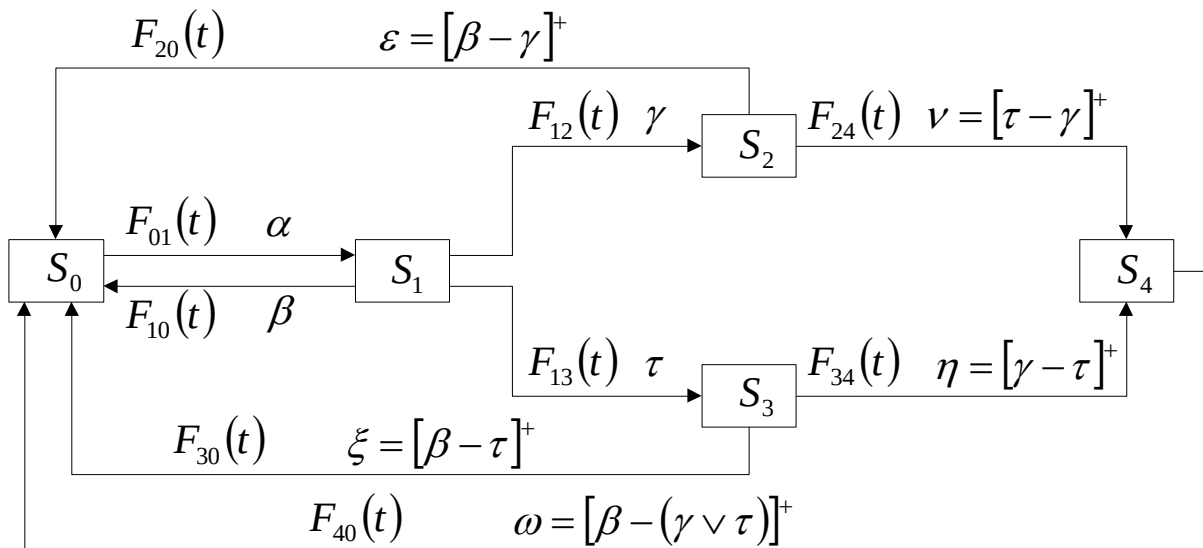


Рис.2 – Граф состояний полного сопряженного участка

Состояния на графе:

S_0 – технологическая ячейка исправна;

S_1 – ТЯ отказала, резервы времени в H_1 случайная величина γ , а в H_2 – СВ τ ($\gamma \neq 0; \tau \neq 0$);

S_2 – ТЯ отказала, резерв γ в H_1 исчерпан, а в H_2 резерв есть ($\tau > \gamma$) и является СВ $[\tau - \gamma]^+$;

S_3 – ТЯ отказала, резерв τ в H_2 исчерпан, а в H_1 резерв есть ($\gamma > \tau$) и является СВ $[\gamma - \tau]^+$;

S_4 – ТЯ отказала, в H_1 и в H_2 резервы времени исчерпаны ($\gamma = 0; \tau = 0$);

ФР времени, когда сопряженный участок может принимать и выдавать продукцию, либо только принимать:

$$F_{013}(t) = F_0^\theta(t) * F_1^\theta(t) * F_3(t).$$

ФР времени безотказной работы на выдачу продукции:

$$F_{012}(t) = F_0^\theta(t) * F_1^\theta(t) * F_2(t),$$

$$\text{где } F_0^\theta(s) = \frac{F_0(s)}{c_0 - (c_0 - 1)f_0(s)}; F_1^\theta(s) = \frac{F_1(s)}{c_1 - (c_1 - 1)f_1(s)},$$

$$c_0 = \frac{m_0^\theta}{m_0}, c_1 = \frac{m_1^\theta}{m_1}, m_i^\theta = m_i \cdot \frac{\rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_e},$$

* – знак операции свертки;

$E \subset M_+$ подмножество состояний $S_e \in E$ множества M_+ из которых возможен прямой переход во множество M_- ;

ρ_i – удельные частоты попадания в каждое из состояний $S_i \in M$;

P_{ij} – вероятности переходов из состояний $S_i \in M$ в состояния $S_j \in M$.

Целью данной работы является верификация аналитической модели [2]. В данном случае инструментом верификации было выбрано сравнение результатов аналитического моделирования и имитационного моделирования [13, 14, 15], проведенного в среде GPSS.

На **Рис.3** представлен листинг программы на языке GPSS.

```

sch equ 1
generate ,,,1
met1 seize priem
advance 1
release priem
transfer ,met1
generate ,,,1
met2 seize vydacha
advance 1
release vydacha
transfer ,met2
generate ,,,1
met3 seize otk
advance (Exponential(sch,0,3))
advance (Exponential(sch,0,1))
release otk
split 1,met4
seize vost
advance (Exponential(sch,0,12))
advance (Exponential(sch,0,4))
release vost
preempt otknak1,,met6,,re
return otknak1
preempt otknak2,,met6,,re
return otknak2
preempt priem,,met7,,re
return priem
preempt vydacha,,met7,,re
return vydacha
split 1,met1
split 1,met2
split 1,met3
terminate
met4 split 1,met5
seize otknak1
advance (Exponential(sch,0,7.5))
advance (Exponential(sch,0,2.5))
release otknak1
preempt priem,,met8,,re
return priem
terminate
met5 seize otknak2
advance (Exponential(sch,0,3.75))
advance (Exponential(sch,0,1.25))
release otknak2
preempt vydacha,,met8,,re
return vydacha
terminate
met6 terminate
met7 terminate
met8 terminate
generate 1000000
terminate 1
start 1

```

Рис.3 – Листинг программы на языке GPSS

Результаты имитационного моделирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – результаты имитационного моделирования

Коэффициент готовности прием	Коэффициент готовности выдача	МО коэффи- циента готов- ности прием (имит.)	МО коэффи- циента готов- ности прием (аналит.)	МО коэффи- циента готов- ности выдача (имит.)	МО коэффи- циента готов- ности выдача (аналит.)
0,940	0,934	0,934	0,950	0,925	0,945
0,938	0,927				
0,938	0,930				
0,933	0,925				
0,933	0,924				
0,936	0,930				
0,934	0,926				
0,936	0,926				
0,937	0,927				
0,932	0,921				
0,937	0,925				
0,933	0,927				
0,929	0,919				
0,928	0,921				
0,934	0,925				
0,936	0,930				
0,930	0,919				
0,937	0,929				
0,935	0,926				
0,932	0,925				
0,937	0,925				
0,931	0,924				
0,934	0,926				
0,933	0,924				
0,933	0,922				
0,935	0,927				
0,937	0,929				
0,933	0,928				
0,929	0,921				
0,934	0,923				
Относительная погрешность, %		1,7		2,1	

Заключение.

Полученные результаты подтверждают правильность аналитической модели сопряженного участка [2]. В дальнейших исследованиях планируется верификация других моделей, построенных с помощью метода траекторий.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-01-00704а.

Библиографический список

1. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем. Монография // Севастополь: СевНТУ, 2012 – 700с.
2. Zamoryonov, M. V. «Storage Device – Cell – Storage Device» Structure Modeling / M. V. Zamoryonov, V. Ya. Kopp, D. V. Zamoryonova // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076396
3. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – Киев: Наукова думка, 1982. – 236 с.
4. Королюк В.С. Стохастические модели систем. Отв. ред. А.Ф. Турбин. – Киев: Наукова думка, 1989. – 208 с.
5. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. USA, Elsevier, Academic Press, 2015. – 214 p.
6. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
7. Копп, В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 240с.
8. Копп, В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский.- Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. – 284 с.
9. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
10. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
11. Броди, С.М. Расчет и планирование испытаний систем на надежность/ С.М. Броди, О.Н. Власенко, Б.Г. Марченко.- Киев: Наукова думка, 1970. – 192 с.
12. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. Учебник для ун-тов. 6-е изд., испр. – М.: Наука, 1989. – 623 с.
13. 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.
14. Томашевский В.Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. — 416 с.
15. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS / Т.Дж. Шрайбер ; [пер. с англ. В.И. Гарчера, И.Л. Шмуйловича]; под ред. М.А. Файнберг. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Kopp V.YA. Modelirovanie avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem. Monografiya // Sevastopol': SevNTU, 2012 – 700s.

2. Zamoryonov, M. V. «Storage Device – Cell – Storage Device» Structure Modeling / M. V. Zamoryonov, V. Ya. Kopp, D. V. Zamoryonova // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076396
3. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 236 s.
4. Korolyuk V.S. Stohasticheskie modeli sistem. Otv. red. A.F. Turbin. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 208 s.
5. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. USA, Elsevier, Academic Press, 2015. – 214 p.
6. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
7. Kopp, V.YA. Modelirovanie avtomatizirovannyh linij / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2006. – 240s.
8. Kopp, V.YA. Stohasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij.- Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2000. – 284 s.
9. Bajhel't F., Franken P. Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskij podhod. Per. s nem. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 392 s.
10. Rajnshke K., Ushakov I.A. Ocenka nadezhnosti sistem s ispol'zovaniem grafov. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 208 s.
11. Brodi, S.M. Raschet i planirovanie ispytaniy sistem na nadezhnost'/ S.M. Brodi, O.N. Vlasenko, B.G. Marchenko.- Kiev: Naukova dumka, 1970. – 192 s.
12. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. Elementy teorii funkcij i funkcional'nogo analiza. Uchebnik dlya un-tov. 6-e izd., ispr. – M.: Nauka, 1989. – 623 s.
13. 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.
14. Tomashevskij V.N. Imitacionnoe modelirovanie v srede GPSS / V.N. Tomashevskij, E.G. Zhdanova. – M.: Bestseller, 2003. — 416 s.
15. SHrajber T.Dzh. Modelirovanie na GPSS / T.Dzh. SHrajber ; [per. s angl. V.I. Garchera, I.L. SHmujlovicha]; pod red. M.A. Fajnberg. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 592 s.

¹*Заморёнов Михаил Вадимович — к.т.н., доцент кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы», СевГУ. Область научных интересов: математическое моделирование, стохастические модели систем, схемотехника. Число научных публикация — 65. zamoryonoff@gmail.com; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; м.т. +7(978)742-00-03.*

²*Копп Вадим Яковлевич — д.т.н., профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», СевГУ. Область научных интересов: математическое моделирование, стохастические модели систем, автоматизация технологических процессов, многократные измерения. Число научных публикаций — 104. v_kopp@mail.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; м.т. +7(978)742-00-07.*

³*Заморёнова Дарья Викторовна, канд. техн. наук, доц., zamik@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

SIMULATION MODEL OF THE STRUCTURE “DRIVE-TECHNOLOGICAL CELL-DRIVE”

M.V. Zamoryonov, V.Y. Kopp, D.V. Zamoryonova, E.S. Vladimirova

In this paper, we verify the analytical model of the conjugate section constructed using the trajectory method by comparing its simulation results with the results of simulation modeling. A simulation model in the GPSS language is being developed and its listing is given. Using the simulation model, the coefficients of the readiness of the associated site for the issue of products and for their reception are determined. The indicated readiness coefficients of the uptime of the interfaced section obtained using the simulation and analytical models are compared. The calculation of the relative error of the results.

Key words: simulation model, verification, relative error, conjugate section

Zamoryonov Mikhail Vadimovich - Ph.D., Associate Professor, Department of Information Technology and Computer Systems, SevSU. Research interests: mathematical modeling, stochastic models of systems, circuitry. The number of publications is 65. zamoryonoff@gmail.com; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 742-00-03.

