

Petro MELNUCHYK
Valerii KYRYLOVYCH
Oleksandr PYSARCHUK
 Żytomirski Uniwersytet Technologiczny
 Żytomierz, Rosja

ZASTOSOWANIE TEORII KWATERIONÓW DO OPRACOWANIA FUNKcjONALNYCH MODELI UKŁADÓW MANIPULACYJNYCH ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ KWATERНИОНОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Предложено формализованно описывать манипуляционные системы промышленных роботов (МС ПР) так называемыми функциональными моделями (ФМ) МС ПР, базирующиеся на использовании теории кватернионов.

При решении ряда задач автоматизированного синтеза роботизированных механообрабатывающих технологий в условиях гибкого производства возникают проблемы, связанные с необходимостью представлять определенным образом условия функционирования промышленных роботов (ПР) [7]. Указанное особенно важно и актуально для отображения положения звеньев манипуляционной системы (МС) ПР, несовпадающих с осями предварительно выбранной системой координат (СК). Проведенный анализ формализованных (математических) описаний МС ПР однозначно указывает на отсутствие именно указанного компонента в их составе [1, 10, 13, 14, 15]. С другой стороны, существующий математический аппарат – теория кватернионов предполагает возможность отображения указанной информации. Поэтому при составлении функциональных моделей (ФМ) МС ПР в качестве теоретической базы предлагается использовать упомянутый математический аппарат. Кватернионы на сегодня уже достаточно широко используются для решения таких задач технологического содержания, как определение ориентации твердого тела в пространстве [4, 20], для решения задач кинематики и динамики ПР [22], для контроля камер наблюдения, в компьютерной графике [5, 6], при формализованном описании движений объектов роботизации автоматизированного выбора ориентирующих устройств механообрабатывающего производства [8, 9]. Кватернионы применяются в электротехнике, физике и других областях [2, 21, 23].

Важные для рассматриваемой проблемы положения алгебры кватернионов

Кватернион, за Гамильтоном [7], является системой гиперкомплексных чисел. Это расширение четырех комплексных чисел, одно из которых является действительной частью (s), три других – мнимой (V). Математическое представление кватерниона имеет вид:

$$Q = s + v = s + (xi + yj + zk), \quad (1)$$

где s – действительная часть (скаляр); $xi + yj + zk = v$ – мнимая часть (вектор); i, j, k называют мнимыми кватернионными единицами [4].

Правила их умножения имеют вид:

$$\begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = -1; \quad 1 \cdot i = i \cdot 1 = i; \quad \dots \quad 1 \cdot j = j \cdot 1 = j; \quad 1 \cdot k = k \cdot 1 = k; \\ i \cdot j = -j \cdot i = k; \quad j \cdot k = -k \cdot j = i; \quad k \cdot i = -i \cdot k = j. \end{aligned} \quad (2)$$

Это означает, что умножение кватернионов не является коммутативным, что есть важным при анализе последовательно связанных звеньев МС ПР:

$$Q_1 \cdot Q_2 \neq Q_2 \cdot Q_1. \quad (3)$$

Кватернион можно представить как двойку S – скаляра и V – вектора:

$$Q = (s; v). \quad (4)$$

Умножения для кватернионов по выражению (4) $Q_1 = (s_1; v_1)$ и $Q_2 = (s_2; v_2)$ имеет вид [9, 22]:

$$Q_1 \cdot Q_2 = (s_1 \cdot s_2 - v_1 \cdot v_2; v_1 \cdot v_2 + s_2 \cdot v_1 + v_1 \times v_2), \quad (5)$$

где $v_1 \cdot v_2$ – скалярное произведение векторов v_1 и v_2 , $v_1 \times v_2$ – векторное произведение. Все остальные произведения являются обычными (число на число, число на вектор).

Суммирование кватернионов осуществляется по составляющим, то есть:

$$Q_1 + Q_2 = (s_1 + s_2; v_1 + v_2). \quad (6)$$

Угловой кватернион $Q(s; v)$ описывается совокупностью параметров, определяющих положение относительно абсолютной системы координат X, Y, Z с учетом обозначений по [15]:

$$Q(s; v) = \alpha = [\alpha_x(A), \alpha_y(B), \alpha_z(C)], \quad (7)$$

где $\alpha_x(A), \alpha_y(B), \alpha_z(C)$ – параметры, описывающие поворот тела относительно осей X, Y, Z абсолютной СК на углы A, B, C соответственно.