Kopp Vadim Yakovlevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Instrument Systems and Automation of Technological Processes, SevSU. Research interests: mathematical modeling, stochastic models of systems, automation of technological processes, multiple measurements. The number of publications - 104. v_kopp@mail.ru; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 742-00-07.

Zamoryonova Darya Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, zamik@ukr.net, Russia, Tula, Sevastopol State University.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ С ВОЗВРАТОМ ПРОДУКЦИИ НА ПОВТОРНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ С ИСПРАВЛЕНИЕМ БРАКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЯЧЕЙКАХ

Балакин А.И.¹, Копп В.Я.², Балакина Н.А.³

Аннотация. Рассмотрена структура синхронной автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание, включающая специальные ячейки для исправления брака, предложена ее имитационная модель. Приведена программа на языке GPSS и ее блок-схема. Представлены результаты моделирования, их анализ, показавший возможности увеличения производительности автоматизированной линии при использовании возврата продукции на повторное обслуживание.

Ключевые слова. Синхронная автоматизированная линия, повторное обслуживание, имитационная модель, производительность.

Современное производство характеризуется высокой степенью автоматизации выполнения операций. Для этих целей очень часто используются автоматизированные линии. В частности, синхронные автоматизированные линии с рефлекторным управлением. Для обеспечения качества продукции на выходе линии необходимо осуществлять контроль практически после каждой технологической ячейки. В результате обнаружения бракованных изделий после технологической операции изделие убирается с технологической ячейки, что уменьшается количество годных изделий на выходе линии и увеличивается время простоя отдельных технологических ячеек. Если же происходит контроль изделия только на выходе САЛ, то в этом случае, при возникновении брака на первых ТЯ, тратятся дополнительные ресурсы для изготовления заведомо бракованного изделия. Этих недостатков можно избежать если использовать автоматизированные линии с возвратом продукции на повторное обслуживание с контролем после выполнения каждой операции.

При использовании таких САЛ возникает вопрос как исправлять брак, например, если наносится покрытие и оно недостаточной толщины, то можно нанести его еще раз, однако при сборке изделия в случае неправильной сборки необходимо сначала разобрать неправильно собранное изделие, таким образом необходимо наличие отдельных ячеек для исправления возникающего брака.

Моделирование работы автоматизированных производственных систем позволяет решать основные задачи их проектирования, эксплуатации и исследования. Прогнозирование их производительности и других техни-

ко-экономических показателей еще на стадии проектирования по заданным показателям надежности оборудования (технологического и вспомогательного), из которого они будут скомпонованы, является наиболее важной задачей. Структуры автоматизированных линий с различными связями приводятся в [1]. Построение моделей автоматизированных линий с возвратом продукции на повторное обслуживание рассмотрено в [2-10]. Однако остается ряд неисследованных вопросов, связанных с функционированием автоматизированных линий при возврате продукции на специальные ячейки для исправления брака. Одним из методов является имитационное моделирование [11].

Целью работы является анализ функционирования синхронной автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание, на основе имитационного моделирования.

Рассмотрим синхронную автоматизированную линию (САЛ) с возвратом продукции на повторное обслуживание (ВППО), структурная схема которой изображена на **Рис.1**.

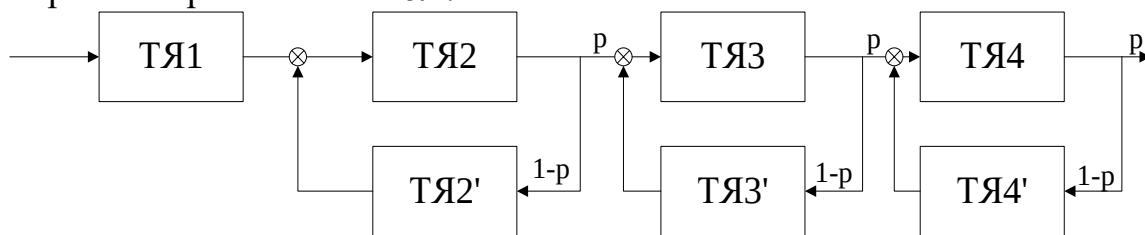


Рис.1 – Структурная схема САЛ с возвратом продукции на повторное обслуживание

Задача ставится следующим образом: по известным функциям распределения $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$, $F_4(t)$ времени обслуживания продукции на технологических ячейках ТЯ1, ТЯ2, ТЯ3, ТЯ4 и функциям распределения $F'_2(t)$, $F'_3(t)$, $F'_4(t)$ времени обслуживания продукции на технологических ячейках предназначенных для исправления брака ТЯ2', ТЯ3', ТЯ4', необходимо определить производительность САЛ с ВППО. Известно, что вероятность брака на выходе ячеек за исключением ТЯ1 равна $(1 - p)$, где p – вероятность получения на выходе соответствующих технологических ячейки годной продукции. При моделировании указанной системы необходимо учитывать взаимные блокировки ячеек: при отказе любой из них другая прекращает работу. Также следует учесть, что приоритет в обслуживании имеет заявка, поступающая с ячейки для исправления брака.

Для определения производительности производственных систем, как было сказано ранее, будем использовать имитационное моделирование. При моделировании САЛ с ВППО предполагается следующее: времена обслуживания ТЯ распределены по экспоненциальному закону. Блок-диаграмма GPSS показана на **Рис.2**.

Текст программы, описывающий структурную схему САЛ с ВППО, представленную на Рис.1, приведен ниже.

```

*****
; GPSS World File – Модель синхронной линии. Единица времени 1 час
*****
*          Model Segment 1
*****
t          EQU          0.0728; время обслуживания
ngen       EQU          93      ; номер генератора
t1         EQU          0.0333; время обслуживания на ячейки для ис-
правления брака
ver        EQU          0.05; вероятность брака

GENERATE    , , , 1

Lab0        SPLIT       1, Lab2
            SPLIT       1, Lab3
            SPLIT       1, Lab4
            SEIZE        ASC1          ; занять ТЯ1
            ADVANCE      (Exponential(ngen,0,t)) ; обслуживание заявки
            RELEASE      ASC1          ; освободить ТЯ1
            TRANSFER     , Lab5

Lab2        SEIZE        ASC2          ; занять ТЯ2
Err2        ADVANCE      (Exponential(ngen,0,t)) ; обслуживание заявки
            TRANSFER     ver, Nor2, Err21

Err21       SEIZE        ASC21          ; занять ТЯ2' для исправления брака
            ADVANCE      (Exponential(ngen,0,t1)) ; обслуживание заявки на
ячейки для исправления брака
            RELEASE      ASC21          ; освободить ТЯ2'
            TRANSFER     , Err2 ; передача заявки на обслуживание на ТЯ2
Nor2        RELEASE      ASC2          ; освободить ТЯ2
            TRANSFER     , Lab5

Lab3        SEIZE        ASC3          ; занять ТЯ3
Err3        ADVANCE      (Exponential(ngen,0,t)) ; обслуживание заявки
            TRANSFER     ver, Nor3, Err31

Err31       SEIZE        ASC31          ; занять ТЯ3' для исправления брака
            ADVANCE      (Exponential(ngen,0,t1)) ; обслуживание заявки
на ячейки для исправления брака
            RELEASE      ASC31          ; освободить ТЯ3'
            TRANSFER     , Err3 ; передача заявки на обслуживание на ТЯ3
Nor3        RELEASE      ASC3          ; освободить ТЯ3
            TRANSFER     , Lab5

Lab4        SEIZE        ASC4          ; занять ТЯ4
Err4        ADVANCE      (Exponential(ngen,0,t)) ; обслуживание заявки
            TRANSFER     ver, Nor4, Err41

Err41       SEIZE        ASC41          ; занять ТЯ4' для исправления брака
            ADVANCE      (Exponential(ngen,0,t1)) ; обслуживание заявки на
ячейки для исправления брака
            RELEASE      ASC41          ; освободить ТЯ4'
            TRANSFER     , Err4 ; передача заявки на обслуживание на ТЯ4
Nor4        RELEASE      ASC4          ; освободить ТЯ4

Lab5        ASSEMBLE     4
            SPLIT       1, Lab0

```


ятность получения годных изделий на выходе ТЯ (x_2). На выходе модели определялась производительность САЛ с ВППО $y=f(x_1, x_2)$.

Выбирались следующие уровни варьирования факторов:

$$\tilde{x}_1 = [1; 4,5] \text{ мин.}, \tilde{x}_2 = [0,7; 0,95]$$

Каждый эксперимент повторялся $n=10$ раз (в GPSS было задействовано соответствующее количество генераторов случайных чисел), поэтому для каждой точки факторного пространства получены 10 значений отклика y .

После проведения машинного эксперимента производилась оценка среднего значения функции отклика по методике, приведенной в [13].

Итоговые результаты оценки имитационных экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты имитационных исследований САЛ с ВППО

№ точки факторного пространства	Производительность, шт/ч		%
	математическое ожидание по данным имитационного моделирования САЛ с ВППО	математическое ожидание по данным имитационного моделирования САЛ без ВППО	
1	1,513	1,120	35,05
2	2,269	1,680	35,02
3	2,741	2,392	14,56
4	1,827	1,595	14,54
5	2,35	2,052	14,51
6	8,255	7,206	14,54
7	9,048	8,476	6,74

Результаты исследований, показывают, что использование возврата продукции на повторное обслуживание в автоматизированных линиях позволяет повысить количество годных изделий на выходе линии в зависимости от предполагаемого брака и времени обслуживания каждой ячейки на 6,74 ... 35,05 %.

В дальнейшем предполагается расширить уровни варьирования факторами для обеспечения более наглядной картины при анализе производительности синхронных автоматизированных линий.

Библиографический список

1. Меткин Н. П. Технологическая подготовка гибких автоматизированных сборочно-монтажных производств в машиностроении /Н. П. Меткин, М. С. Лапин, В. И. Гольц – Л.: Машиностроение. 1986 – 192 с.
2. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных линий /В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. Монография. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 240 с.
3. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием /В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – 284 с.
4. Копп В.Я. Использование итерационного подхода при построении математических моделей асинхронных автоматизированных линий с обратными связями /В.Я. Копп, А.И. Балакин // «Оптимизация производственных процессов» Сб.научн.тр Севастополь, 2004.-Вып.7. – С. 3–9.
5. Копп В.Я. Итерационный подход при построении математических моделей асинхронных автоматизированных линий с обратными связями, включающими ячейки для исправления брака /В.Я. Копп, А.И. Балакин // Вестник СевГТУ, Сер. Автоматизация процессов и управление, №63, 2005, С. 21–28. 6.
6. Балакин А.И. Аналитическое и имитационное моделирование асинхронной автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание /А.И. Балакин, В.Я. Копп, Г.Г. Макухина// Технологические комплексы, Изд-во Луцкого национального технического университета. – Луцк, 2011. – Вып. №1(3). – С. 32–36.
7. Балакин А.И. Построение полумарковской модели автоматизированного участка с возвратом продукции /Копп В.Я., Филипович О.В., Кукушкин А.М. //Системні технології. Изд-во Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 5(64). – С. 101–111.
8. Копп В.Я. Итерационный подход при построении полумарковских моделей автоматизированного участка с обратной связью /В. Я. Копп, Ю. Е. Обжерин, А. И. Балакин // Вестник СевГТУ. - Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2003. - Вып. 49: Автоматизация процессов и управление. - С. 142–147
9. Копп В.Я. Модель гибкой синхронной линии с рефлекторным управлением и обратными связями /В.Я. Копп, Л.Е. Карташов, А.И. Балакин // Оптимизация производственных процессов: Сб.науч.тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. 2009. – Вып.11. – С. 141–145.
10. Копп В.Я. Построение марковских моделей асинхронных автоматизированных линий с обратными связями /В.Я. Копп, А.И. Балакин, О.В. Филипович, Н.В. Серова // Вестник Тольяттинского государственного университета. Сб.тр. Всероссийской научн.-техн. конф. с международным участием «Со-временные тенденции развития автомобилестроения в яроссии» Том 3, 26-28 мая 2004г., Тольятти, С. 166–170.

11. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS: Пер. с англ. /Т.Дж. Шрайбер. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
12. Кринецкий И.И. Основы научных исследований: Учебное пособие для вузов. – Киев. – Одесса: Вища школа, Головное изд-во, 1981. – 208 с.
13. Митропольский А.К. Статистическое исчисление /А.К. Митропольский. – Ленинград, 1953. – т. 3. – 200 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Metkin N. P. Tekhnologicheskaya podgotovka gibkikh avtomatizirovannykh sborочно-montazhnykh proizvodstv v mashinostroyenii / N. P. Metkin, M. S. Lapin, V. I. Gol'ts - L.: Mashinostroyeniye. 1986 - 192 s.
2. Kopp V.YA. Modelirovaniye avtomatizirovannykh liniy /V.YA. Kopp, YU.Ye. Obzherin, A.I. Peschanskiy. Monografiya. - Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2006. - 240 s.
3. Kopp V.YA. Stokhasticheskiye modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniyem /V.YA. Kopp, YU.Ye. Obzherin, A.I. Peschanskiy. - Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 2000. - 284 s.
4. Kopp V.YA. Ispol'zovaniye iteratsionnogo podkhoda pri postroyenii matematicheskikh modeley asinkhronnykh avtomatizirovannykh liniy s obratnymi svyaziyami /V.YA. Kopp, A.I. Balakin // «Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov» Sb.nauchn.tr Sevastopol', 2004.-Vyp.7. - S. 3-9.
5. Kopp V.YA. Iteratsionnyy podkhod pri postroyenii matematicheskikh modeley asinkhronnykh avtomatizirovannykh liniy s obratnymi svyazyami, vklyuchayushchimi yacheyki dlya ispravleniya braka /V.YA. Kopp, A.I. Balakin // Vestnik SevGTU, Ser. Avtomatizatsiya protsessov i upravleniye, №63, 2005, S. 21-28. 6.
6. Balakin A.I. Analiticheskoye i imitatsionnoye modelirovaniye asinkhronnoy avtomatizirovannoy linii s vozvratom produktsii na povtornoye obsluzhivaniye /A.I. Balakin, V.YA. Kopp, G.G. Makukhina // Tekhnologicheskiye komplekсы, Izd-vo Lutskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. - Lutsk, 2011. - Vyp. №1 (3). - S. 32-36.
7. Balakin A.I. Postroyeniye polumarkovskoy modeli avtomatizirovannogo uchastka s vozvratom produktsii / Kopp V.YA., Filipovich O.V., Kukushkin A.M. // Sistemní tekhnologii. Izd-vo Natsional'noї meta-lurgíynoї akademії Ukraїni. - Dnipro-petrovs'k, 2009. - Vip. 5 (64). - S. 101-111.
8. Kopp V.YA. Iteratsionnyy podkhod pri postroyenii polumarkovskikh modeley avtomatizirovannogo uchastka s obratnoy svyaz'yu / V. YA. Kopp, YU. Ye. Obzherin A. I. Balakin // Vestnik SevGTU. - Sevasto-pol': Izd-vo SevGTU, 2003. - Vyp. 49: Avtomatizatsiya protsessov i upravleniya. - S. 142-147
9. Kopp V.YA. Model' gibkoy sinkhronnoy linii s reflektornym upravleniyem i obratnymi svyaziyami /V.YA. Kopp, L.Ye. Kartashov, A.I. Balakin // Opti-

- mizatsiya proizvodstvennykh protsessov: Sb.nauch.tr. - Sevastopol': Izd-vo SevNTU. 2009. - Vyp.11. - S. 141-145.
10. Kopp V.YA. Postroyeniye markovskikh modeley asinkhronnykh avtomatizirovannykh liniy s obratnymi svyazyami /V.YA. Kopp, A.I. Balakin, O.V. Filipovich, N.V. Serova // Vestnik Tol'yattinskogo gosudarstva-stvennogo universiteta. Sb.tr. Vserossiyskoy nauchn.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem «So-vremennyye tendentsii razvitiya avto-mobilestroyeniya v yarossii» Tom 3, 26-28 maya 2004g., Tol'yatti, S. 166-170.
11. Shrayber T.Dzh. Modelirovaniye na GPSS: Per. s angl. /T.Dzh. Shrayber. - M.: Mashinostroyeniye, 1980. - 592 s.
12. Krinetskiy I.I. Osnovy nauchnykh issledovaniy: Uchebnoye posobiye dlya vuzov. - Kiyev. - Odessa: Vishcha shkola, Golovnoye izd-vo, 1981. - 208 s.
13. Mitropol'skiy A.K. Statisticheskoye ischisleniye /A.K. Mitropol'-skiy. - Leningrad, 1953. - t. 3. - 200 s.

¹*Балакин Алексей Игоревич, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольский государственный университет, AIBalakin@sevsu.ru, 299053, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Копп Вадим Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольский государственный университет, v_kopp@mail.ru, 299053, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³*Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольский государственный университет, 040578@rambler.ru, 299053, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

SIMULATION MODELING OF AN AUTOMATED LINE WITH RETURN OF PRODUCTS TO REPEATED SERVICE WITH CORRECTION OF MARRIAGE IN SPECIAL TECHNOLOGICAL CELLS

A.I. Balakin, V.Ya. Kopp, N.A. Balakina

The structure of a synchronized automated line with the return of products for re-service, including special cells for the correction of defects, is considered, and its simulation model is proposed. The GPSS language program and its block diagram are presented. The simulation results are presented and their analysis is carried out, which showed the possibility of increasing the productivity of an automated line when using return products for re-service.

Keyword: synchronous automated line, repeated maintenance, simulation model, productivity.

Balakin Alexey Igorevich, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, Ph.D., Docent (Associate Professor), Department of Instrument systems and Automation of Technological Processes 299053, Sevastopol, Universytetskay st. 33.

Kopp Vadim Yakovlevich, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Instrument systems and Automation of Technological Processes 299053, Sevastopol, Universytetskay st. 33.

Balakina Natalia Anatolyevna, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, Lecturer, Department of Instrument systems and Automation of Technological Processes 299053, Sevastopol, Universytetskay st. 33.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКИХ ЭЖЕКТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ДВУМЯ ВЫНОСНЫМИ СОПЛАМИ

Волошина Н.А.¹, Васютенко А.П.²

Аннотация. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований статических характеристик первичных плоских эжекторных преобразователей с двумя выносными соплами. Описана методика проведения эксперимента. На основе экспериментальных данных получена зависимость диапазона измерения, чувствительности преобразователя в зависимости от конструктивных параметров плоского эжектора и рабочего давления воздуха.

Ключевые слова. Плоский эжектор, статическая характеристика, диапазон измерения, чувствительность, нелинейность.

Современная пневмоавтоматика успешно решает большое количество практических задач управления технологическими процессами. Надежность работы, невысокая стоимость, простота конструкции и эксплуатации, пожаро- и взрывобезопасность дают возможность широко применять пневмоавтоматику в различных отраслях промышленности. Достижение высокого качества современной продукции машиностроения невозможно без автоматизации производства, а, следовательно, без средств автоматического контроля, которые являются устройствами обратной связи при автоматизации производства. В технологическом процессе при механической обработке используются измерительные средства активного контроля (приборы с главной обратной связью, подналадчики, адаптивные системы), целью которого является повышение технологической точности детали путем компенсации погрешностей, возникающих от износа режущего инструмента, тепловых и силовых деформаций технологической системы. Большое распространение при автоматизации контроля геометрических параметров получили пневматические измерительные средства, которые, как известно, имеют высокую точность измерения, позволяют осуществлять дистанционные и бесконтактные измерения, позволяют суммировать измерительные сигналы и т.д. [1-7].

Целью статьи является исследование возможности использования эжекторных преобразователей с двумя выносными соплами, с помощью которых можно строить измерительные средства автоматизации контроля валов, отверстий, погрешности формы и т.д.

Как известно, статическая характеристика пневматического преобразователя $P_h = f(z)$ нелинейна и для практического использования выделя-

ется участок близкий к линейному с погрешностью 1-5 % в зависимости от требуемой точности. Оценку этой нелинейности можно дать, используя степенной ряд Тейлора с центром разложения в середине диапазона преобразования (в точке перегиба) характеристики $P_h = f(z)$, т.е., учитывая, что

$z_{cp} = z_1 + \frac{1}{2}D_z$, $P_{hcp} = f(z_{cp}) + f\left(z_1 + \frac{1}{2}D_z\right)$ ряд будет выглядеть следующим образом:

$$P_h = f(z_{cp}) + \frac{1}{1!} \left(\frac{dP_h}{dz} \right)_{z_{cp}} (z - z_{cp}) + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2 P_h}{dz^2} \right)_{z_{cp}} (z - z_{cp})^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{d^n P_h}{dz^n} \right)_{z_{cp}} (z - z_{cp})^n.$$

Пневматический преобразователь имеет характеристику в виде непрерывной кривой с точкой перегиба и если считать, что диапазон измерения D_z располагается симметрично относительно точки перегиба z_n , т.е.

$z_n = z_{cp}$, то $\left(\frac{d^2 P_h}{dz^2} \right)_{z=z_{cp}} = 0$. Ограничивая разложение третьим членом и

пренебрегая производными высоких порядков, выражение для статической характеристики преобразователя, точка перегиба которой совпадает с серединой диапазона измерения примет вид

$$P_h - P_h(z_{cp}) = \left(\frac{dP_h}{dz} \right)_{z=z_{cp}} (z - z_{cp}) + \frac{1}{3!} \left(\frac{d^3 P_h}{dz^3} \right)_{z_{cp}} (z - z_{cp})^3.$$

Однако в данном выражении отсутствует связь между конструктивными параметрами преобразователя и его метрологическими характеристиками. В отечественной промышленности при выборе параметров пневматических измерительных систем всегда использовались экспериментальные характеристики, т.к. ни одному из авторов расчетных способов, базирующихся на известных уравнениях гидрогазодинамики, не удалось довести свои теоретические расчеты до практического применения [1,2].

Статическая характеристика плоского эжекторного преобразователя с выносным соплом приближённо описывается выражением

$$P_h = \frac{P_H(\alpha + 1) + \left(\frac{\mu_3}{\mu_1} \right)^2 \left(\frac{F_3}{F_1} \right)^2 [P_a(\alpha + 1) - P_H]}{\alpha + 1 + \alpha \left(\frac{\mu_3}{\mu_1} \right)^2 \left(\frac{F_3}{F_1} \right)^2},$$

где P_h – измерительное давление; P_H – рабочее давление; P_a – атмосферное давление; α – конструктивный параметр плоского эжектора

$$\alpha = \frac{1}{2\mu_1^2} \cdot \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - 1; \quad \mu_1, \mu_2, \mu_3 - \text{коэффициенты расхода воздуха входного,}$$

выходного каналов плоского эжектора и выносного сопла; F_1, F_2, F_3 – проходная площадь входного, выходного каналов плоского эжектора, и кольцевого зазора, образованного выносным соплом.