Параметры, формирующие общую функцию $Q(s; v)$ можно представить соответствующими кватернионами [9, 22]:

$$\begin{aligned} \alpha_x(A) &= \cos \frac{A}{2} + i \cdot \sin \frac{A}{2}; \\ \alpha_y(B) &= \cos \frac{B}{2} + j \cdot \sin \frac{B}{2}; \\ \alpha_z(C) &= \cos \frac{C}{2} + k \cdot \sin \frac{C}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Результатом угловых перемещений в абсолютной системе координат X, Y, Z является поворот тела на некоторый угол $\omega = f(A, B, C)$ относительно оси, коллинеарной единичному вектору (рис.1, а) в новое положение СК, т.е. X', Y', Z' .

Линейный кватернион $Q(s; v)$ описывается совокупностью параметров, определяющих положение относительно абсолютной системы координат X, Y, Z :

$$Q(s; v) = S = [l; x; y; z], \quad (9)$$

где x, y, z – величины линейных перемещений относительно осей X, Y, Z абсолютной СК;

l – длина вектора V , отображающего новое положение СК X', Y', Z' после перемещений X, Y, Z
(см. рис.1, б), $l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

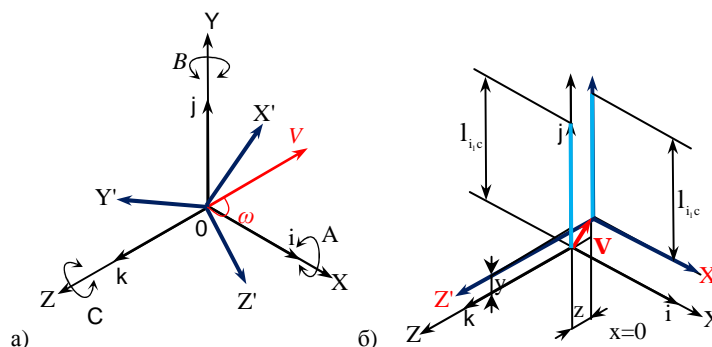


Рис.1. Графическое отображение перемещений математическим аппаратом кватернионов при изменении первоначальной СК из начального X, Y, Z в конечное положение X', Y', Z' :
а) угловые перемещения; б) линейные перемещения

Rys. 1. Graficzne odwzorowanie przemieszczeń za pomocą aparatu matematycznego kwaterionów przy zmianie początkowej СК (układ współrzędnych) z [początkowego X, Y, Z w końcowe położenie X', Y', Z' :
а) przemieszczenie katowe, б) liniowe

Математический аппарат кватернионов используется для представления вращения вектора:

$$V' = Q \cdot V \cdot Q^{-1}, \quad (10)$$

где V' – вектор, возникший после вращения; Q – кватернионное представление вращения; Q^{-1} – сопряженный кватернион к Q , $Q^{-1} = v - x \cdot i - y \cdot j - z \cdot k$.

Сферическая линейная интерполяция (SLI) с использованием кватернионов является наиболее эффективной, когда интерполяция определяется использованием вращающихся движений или траекторией с видом дуги. Все другие виды интерполяции вносят погрешности. Например, при линейной интерполяции (LI) точки, спроектированные с прямой P_1 на круг или дугу P_s , не соответствуют действительным точкам с заданным шагом при сферической линейной интерполяции (рис. 2, а).

Сферическая линейная интерполяция определяется выражением:

$$SLI(Q_1, Q_2, t) = (Q_1 \cdot \sin((1-t) \cdot \omega) + Q_2 \cdot \frac{\sin(t \cdot \omega)}{\sin(\omega)}), \quad (11)$$

где Q_1, Q_2 – вектора, принадлежащие 4-D сфере, пересекающейся плоскостью P_s образованной данными векторами и центром круга, $P \supset (Q_1, Q_2, O)$ (рис.2, б). Очевидно, что искомые при интерполяции точки будут принадлежать данной плоскости P ; ω – угол между векторами Q_1 и Q_2 ; t – локальное время.

Выражение (11) можно применять для решения задачи определения промежуточного положения звеньев МС ПР в трехмерном пространстве при известных значениях их угловых перемещений.