Характеристики $P_h = f(z)$ измерительной оснастки с одним и несколькими измерительными соплами несколько отличаются друг от друга, однако в руководящих технических материалах [1,2] параметры двухсопловой и многосопловой оснастки рекомендуется выбирать по характеристикам односопловой оснастки, при этом учитывается только равенство суммарного зазора для многосопловой оснастки зазору у одного сопла.

В качестве объекта исследования был принят плоский эжекторный преобразователь с двумя выносными соплами [9]. Экспериментальные исследования охватили такие типоразмеры плоских эжекторов, у которых отношение площадей проходного сечения выходного сопла к входному $\frac{F_2}{F_1}$ находилось в диапазоне от 1,0 до 2,0. Каждый типоразмер плоского

эжектора был выполнен в трех экземплярах. В качестве выносных сопел использовались наиболее часто применяемые цилиндрические сопла, диаметром 2,0 мм и 1,5 мм проходной канал которых был выполнен по классу допуска H7.

Экспериментальные статические характеристики снимались на установке, собранной на жесткой стойке, обеспечивающей минимальную погрешность от деформаций, на которой с помощью специального кронштейна устанавливались выносные сопла.

Изменение величины зазора z осуществлялось с помощью микрометрического винта и измерялось по шкале трубки оптиметра с ценой деления 1 мкм. Характеристики $P_h = f(z)$ снимались для четырех измерительных давлений: $P_H = 0,30$ МПа; $P_H = 0,25$ МПа; $P_H = 0,20$ МПа; $P_H = 0,15$ МПа по образцовым манометрам. Для накопления статистических данных и повышения достоверности проведенных экспериментальных исследований статических характеристик, они снимались с трех преобразователей одного типоразмера.

На **Рис.1** в качестве примера представлены статические характеристики плоского эжекторного преобразователя с глубиной проходного канала 1,2 мм и двумя выносными соплами диаметром 1,5 мм, полученные экспериментально и в результате моделирования, которые существенно отличаются.

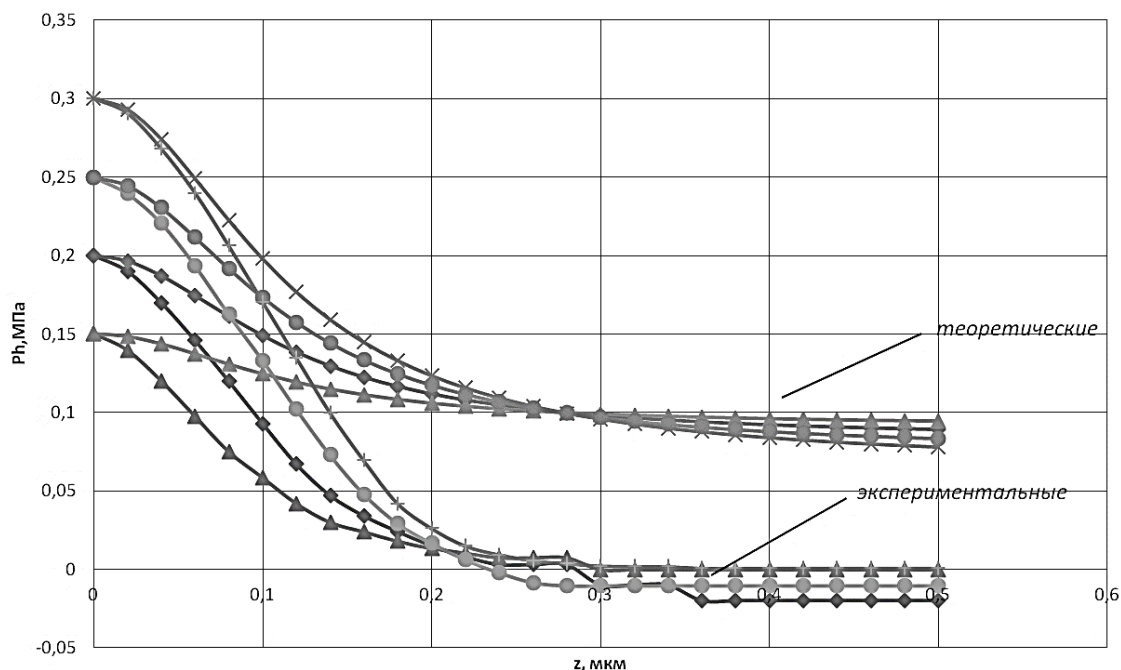


Рис.1 – Графики теоретических и экспериментальных статических характеристик $P_h = f(z)$

В результате обработки экспериментальных данных, полученных для преобразователей с различными конструктивными параметрами, были найдены зависимости диапазона измерения от нелинейности характеристики (1...5%) для различных рабочих давлений; зависимости изменения чувствительности K_z от глубины канала b для четырех давлений $P_H=0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ МПа; зависимости изменения середины прямолинейного участка z_{cp} статической характеристики от рабочего давления для преобразователей с диаметром выносных сопел 2,0 и 1,5 мм.

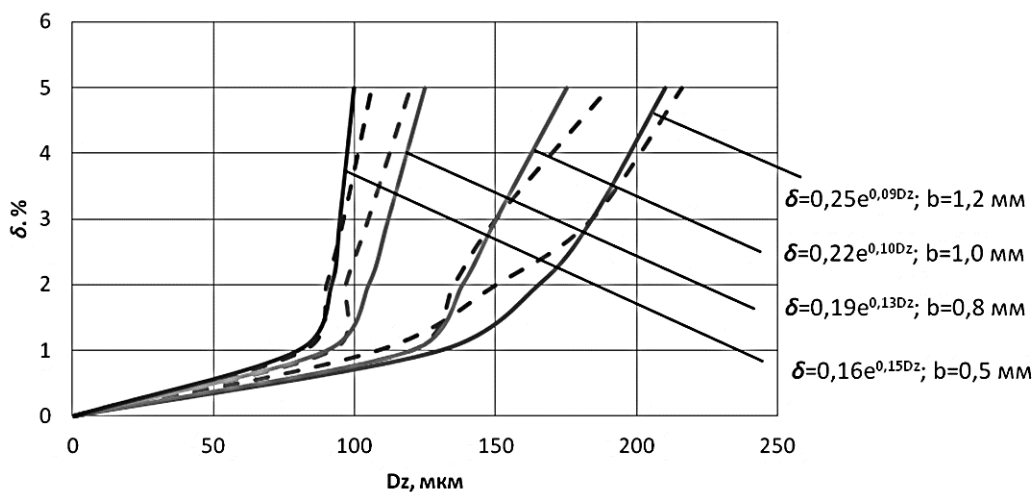


Рис.2 – Графики зависимости $\delta = f(D_z)$ при $2 \times d = 1,5$ мм, $P_H = 0,3$ МПа

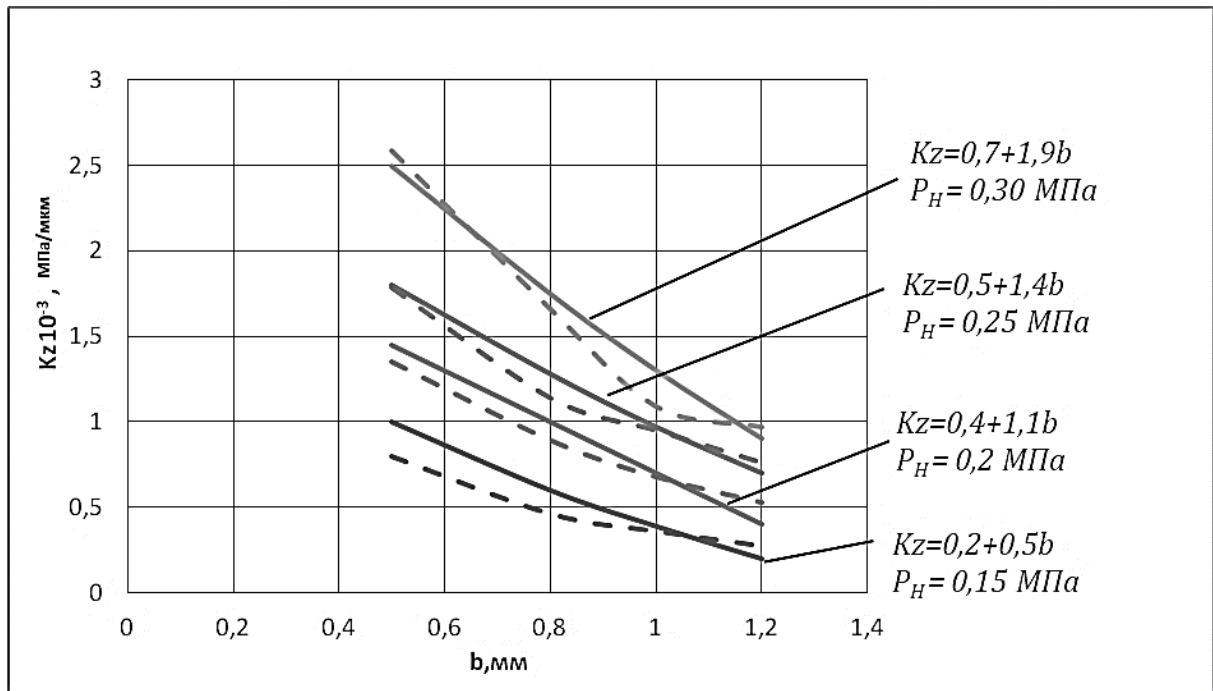


Рис.3 – Графики зависимости) $Kz = f(b)$

На Рис.2,3 в качестве примера приведены зависимости $\delta = f(D_z)$ и $Kz = f(b)$, полученные для плоского эжекторного преобразователя с двумя выносными соплами диаметром 1,5 мм.

Выводы:

1. Полученные зависимости позволяют определять диапазон измерения пневматической системы с двумя измерительными соплами при заданной нелинейности. Максимальный диапазон измерения при нелинейности 5% лежит в пределах от 100 до 200 мкм в зависимости от глубины проходного канала плоского эжектора ($b = 0,5 \dots 1,2$ мм).
2. Чувствительность пневматического преобразователя с двумя измерительными выносными соплами лежит в пределах $(1 \dots 2,5)10^{-3}$ МПа/мм в зависимости от глубины проходного канала и рабочего давления.

Библиографический список

1. Высоцкий, А.В. Пневматические средства измерений линейных величин в машиностроении / А.В. Высоцкий, А.П. Курочкин. – М.: Машиностроение, 1979. – 206 с.
2. Активный контроль в машиностроении: Справочник /Под ред. Е.И. Педя. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
3. Дневник науки [Электронный ресурс]. – Анализ современного состояния пневматических средств измерения линейных величин в машиностроении – Научно-исслед. журнал «Дневник науки», 2017, №4. URL: http://www.dnevniknauki.ru/images/publications/2017/4/technics/Plaki da_Voloshina.pdf (Дата обращения 26.04.2017).

4. Плакида, С.И. Пневматические измерения геометрических параметров и перспектива их развития / С.И. Плакида, Н.А. Волошина // материалы междунар. науч.-техн. конф. «Автоматизация, приборостроение: проблемы, решения» Севастополь, 11-15 сент. 2017 г. – Севастополь: СевГУ, 2017. – С. 107 – 108.
5. Васютенко, А.П. Дроссельный пневматический преобразователь «сопло-приемный канал» / А.П. Васютенко, Л.В. Ефремова, А.Ю.Тараховский // Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки, 12-13 декабря 2016г. – North Charleston, USA. –№3 – с 109-114.
6. Мурашов, В.М. Пневматический длиномер высокого давления ротаметрического типа (ротаметр) "Аэротест-Р" // Датчики и системы. – 2005.– №12. – С. 56 – 63.
7. Пат. 2464530 Рос. Федерация. МПК G01B013/00, B07C005/00. Контрольно-сортировочный комплекс / Мурашов В.М., Шигалева А.И., Мишкин А.В., Филиппов А.П.; заявитель и патентообладатель ЗАО "РС-Лизинг" (RU) – № 2010146512/28; заявл. 15.11.2010; опубл. 20.10.2012.
8. Пат. ПМ 2301401 Рос. Федерация. МПК G 01 B 13/00. Устройство для пневматического измерения отклонения от прямолинейности оси отверстия / Мурашов В.М.; патентообладатель ЗАО "РС-Лизинг" (RU) – № 2004125194/28; заявл. 17.08.2004; опубл. 20.04.2006.
9. А. с. 1469347 СССР: МКИ G 01 B 13/00. Плоский дроссельно-эжекторный преобразователь линейного размера / Н.А. Волошина (СССР) – № 4301102/25-28; заявл. 24.08.87; опубл. 30.03.89, Бюл. 12. – 2 с.: ил.

Bibliograficheskiy spisok

1. Vysockij, A.V. Pnevmaticheskie sredstva izmerenij linejnyh ve-lichin v mashinostroenii / A.V. Vysockij, A.P. Kurochkin.– М.: Ma-shinostroenie, 1979. – 206 s.
2. Aktivnyj kontrol' v mashinostroenii: Spravochnik /Pod red. E.I. Pedyu. – 2-е izd., pererab. I dop. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 352 s.
3. Dnevnik nauki [Elektronnyj resurs]. – Analiz sovremennogo so-stoyaniya pnevmaticheskikh sredstv izmereniya linejnyh velichin v ma-shinostroenii – Nauchno-issled. zhurnal «Dnevnik nauki», 2017, №4. URL: http://www.dnevniknauki.ru/images/publications/2017/4/technics/Plakida_Voloshina.pdf (Data obrashcheniya 26.04.2017).
4. Plakida, S.I. Pnevmaticheskie izmereniya geometricheskikh paramet-rov i perspektiva ih razvitiya / S.I. Plakida, N.A. Voloshina // mate-rialy mezhdu-nar. nauch.-tekhn. konf. «Avtomatizaciya, priborostroenie: problemy, resh-eniya» Sevastopol', 11-15 sent. 2017 g. – Sevastopol': SevGU, 2017. – С. 107 – 108.

5. Vasyutenko, A.P. Drossel'nyj pnevmaticheskij preobrazovatel' «soplo-priemnyj kanal» / A. P. Vasyutenko, L. V. Efremova, A.YU.Tarahovskij // Fundamental'naya nauka i tekhnologii – perspektivnye razrabotki, 12-13 dekabrya 2016g. – North Charleston, USA. – №3 – s 109-114.
6. Murashov, V.M. Pnevmaticheskij dlinomer vysokogo davleniya rotametricheskogo tipa (rotametr) "Aerotest-R" // Datchiki i sistemy. – 2005. – №12. – S. 56 – 63.
7. **Pat. 2464530 Ros. Federaciya. MPK G01B013/00, B07C005/00.** Kontrol'no-sortirovochnyj kompleks / Murashov V.M., SHi-galeva A.I., Mishkin A.V., Filippov A.P.; заявитель i патентообладатель ZAO "RS-Lizing" (RU) – № 2010146512/28; заявл. 15.11.2010; опubl. 20.10.2012.
8. **Pat. PM 2301401 Ros. Federaciya. MPK G 01 B 13/00.** Ustrojstvo dlya pnevmaticheskogo izmereniya otkloneniya ot pryamolinejnosti osi otverstiya / Murashov V.M.; патентообладатель ZAO "RS-Lizing" (RU) – № 2004125194/28; заявл. 17.08.2004; опubl. 20.04.2006.
9. **A. s. 1469347 SSSR: MKI G 01 B 13/00.** Ploskij drossel'no-ezhektornyj preobrazovatel' linejnogo razmera / N.A. Vo-loshina (SSSR) – № 4301102/25-28; заявл. 24.08.87; опubl. 30.03.89, Byul. 12. –2 s.: il.

¹*Волошина Наталья Александровна – к.т.н., доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольский государственный университет, NAVoloshina@sevsu.ru, 299053, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33*

²*Васютенко Александр Павлович – к.т.н., доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольский государственный университет, vasutenko50@mail.ru, 299053, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33*

STUDY OF STATIC CHARACTERISTICS OF FLAT EJECTOR CONVERTERS WITH TWO EXTREME NOZZLES

N.A. Voloshina, A.P. Vasyutenko

The results of theoretical and experimental studies of the static characteristics of primary planar ejector converters with two remote nozzles are presented. The technique of the experiment is described. Based on the experimental data, the dependence of the measuring range and the sensitivity of the converter depending on the design parameters of a flat ejector and the working air pressure is obtained.

Keywords: flat ejector, static characteristic, measuring range, sensitivity, non-linearity.

Voloshina N.A., PhD, Docent (Associate Professor), Department of Instrument systems and Automation of Technological Processes Sevastopol State University, NAVoloshina@sevsu.ru, Sevastopol, Russian Federation, 299053, Sevastopol, Universytetskay st. 33

Vasyutenko A. P., PhD, Docent (Associate Professor), Department of Instrument systems and Automation of Technological Processes Sevastopol State University, vasutenko50@mail.ru, Sevastopol, Russian Federation, 299053, Sevastopol, Universytetskay st. 33

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Филипович О.В.¹

Аннотация. Рассматривается процесс двухпараметрической селективной сборки двух элементов. Производится модификация имитационной модели процесса комплектования и сборки, учитывающая влияние погрешностей измерения на сортировку по селективным группам при одновариантном комплектовании. Приведены результаты моделирования, дана оценка влияния погрешности измерения на показатели сборочного процесса.

Ключевые слова. Двухпараметрическая селективная сборка, имитационная модель, погрешность измерения, ошибочная сортировка.

Рассматривается процесс двухпараметрической селективной сборки двух элементов, который нередко встречается в машино- и приборостроении [1..3]. Каждый элемент характеризуется случайными величинами x_{is} , $i = \overline{1, 2}$, $s = \overline{1, 2}$ (первый индекс – тип элемента, второй – параметр).

Предположим, что элементы изготавливаются независимо друг от друга и их параметры некоррелированы, одномерные распределения параметров изделий считаются известными и обозначаются как $f_{is}(x_{is})$, выходные параметры собранного изделия связаны со входными линейными зависимостями

$$y_s = \sum_{i=1}^2 b_{is} x_{is}, (i = \overline{1, 2}, s = \overline{1, 2}), b_{is} = \text{const}.$$

Обобщенная модель процесса двухпараметрической селективной сборки двух элементов построена в [4]. Интервалы допусков селективных групп отдельно для каждого из параметров элементов будем обозначать $X_i^{(k_{is})}$, где k_{is} – номер группы параметра s элемента i -го типа. Предельные отклонения a_{is} селективных групп разбивают всю область значений параметров на l_{is} интервалов $X_i^{(k_{is})}$, каждый из которых имеет границы $(a_i^{(k_{is})}; a_i^{(k_{is}+1)})$. Многомерные селективные группы с номерами $K_i = (k_{i1}, k_{i2})^T$, в пространстве параметров элементов i -го типа образуются как прямое произведение множеств $X_i^{(k_{i1})} \times X_i^{(k_{i2})}$. Число групп по каждо-

му параметру каждого из элементов i -го типа равно $\overline{1, l_{is}}$; общее число значений вектора K_i при этом равно $l_{i1}l_{i2}$.

В многомерную группу K_i попадают элементы i -го типа, параметры которых одновременно удовлетворяют требованиям

$$x_{i1} \in X_i^{(k_{i1})}, x_{i2} \in X_i^{(k_{i2})}.$$

Доля таких элементов из общего количества определяется по формуле

$$I_i^{(K_i)} = \prod_{s=1}^2 I_i^{(k_{is})}, i = \overline{1, 2}$$

где $I_i^{(k_{is})}$ – число элементов i -го типа, параметр s которых принадлежит одномерной k_{is} -й группе $X_i^{(k_{is})}$,

$$I_i^{(k_{is})} = \int_{a_i^{(k_{is})}}^{a_i^{(k_{is}+1)}} f_{is}(x_{is}) dx_{is}.$$

В группы с условными номерами 1 и l_{is} , лежащими за пределами границ допусков, элементы попадают с вероятностями

$$I_i^{(1_{is})} = \int_{-\infty}^{a_i^{(2_{is})}} f_{is}(x_{is}) dx_{is}, I_i^{(l_{is})} = \int_{a_i^{(l_{is})}}^{\infty} f_{is}(x_{is}) dx_{is}.$$

Сумма этих вероятностей составляет вероятность предварительного брака, и элементы из указанных групп исключены из процесса комплектования.

Для одновариантной стратегии комплектования вероятность получения СК k -го типа можно определить соотношением

$$I_{CK}^{(k)} = \min \left\{ I_1^{(K_1)}; I_2^{(K_2)} \right\}, k = \overline{1, L}.$$

Суммарная вероятность получения годных СК по всем селективным группам и вероятность появления некомплектных элементов (незавершенное производство и предварительный брак) равны

$$I_{CK} = \sum_k I_{CK}^{(k)}; P_{НБ} = 1 - I_{CK}.$$

Принципы построения базовой и модифицированной имитационных моделей однопараметрической селективной сборки приведены в [5] и [6] соответственно. Они имплементированы в среде GPSS World – современной версии системы компьютерного моделирования общего назначения GPSS [7..9]. Имитационная модель двухпараметрической селективной сборки двух элементов построена в [10]. Целью данной работы является модификация базовой имитационной модели двухпараметрической селективной сборки с учетом погрешностей измерения при сортировке.

Сортировка элементов на группы является одним из основных этапов селективной сборки изделий. Контроль деталей всегда сопровождается случайными ошибками, появление которых приводит к тому, что вместо истинного значения параметра x_{is} становится известной величина z_{is} , обычно связанная с исходной аддитивной зависимостью

$$z_{is} = x_{is} + \delta_{is}, \quad (1)$$

где δ_{is} – погрешность измерения.

В результате сортировки элементов по действительным значениям параметра z_{is} могут возникнуть ошибки сортировки: попадание элемента в одну из соседних селективных групп вместо требуемой группы, куда бы он попал при проведении сортировки по истинным значениям при $\delta_{is} \rightarrow 0$ (Рис.1).