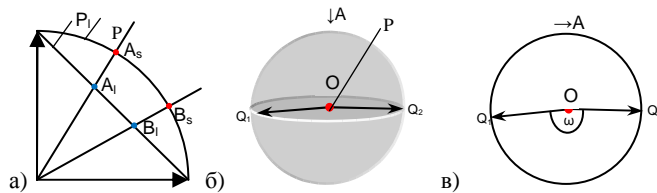


Рис.2. Сферическая линейная интерполяция:
 а) несовпадение точек при линейной (LI) и сферической линейной интерполяции (SLI);
 б) 4-D сфера и плоскость, образованная векторами u и v и центром круга;
 в) вид A в рис.2, б

Rys. 2. Sferyczna liniowa interpolacja: a) brak pokrycia punktów przy liniowej (LI) i sferycznej liniowej interpolacji (SLI); b) 4-D sfera i płaszczyzna utworzone wektorami u i v i środkiem okręgu; c) widok A z rys. 2b

Применение SLI при решении данной задачи позволяет найти точное промежуточное положение i -го звена без погрешностей, возникающих при других видах интерполяции. Положение i -го звена, рассчитанное с использованием выражения (11) в промежутках между двумя позициями звена, представляет собой множество положений звена:

$$M_{i_1} = \{Q_{t_0}, Q_{t_0+\tau}, Q_{t_0+2\tau} \dots Q_{t_0+n\tau}, Q_{t_k}\} \quad (12)$$

где Q_{t_0} – исходное положение i -го звена, заданное в виде положения вектора, $t_0 = 0$; Q_{t_k} – конечное положение i -го звена, заданное в виде положения вектора, $t_k = 1$; $Q_{t_0+\tau}, Q_{t_0+2\tau} \dots Q_{t_0+n\tau}$ – промежуточные положения i -го звена, заданные в виде положений вектора, $t_0 < \tau, 2\tau, \dots, n\tau < t_k, n \in 1, \infty$.

Данное свойство можно использовать при обработке информации, внесенной в ФМ ПР, которая упрощенно отображает кинематическую схему ПР с использованием геометрических примитивов, описывающих размеры i -го звена. Таким образом, можно сформировать множество положений i -го звена по выражению (12), значения которого можно проверять на принадлежность зоне запрета, например, с использованием R-функции [14].

Важным функциональным параметром ПР является достижимость [12], или принадлежность точки множеству точек рабочей зоны ПР. Имея ФМ МС ПР с использованием математического аппарата кватернионов и положения звеньев МС ПР относительно формального начального положения (ФНП) [13] в кватернионной форме, можно найти достижимость точки по следующей формуле [4]:

$$H(Q) = \prod_{i=1}^{n_1} 4 \cdot \frac{(Q_{i_1 \max} - Q_{i_1}) \cdot (Q_{i_1} - Q_{i_1 \min})}{(Q_{i_1 \max} - Q_{i_1 \min})^2}, \quad (13)$$

где n_1 – количество степеней подвижности ПР; $Q_{i_1 \max}, Q_{i_1 \min}$ – максимальный (положительный) и минимальный (отрицательный) углы соответственно в кватернионном представлении, которые

способно отрабатывать i -ое звено относительно ФНП; Q_{i_i} – кватернионная запись текущего положения i -го звена МС ПР относительно ФНП в трехмерном пространстве принятой системы координат.

При этом функция достижимости $H(Q)$ для некоторого положения звеньев МС ПР находится в пределах $H(Q) \in [0;1]$. При условии, если ее значение выходит за данные рамки, точка недостижима для рассматриваемой модели ПР.

Функция достижимости $H(Q)$ принимает значение 1, если анализируемая точка наиболее отдалена от границ возможных углов отработки, значение 0 – когда анализируемая точка находится на границах возможных минимальных или максимальных углов отработки звеньев.

Пусть ПР мод. Fanuc M710iC/20L отработал следующие движения звеньев относительно ФНП (на рис.3 конечное положение отражено пунктиром):

$$C_2 = 90^\circ \text{ при } C_{2 \max} = +216^\circ, C_{2 \min} = -216^\circ.$$

Функция достижимости в т. А для активного звена приобретет значение

$$H(Q_3) = 4 \cdot \left(\frac{((\cos \frac{C_{2 \max}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \max}}{2}) - (\cos \frac{C_2}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_2}{2}))}{((\cos \frac{C_{2 \max}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \max}}{2}) - (\cos \frac{C_{2 \min}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \min}}{2}))^2} \cdot \frac{((\cos \frac{C_2}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_2}{2}) - (\cos \frac{C_{2 \min}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \min}}{2}))}{((\cos \frac{C_{2 \max}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \max}}{2}) - (\cos \frac{C_{2 \min}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \min}}{2}))} \right) =$$

$$= 4 \cdot \left(\frac{((-0.309017; 0; 0; 0.951056) - (0.707106; 0; 0; 0.707106)) \cdot ((0.707106; 0; 0; 0.707106) - (-0.309017; 0; 0; -0.951056))}{(((-0.309017; 0; 0; 0.951056) - (-0.309017; 0; 0; -0.951056))^2 + ((0.707106; 0; 0; 0.707106) - (-0.309017; 0; 0; -0.951056))^2)} \right) = 0.447217.$$

Кватернионы в функциональных моделях промышленных роботов

Ниже представлено рассмотрение некоторых из практических задач, для решения которых использованы указанные преимущества математического аппарата кватернионов.

Вращения тела в трехмерном пространстве вокруг осей координат может быть задано следующим образом [6, 11, 12, 18, 20]:

- матрицами вращения;
- углами Эйлера;
- углом поворота θ и единичным вектором оси вращения $v = (X, Y, Z)$;
- кватернионами.

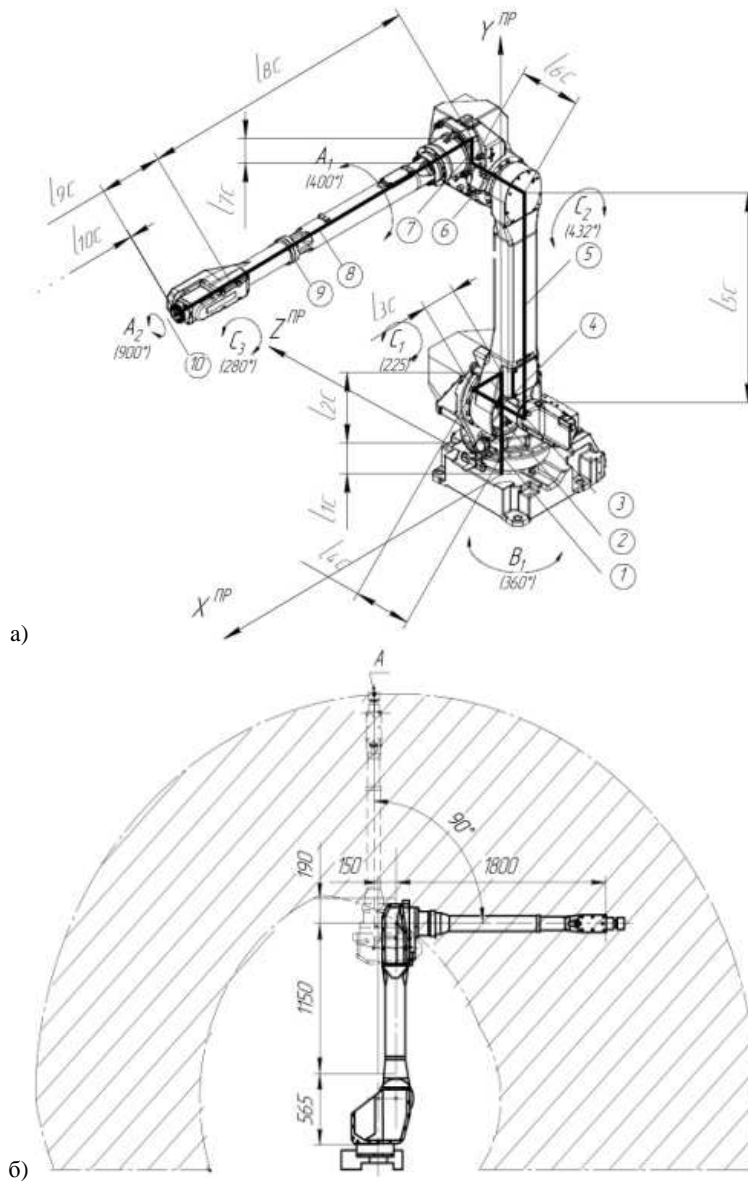


Рис.3. Положение звеньев МС РР мод. Fanuc M710iC/20L иллюстрирующее работоспособность вычислений функции достижимости: а) общий вид РР; б) положение анализируемой точки А, принявшей свое положение в результате перемещений активного звена 7