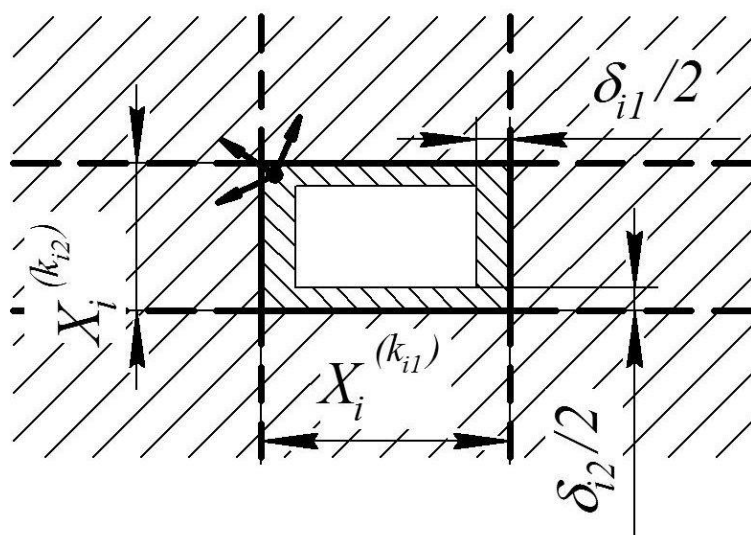


Рис.1 – Иллюстрация процесса ошибочной сортировки

В свою очередь, ошибки сортировки будут сказываться на качестве изделий: при использовании одновариантного алгоритма комплектования, изделия, полученные из таких элементов, с большой вероятностью будут считаться бракованными по выходному параметру, точность которого пытаются достичь методом групповой взаимозаменяемости. Вероятность получения таких событий будет тем меньше, чем меньше величина погрешности измерения, т.е. больше близость действительного значения параметра к истинному.

В имитационной модели реализацией каждого отдельно взятого элемента является ее динамический объект – транзакт. Модификация модели, построенной в [10], заключается в присвоении каждому транзакту двух дополнительных параметров – их действительных значений, рассчитываемых по формуле (1). При этом предполагается, что погрешность измерения яв-

ляется случайной величиной, распределенной нормально с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной

$$\sigma_{is} = \Delta_{is} / 2,$$

где Δ_{is} – предел допускаемой погрешности δ_{is} ($i = \overline{1, 2}, s = \overline{1, 2}$).

В модели при этом станут известны как действительные, так и истинные значения каждого из параметров. Сортировка будет производиться по действительным значениям (с возможностью возникновения ошибок), а годность сборочного комплекта определяется принадлежностью выходных показателей заданным пределам. В качестве исходных для моделирования примем данные, предложенные в [10]. При помощи модифицированной модели возможно оценить влияние качества измерений на количественные показатели процесса сборки (**Рис.2**).

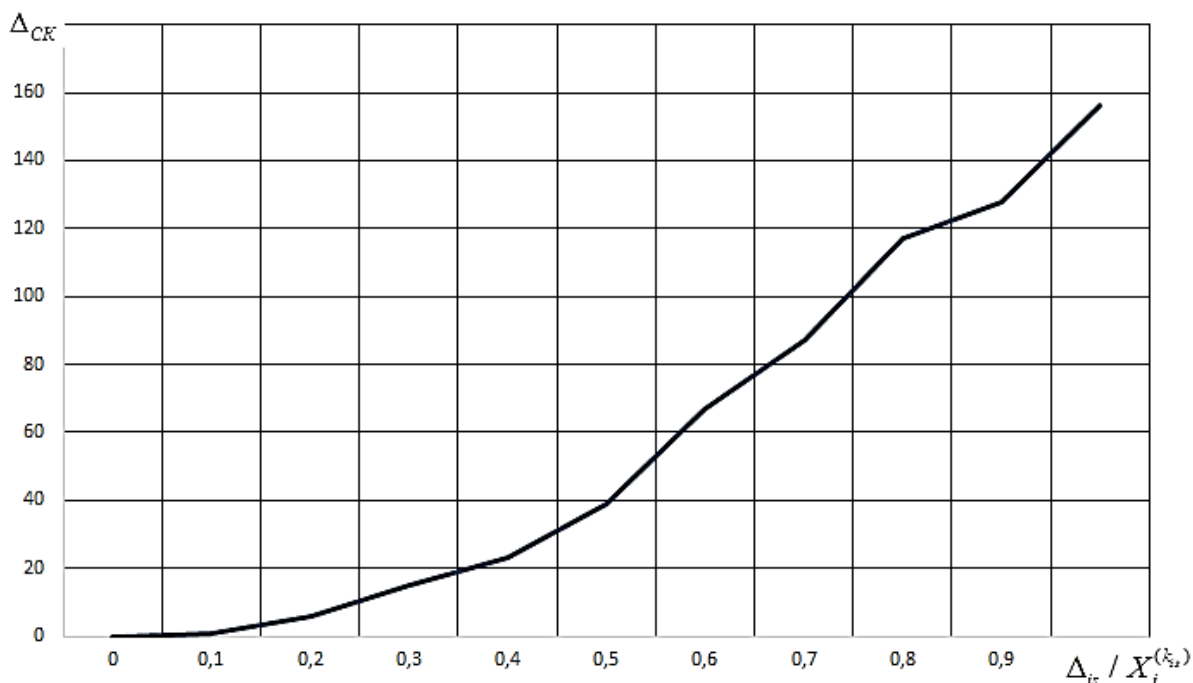


Рис.2 – График зависимости $\Delta_{СК}$ от $\Delta_{из} / X_i^{(k_{из})}$

Приведенная на **Рис.2** функция иллюстрирует зависимость разности общего количества сборочных комплектов и годных сборочных комплектов ($\Delta_{СК}$) от отношения предельно допускаемой погрешности измерения к величине интервала группового допуска ($\Delta_{ис} / X_i^{(k_{ис})}$).

Выполняемые исследования позволят решить метрологическую задачу, связанную с выбором требуемой точности средств измерительной техники. Решение такой задачи позволит осуществить выбор средств измерения каждого из параметров, оптимальное по точности при ограничениях технического и экономического характера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта №18-48-920014.

Библиографический список

1. Катковник В.Я., Савченко А.И. Основы теории селективной сборки – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
2. Буловский, П.И. Автоматизация селективной сборки приборов /П.И. Буловский, Г.В. Крылов, В.А. Лопухин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232с.
3. Сердобинцев, Ю.П. Оптимизированный выбор сборочных комплектов при многовариантных схемах размерного комплектования / Ю.П. Сердобинцев, Л.А. Рабинович, А.В. Савичев //Известия Волгоградского государственного технического университета, 2006. – Вып. 3. – С. 37-39.
4. Филипович, О.В. Модель двухпараметрической селективной сборки двух элементов //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Изд-во ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», 2018. – Т.2. – №4(330). – С. 173-178.
5. Филипович, О.В. Имитационная модель процесса однопараметрической селективной сборки / О.В. Филипович, В.Я. Копп, М.И. Гарматюк //Сборка в машиностроении и приборостроении. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2012. - №5. – С.81-90.
6. Филипович, О.В. Оценка влияния погрешности измерения на показатели селективной сборки с помощью имитационного моделирования / О.В. Филипович, Г.В. Невар //Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9-1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2017.- С. 428-437.
7. Боев В.Д. Моделирование систем, инструментальные средства GPSS World. – Санкт-Петербург: Изд-во «БХВ-Петербург», 2004. – 454 с.
8. Бражник А.Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS World. – Санкт-Петербург: Реноме, 2006. – 439 с.
9. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
10. Филипович О.В. Имитационная модель двухпараметрической селективной сборки двух элементов // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении, 2019. - №1(5). – С. 103-112.

Bibliograficheskiy spisok

1. Katkovnik V.YA., Savchenko A.I. Osnovy teorii selektivnoy sborki – L.: Politehnika, 1991. – 303 s.
2. Bulovskij, P.I. Avtomatizaciya selektivnoy sborki priborov /P.I. Bulovskij, G.V. Krylov, V.A. Lopuhin. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1978. – 232s.
3. Serdobincev, YU.P. Optimizirovannyj vybor sborochnyh kom-plektov pri mnogovariantnyh skhemah razmernogo komplektovaniya / YU.P. Serdo-

- bincev, L.A. Rabinovich, A.V. Savichev //Izvestiya Volgo-gradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006. – Vyp. 3. – S. 37-39.
4. Filipovich, O.V. Model' dvuhparametricheskoy selektivnoj sborki dvuh elementov //Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: Izd-vo FGBOU VO «Orlovskij gosudarstvennyj universitet imeni I.S. Turgeneva», 2018. – T.2. – №4(330). – S. 173-178.
 5. Filipovich, O.V. Imitacionnaya model' processa odnoparametricheskoy selektivnoj sborki / O.V. Filipovich, V.YA. Kopp, M.I. Garma-tyuk //Sborka v mashinostroenii i priborostroenii. – M.: Izd-vo «Ma-shinostroenie», 2012. – №5. – S.81-90.
 6. Filipovich, O.V. Ocenka vliyaniya pogreshnosti izmereniya na pokazateli selektivnoj sborki s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya / O.V. Filipovich, G.V. Nevar //Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 9-1. – Tula: Izd-vo TulGU, 2017.- S. 428-437.
 7. Boev V.D. Modelirovanie sistem, instrumental'nye sredstva GPSS World. – Sankt-Peterburg: Izd-vo «BHV-Peterburg», 2004. – 454 s.
 8. Brazhnik A.N. Imitacionnoe modelirovanie: vozmozhnosti GPSS World. – Sankt-Peterburg: Renome, 2006. – 439 s.
 9. Kudryavcev E.M. GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyh sistem. – M.: DMK Press, 2004. – 320 s.
 10. Filipovich O.V. Imitacionnaya model' dvuhparametricheskoy selektivnoj sborki dvuh elementov // Avtomatizaciya i izmereniya v ma-shino- priborostroenii, 2019. - №1(5). – S. 103-112.

¹*Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, orhisl@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

SIMULATION MODEL OF TWO-PARAMETER SELECTIVE ASSEMBLY TAKING INTO ACCOUNT ERRORS OF MEASUREMENT OF PARAMETERS

O.V. Filipovich

The technological process of two-parameter selective assembly of two elements is considered. A modification of the simulation model of the process of completion and assembly of elements is made, taking into account the influence of measurement errors on sorting by selective groups in single-variant completion. The results of modeling are presented, the influence of measurement error on the performance of the assembly process is estimated.

Keywords: two-parameter completion, selective assembly, simulation model, measurement error, erroneous sorting.

Filipovich Oleg Viktorovich, Ph.D., Associate Professor, Head of Department, Russian Federation, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 681.784.84

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ ГИБКИХ СОЧЛЕНЕНИЙ ЭНДОСКОПОВ

Филипович О.В.¹, Еременко Н.С.², Кошечкина Д.О.³

Аннотация. Рассматриваются конструкции гибких сочленений управляемых дистальных концов медицинских эндоскопов. Производится построение моделей двух известных вариантов сочленений, учитывающих их геометрические особенности. Приводятся результаты моделирования, позволяющие определить зависимость угла поворота полюсов гибких сочленений от величины перемещения управляющих тросов.

Ключевые слова. Медицинский эндоскоп, дистальный конец, гибкое сочленение, модель.