Rys. 3. Położenie ogniw układu manipulacyjnego RP mod. Fanuc M710iC/20L ilustrujące przydatność obliczeń funkcji osiągalności: a) ogólny widok RP, b) położenie analizowanego punktu A, który zajął swoje położenie w wyniku przemieszczenia aktywnego ogniwa 7

Для правой положительной системы координат вращение на некоторые углы в трехмерном пространстве может быть записано матрицами вращения M_x , M_y , M_z вокруг трех осей СК:

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A \\ 0 & \sin A & \cos A \end{pmatrix}, M_y = \begin{pmatrix} \cos B & 0 & \sin B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B \end{pmatrix}, M_z = \begin{pmatrix} \cos C & -\sin C & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где A , B , C – углы вращения вокруг осей системы координат X , Y , Z соответственно.

Углы Эйлера определяются как углы вращения вокруг осей СК X , Y , Z . При этом СК движется с объектом, что приводит к так называемому шарнирного замка, когда при повороте на некоторый угол, например, 90° вокруг оси Y , ось вращения Z фактически заменяет ось X и т.д. Для осуществления вращения данные углы следует конвертировать в матрицу, что усложняет обработку представленной информации.

При задании вращения тела в трехмерном пространстве углом поворота θ и единичным вектором оси вращения $V=(X, Y, Z)$ не возникает недостатков, связанных с подвижной системой координат при использовании углов Эйлера. Для осуществления вращения данное представление положения объекта в трехмерном пространстве также следует конвертировать в матрицу. Может осуществляться интерполяция по отдельной формуле.

Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что теория кватернионов является лучшим математическим аппаратом для отображения положения тела в пространстве и его вращающихся и линейных перемещений.

Итак, определив основные преимущества и возможности математического аппарата кватернионов на основе анализа приведенной информации и литературы [4, 6, 16, 19, 20], следует отметить целесообразность и обоснованность его использования в робототехнике в целом и для создания ФМ МС ПР в частности. МС ПР является совокупностью тел (звеньев), перемещающихся друг относительно друга вращательно или линейно, чтобы показать положение и ориентацию схвата ПР [17]. Приведем некоторые примеры применения математического аппарата кватернионов при формировании ФМ МС ПР, представленных на рис.4, 5 (правила формирования ФМ МС ПР здесь не рассматриваются, т.к. представляют отдельную научную задачу).

ФМ МС ПР типа SCARA мод. KUKA KR10 R850 Z400 (рис.4), представленная с использованием кватернионов приобретет следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{ФМ МС ПР} = \langle Q_{i_1} \rangle = & 1_{1c} (0) \vee 1_{2c} \alpha(0.130526; 0; 0.991445; 0) (0.130526; 0; -0.991445; 0) \vee \\ & \vee 1_{3c} \alpha(0.284015; 0; 0.95882; 0) (0.284015; 0; -0.95882; 0) \vee 1_{4c} (0) \vee 1_{5c} S(350; 350) \vee \\ & \vee 1_{6c} \alpha(0.999848; 0; 0.017452; 0) (0.999848; 0; -0.017452; 0), \end{aligned}$$

где $1_{1c} - 1_{6c}$ – порядковые номера звеньев при их рассмотрении в направлении от неподвижной основы к схвату; B_1 – вращение звена 1_{2c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП; B_2 – вращение звена 1_{3c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП; $x = 350$ – перемещение звена 1_{5c} относительно втянутого его положения при ФНП; B_3 – вращение звена 1_{6c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП.