Эндоскопами называют группу сложных оптико-механических и оптико-электронных приборов, выполняющих различные функции и задачи. Данные приборы подразделяются на два класса: технические и медицинские. Технические эндоскопы используются для осмотра труднодоступных элементов машин и оборудования при их техническом обслуживании и оценке работоспособности, а также в системах безопасности для досмотра скрытых полостей. Согласно [1] под медицинским эндоскопом понимают прибор, вводимый во внутренние полости и органы человека через естественные каналы или хирургическим путем. Медицинские эндоскопы используются для исследования и лечения полых внутренних органов человека (пищевод, желудок и двенадцатиперстная кишка, бронхи, мочеиспускательный канал, мочевого пузыря, женские половые органы, почки, органы слуха), а также брюшной и других полостей тела.

Для применения эндоскопа важное значение имеет исполнение его рабочей части. Под рабочей частью понимается модуль, предназначенный для введения в исследуемую область. В зависимости от конструкции рабочей части, медицинские эндоскопы делятся на [2,3]:

- гибкие (рабочая часть может плавно изгибаться в определенных пределах);
- жесткие (рабочая часть выполнена жесткой).

Дополнительно выделяют полужесткие эндоскопы, в которых стержень выполнен из материала, способного изгибаться на некоторый небольшой угол под воздействием внешних факторов. Нередко в литературе полужесткие (semi-rigid) эндоскопы называют полугибкими (semi-flexible).

При проектировании гибких и полужестких (полугибких) эндоско-

пов особое внимание всегда уделяется конструкции дистального конца эндоскопа – участка рабочей части, находящегося на противоположном от наблюдателя конце прибора. Механическая подсистема таких эндоскопов конструктивно состоит из органов управления и наружной оболочки – тубуса, к которой крепится управляемый дистальный конец эндоскопа (Рис.1) [3].

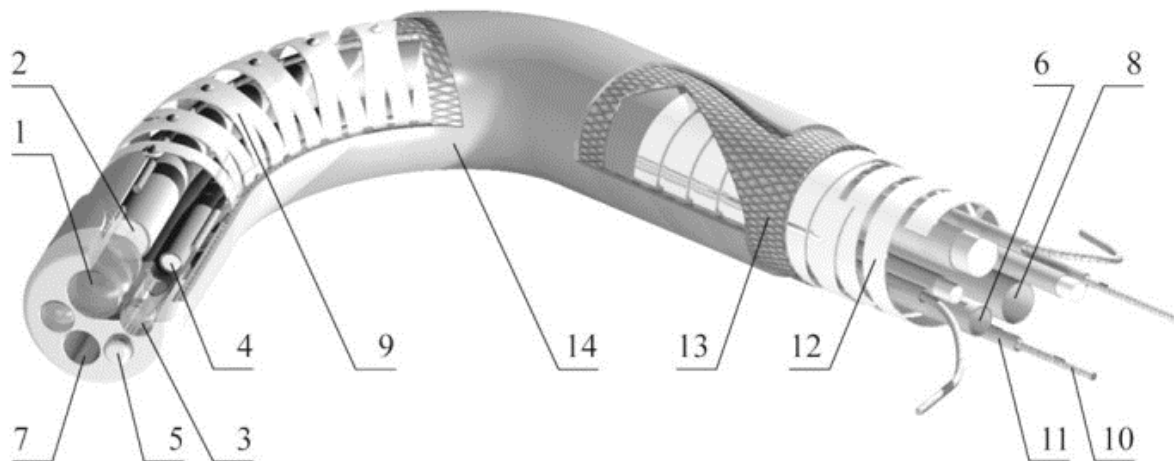


Рис.1 – Дистальный конец гибкого эндоскопа:

1 – объектив; 2 – жгут для передачи изображения; 3 – линза осветительного канала; 4 – осветительный жгут; 5 – форсунка; 6 – трубка для подачи жидкости или воздуха; 7 – канал для введения хирургического инструмента; 8 – трубка; 9 – гибкие сочленения; 10 – тросы управления; 11 – боудены; 12 – спиральная ленточная пружина; 13 – металлическая плетенка; 14 – оболочка

Для обеспечения качества выполнения медицинских операций с использованием полужестких и гибких эндоскопов необходимо обеспечить плавную и легкую управляемость дистального конца, при этом одним из основных параметров является его угол поворота.

Цель данной работы – исследование влияния воздействия управляющей системы на угол поворота дистального конца эндоскопа при рассмотрении нескольких известных вариантов сочленений.

Существует множество конструкций гибких сочленений эндоскопов, но здесь подробно остановимся на двух.

Вариант 1 [3,4]. Конструкция содержит кольца нескольких типов (Рис.2):

- основные со сферической боковой поверхностью, в которых выполнены отверстия для размещения тросов управления и гибких упругих связей;

- дополнительные цилиндрические, установленные так, чтобы частично перекрывать внешнюю поверхность основных колец.

К последнему кольцу припаяны боудены, сквозь которые пропущены тросы управления.

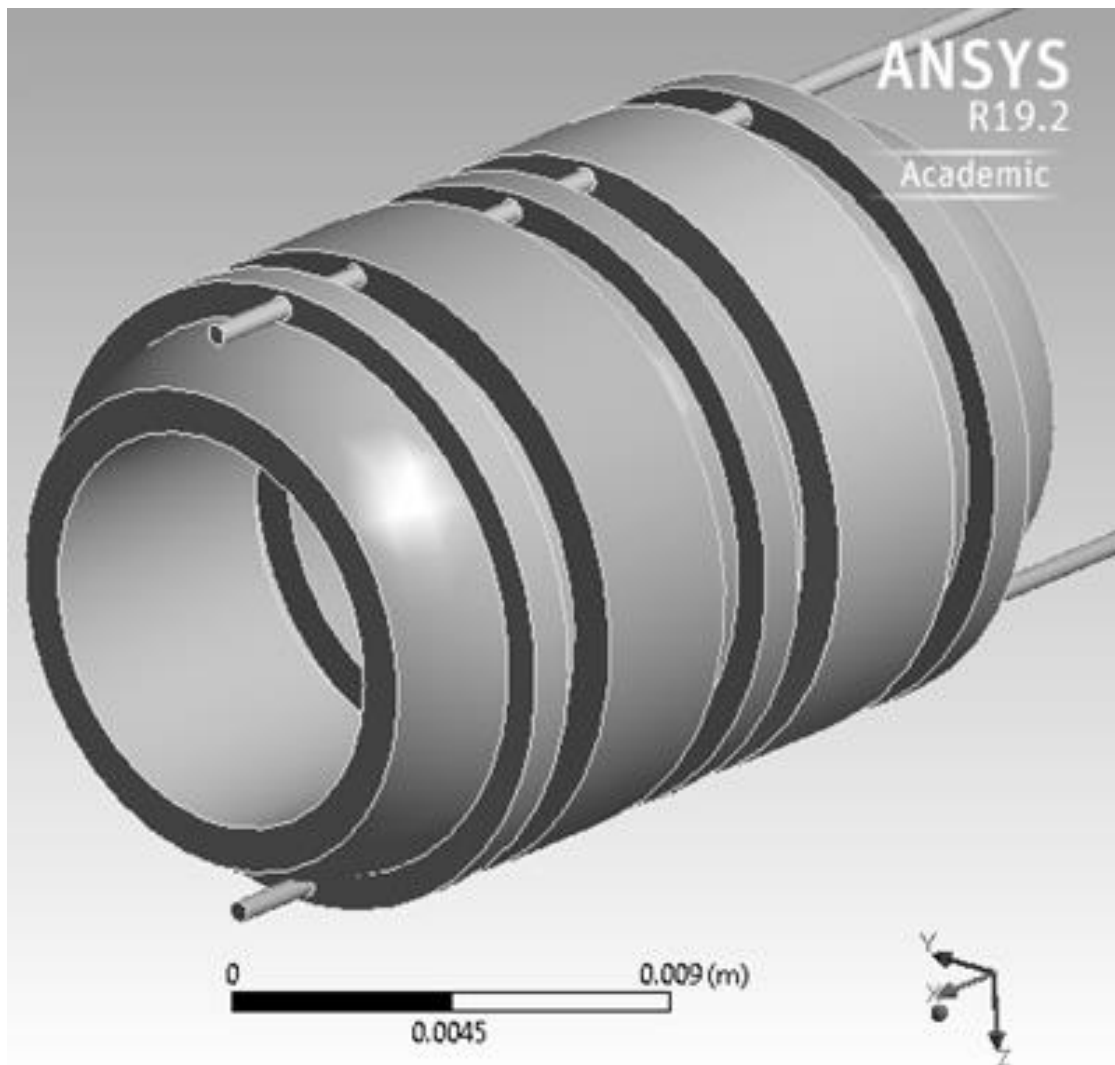


Рис.2 – Гибкие сочленения конструкции, вариант 1

Устройство работает следующим образом [3]. С помощью механизма управления натягивают на определенную величину один из тросов, кинематическая связь которого со вторым образует управляющую пару. Натяжение троса управления вызывает деформацию упругих связей, зафиксированных в основных кольцах, дополнительные кольца скользят по сферической внешней поверхности основных колец, и вся конструкция изгибается в направлении натяжения троса управления. Величина изгиба гибкой части зависит от величины перемещения управляющих тросов и конструктивных особенностей колец. Основной недостаток такой конструкции – ее сложность из-за наличия звеньев двух типов.

Вариант 2 [3,5]. Шарнирное сочленение дистального конца гибкого эндоскопа типа «раковая шейка» (**Рис.3**).