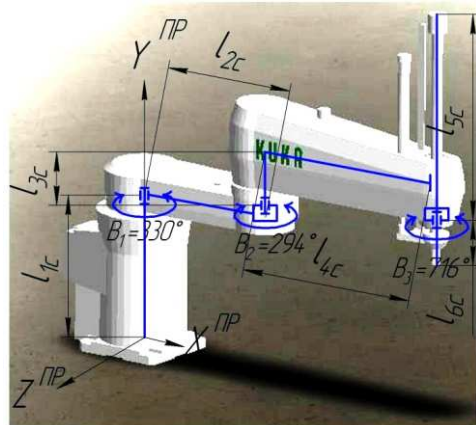


Рис.4. Обицїй вид ПП мина SCARA мод. KUKA KR10 R850 Z400

Rys. 4. Ogólny widok RP typu SCARA mod. KUKA KR10 R850 Z400

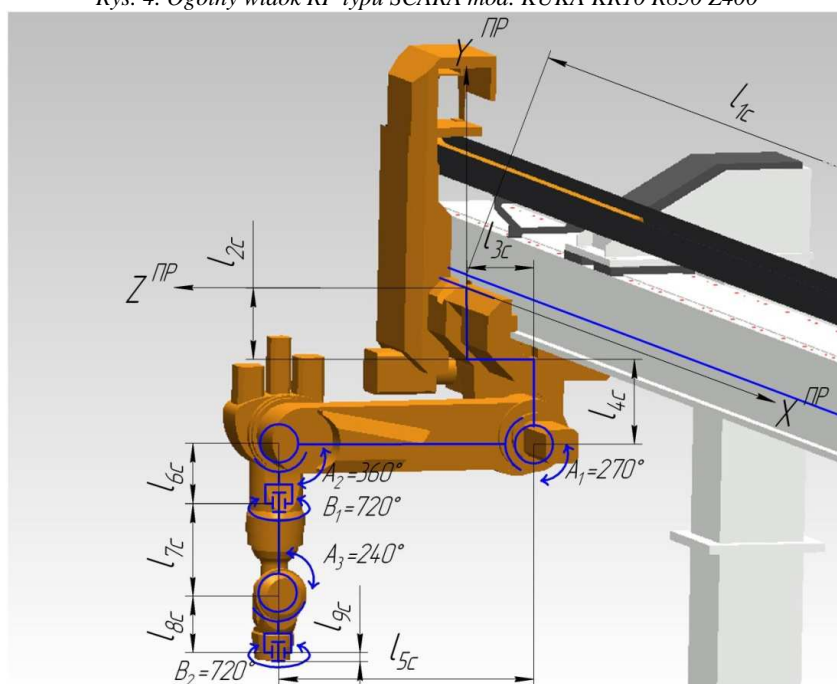


Рис.5. Обицїй вид порталного ПП мод. GUDEL RF-4 210

Rys. 5. Ogólny widok bramowego RP mod. GUDEL RF-4 210

ФМ МС ПР портального типа мод. GUDER RF-4 210 (рис.5), описанная математическим аппаратом кватернионов, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \text{ФМ МС ПР} = \langle Q_{i_1} \rangle = & 1_{1c}(0) \vee 1_{2c} S(1000; 1000; 0; 0) \vee 1_{3c}(0) \vee 1_{4c}(0) \vee \\ & \vee 1_{5c} \alpha(0.382683; 0.92388; 0; 0)(0.382683; -0.92388; 0; 0) \vee 1_{6c} \alpha(0.707107; 0.707107; 0; 0) \\ & (-0.707107; -0.707107; 0; 0) \vee 1_{7c} \alpha(-1; 0; 0; 0)(-1; 0; 0; 0) \vee 1_{8c} \alpha(0.5; 0.866025; 0; 0) \\ & (0.5; -0.866025; 0; 0) \vee 1_{9c} \alpha(-1; 0; 0; 0)(-1; 0; 0; 0), \end{aligned}$$

где $1_{1c} - 1_{9c}$ – порядковые номера звеньев; $x = 1000$ – перемещение звена 1_{2c} относительно его положения при ФНП; A_1 – вращение звена 1_{5c} вокруг оси ОХПР относительно ФНП; A_2 – вращение звена 1_{6c} вокруг оси ОХПР относительно ФНП; B_1 – вращение звена 1_{7c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП; A_3 – вращение звена 1_{8c} вокруг оси ОХПР относительно ФНП; B_2 – вращение звена 1_{9c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП.