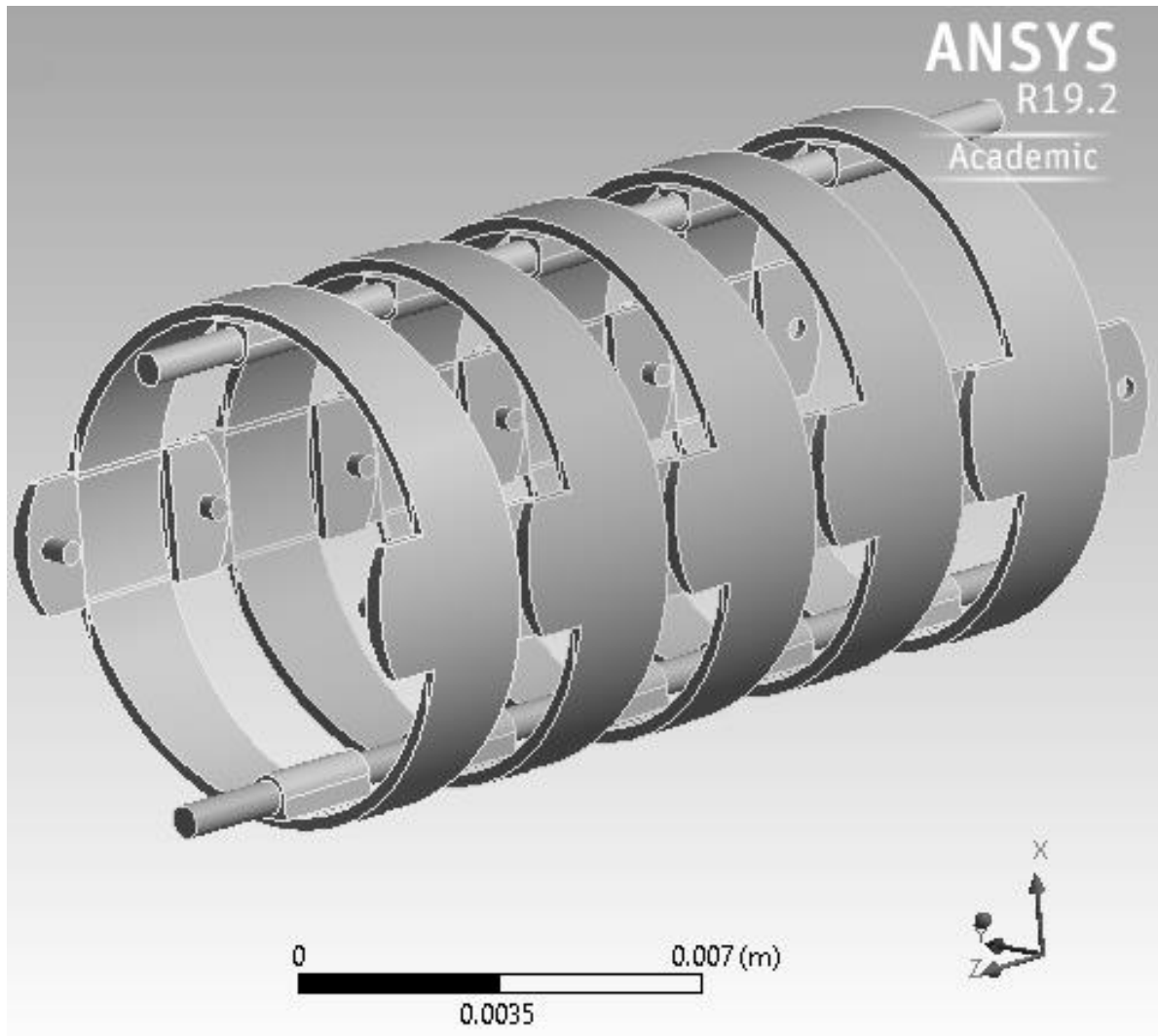


Рис.3 – Гибкие сочленения конструкции, вариант 2

Здесь кольца специальной формы шарнирно соединены между собой клепками так, что получается подвижная система, имеющая две степени свободы – изгибы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Управление изгибом осуществляется парой тросов, которые пропущены сквозь гибкие металлические оболочки, припаянные к последнему кольцу. Недостатком данной конструкции является ее сложность ввиду наличия клепок, а также снижение надежности при эксплуатации, обусловленное резким перегибом управляющих тросов.

В данной работе предлагается произвести анализ углового перемещения полюса дистального конца α эндоскопа с гибкими сочленениями рассмотренных вариантов. При этом выбирается следующий алгоритм решения данной задачи.

1. Построение твердотельной геометрической модели отдельных элементов сочленений и модели сборки. Данная задача решается с использованием CAD-системы, например, Autodesk Inventor [6–8]. При построении модели принимается следующее.

Первая конструкция (Рис.2) имеет сферические кольца сложной формы и цилиндрические кольца наружным диаметром 10 мм с двумя параллельными отверстиями $\varnothing 0,5$ мм для тросов. Для инструментальных каналов предусмотрены центральные отверстия диаметром 6,5 мм.

Вторая конструкция (Рис.3) представляет собой сборку колец толщиной 0,5 мм и диаметром 7 мм с отверстием $\varnothing 0,3$ мм для клепок диаметром 0,28 мм и длиной 0,9 мм; два троса $\varnothing 0,5$ мм с креплениями.

2. Анализ кинематических особенностей данных конструкций с использованием средств САЕ – систем инженерного анализа. В качестве САЕ была выбрана ANSYS как программа многоцелевой направленности, использующая средства геометрического моделирования при полной совместимости с Autodesk Inventor [9,10]. Критерием выбора также являлось наличие академической версии данной программы, что позволяет ее использование студентами при проведении научно-исследовательских работ.

При выполнении анализа построенные в пункте 1 геометрические модели загружались в ANSYS, задавались одинаковые перемещения управляющих тросов для конструкций обоих типов. Результатом моделирования является угловое смещение полюсов гибких сочленений одинаковой длины. Графики зависимостей угла поворота α от величины перемещения управляющих тросов показаны на Рис.4.

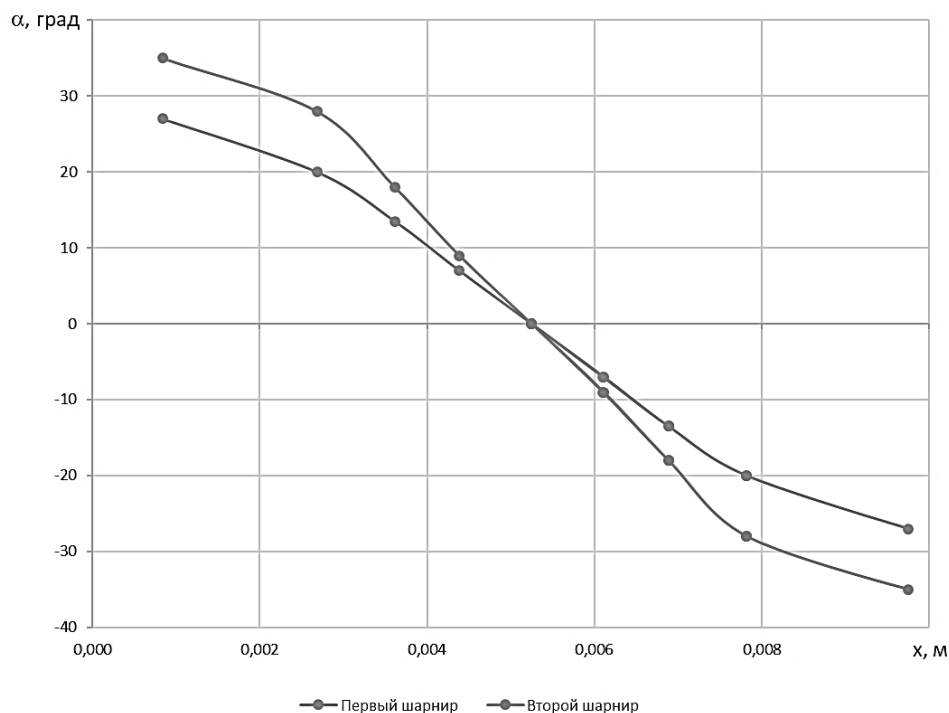


Рис.4 – Графики зависимостей угла поворота полюсов гибких сочленений от величины перемещения управляющих тросов

Из приведенного графика видно, что большей чувствительностью обладает сочленение второго типа (раковая шейка), которое достаточно часто используется в эндоскопах, несмотря на отмеченные недостатки.

Подобные исследования могут проводиться для выбора базовой модели сочленений при разработке конструкций управляемых дистальных концов полугибких и гибких эндоскопов.

Библиографический список

1. ГОСТ 18305-83. Эндоскопы медицинские. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 18 с.
2. ГОСТ 23496-89. Эндоскопы медицинские. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 26 с.
3. Хацевич Т.Н., Михайлов И.О. Эндоскопы: учеб. пособие. – 2-е изд., доп. и расш. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 260 с.
4. А.С. 1007648 СССР. МКИ А 61 В 1/00, G 02 В 23/00. Гибкая управляемая трубка к эндоскопу / Бурцев В.Н., Бурцев В. Н., Ракитянский Е.Б.; – Заявл. 27.03.81; Оpubл. 30.03.83, Бюл. № 12.
5. А.С. 2112414 Россия. МКИ А 61 В 1/01 Конструкция поворотнoзвеньевой цепи для управляемой дистальной части эндоскопа / В.И. Григорьев. – Заявл. 06.02.96; Оpubл. 10.06.98, Бюл. № 16.
6. Концевич В. Твердотельное моделирование в Autodesk Inventor. – М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2008. – 672 с.
7. Банах, Д. Autodesk Inventor /Д. Банах, Т. Джонс, А. Каламейя; пер. И. Кожинoй. – М.: Изд-во Лори, 2019. – 732 с.
8. Зиновьев, Д.В. Основы проектирования в Autodesk Inventor 2016 / под редакцией М. Азанова. – 2-е изд. – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 256 с.
9. Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
10. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: справ. пособие /А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. GOST 18305-83. Endoskopy medicinskie. Terminy i opredeleniya. – М.: Izdatel'stvo standartov, 1984. – 18 s.
2. GOST 23496-89. Endoskopy medicinskie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy. – М.: Izdatel'stvo standartov, 1989. – 26 s.
3. Hacevich T.N., Mihajlov I.O. Endoskopy: ucheb. posobie. – 2-e izd., dop. i rassh. – Novosibirsk : SGGA, 2012. – 260 s.
4. A.S. 1007648 SSSR. MКИ A 61 V 1/00, G 02 V 23/00. Gibkaya upravlyaemaya trubka k endoskopu / Burcev V.N., Burcev V. N., Raki-tyanskij E.B.; – Zayavl. 27.03.81; Opubl. 30.03.83, Byul. № 12.
5. A.S. 2112414 Rossiya. MКИ A 61 V 1/01 Konstrukciya povorotnozven- n'evoy cepi dlya upravlyaemoj distal'noj chasti endoskopa / V.I. Gri-gor'ev. – Zayavl. 06.02.96; Opubl. 10.06.98, Byul. № 16.
6. Koncevich V. Tverdotel'noe modelirovanie v Autodesk Inventor. – М.: Izd-

vo DMK-Press, 2008. – 672 s.

7. Banah, D. Autodesk Inventor /D. Banah, T. Dzhons, A. Kalamejya; per. I. Kozhinoj. – M.: Izd-vo Lori, 2019. – 732 s.
8. Zinov'ev, D.V. Osnovy proektirovaniya v Autodesk Inventor 2016 / pod redakciej M. Azanova. – 2-e izd. – Moskva: DMK Press, 2017. – 256 s.
9. Fedorova, N.N. Osnovy raboty v ANSYS 17 / N.N. Fedorova, S.A. Val'ger, M.N. Danilov, YU.V. Zaharova. – Moskva: DMK Press, 2017. – 210 s.
10. CHigarev A.V. ANSYS dlya inzhenerov: sprav. posobie /A.V. CHiga-rev, A.S. Kravchuk, A.F. Smalyuk. – M.: Mashinostroenie-1, 2004. – 512 s.

¹*Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, ophis1@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Еременко Николай Сергеевич, магистрант, erema1998@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³*Кошевая Даяна Олеговна, студент 3-го курса бакалавриата, reddygrave@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

THE RESEARCH OF DESIGNS FEATURES OF ENDOSCOPES FLEXIBLE JOINTS

O.V. Filipovich, N.S. Eremenko, D.O. Koshevaya

The designs of flexible joints of controlled distal ends of medical endoscopes are considered. Construction of models of two known variants of joints taking into account their geometrical features is made. The results of modeling, allowing to determine the dependence of the rotation angle of the poles of flexible joints on the value of the movement of the control cables, are presented.

Keywords: medical endoscope, distal end, flexible joint, model.

Filipovich Oleg Viktorovich, Ph.D., Associate Professor, Head of Department, Russian Federation, Sevastopol, Sevastopol State University

Eremenko Nikolay Sergeevich, master student, erema1998@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Koshevaya Dayana Olegovna, 3rd year student, reddygrave@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №4(8) 2019 г.

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 БГТУ.

Публикуемые материалы прошли 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: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, Севастополь, ул. Университетская 33. № рег. СМИ: ПИ №ФС77-73958 от 12.окт.2018 г.

Издатель:

1. ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», 241035, Российская Федерация, г. Брянск, бул.50 лет Октября, 7;

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

Брянск 2019 г.