Таким образом, использование теории кватернионов позволяет описывать посредством ФМ МС ПР положение звеньев кинематических пар преимущественно с их линейными и вращающимися относительными перемещениями ПР. Указанное преимущество после автоматизированной обработки позволяет использовать ФМ МС ПР при решении реальных задач инженерной практики гибкого роботизированного механообрабатывающего производства [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналіз методів опису багрегатно-модульних промислових роботів для їх автоматизованого вибору / В. А. Кирилович, І. В. Сачук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2000. – № 1 (13, т. II). – С. 3–10.
2. Березин А.В., Курочкин Ю.А., Толкачев Е.А. Кватернионы в релятивистской физике. – Минск. Наука и техника. 1989. – 211 с.
3. Гамильтон У. Р. Избранные труды: Оптика. Динамика. Кватернионы. – М.: Наука, 1994. – 560 с.
4. Ефремов А. П. Кватернионы: алгебра, геометрия, и физические теории. Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. – №1. – с.119. <http://hypercomplex.ru>.
5. Кватернионы.–18.01.2011. – <http://algolist.manual.ru/graphics/3dfaq/articles/77.php>.
6. Кватернионы и 3-х мерные повороты. – 18.01.2011. – <http://karataev.nm.ru/quater3rot/file1.html>.
7. Кирилович В. А. Умови функціональної реалізованості роботизованих механообробних технологій в гнучких виробничих комірках // Технологічні комплекси – Луцьк. – 2010. – № 1. – С.136–145
8. Кирилович В. А. Формалізований опис рухів об'єктів роботизації на основі теорії кватерніонів: междунар. научн.–техн. конф. студ., асп. и молодых ученых., 16 – 20 мая 2005 г. Севастополь: Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – С. 163–164.
9. Кирилович В. А. Формалізований опис орієнтуючих рухів об'єктів роботизації на основі теорії кватерніонів / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вісник національного університету „Львівська політехніка”. – 2006. – № 551. – С. 114 – 122.
10. Кирилович В. А., Сачук І. В. Формализованное описание кинематических структур агрегатно-модульных ПР// Сборка в машиностроении, приборостроении. – М.: Машиностроение. – 2003. – Выпуск 2. – С. 12–16
11. Лурье А. И. Аналитическая механика – М.:Физматлит – 1961 г. – 824 с.
12. Манипуляционные системы роботов/ А. И. Корендясев, Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес и др.; Под общ. Ред. А. И. Корендясева – М.; Машиностроение, 1989. – 472с.

13. Математическое описание и моделирование на ЭВМ манипуляционных роботов/ И. Ф. Кириченко, Р. А. Сорока, Ю. В. Крак. – Киев, 1985. – 25с. – Препринт/ АН УССР, Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова.
14. Методика автоматизованого кінематичного формування траєкторії переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механоскладальних технологій / М. В. Богдановський, В. А. Кирилович, М. О. Ковбаса, Т.С. Нужда // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2004. – № 4 (31, т. II). – С. 92–101.
15. Механика промышленных роботов : в 3-х кн.: учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. – М. : Высшая школа, 1988.
16. Робототехника: пер. с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли ; пер. А. А. Сорокин, А. В. Градецкий, М. Ю. Рачков ; ред. В. Г. Градецкий. – М. : Мир, 1989. – 621 с.
17. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. - 4-е изд., перераб. И доп. – М. : Наука, 1988. – 639 с.
18. Шахинпур М. Курс робототехники: Пер. с англ.–М.: Мир, 1990. – 527 с.
19. Claus Haetinger, Marcelo Malheiros, Eduardo Dullius, Marcio Kronbauer. A quaternion application to control rotation movements in the three dimensional space of an articulate mechanical arm type robot built from low cost materials as a supporting tool for teaching at the undergraduate level// Global Congress on Engineering and Technology Education. – March 13 – 16, 2005, São Paulo, Brazil. – 4 p.
20. Exploiting Quaternions to Support Expressive Interactive Character Motion Michael Patrick Johnson – Thesis (Ph. D.) – Massachusetts Institute of Technology, School of Architecture and Planning, Program in Media Arts and Sciences. – 2003. – 266 p.
21. Honig William M. Quaternionic Electromagnetic Wave Equation and a Dual Charge-Filled Space// Lettere al Nuovo Cimento, Ser. 2 19. – No.4. (28 Maggio 1977). – p. 137–140
22. Quaternion Based Robust Tracking Control of Kinematically Redundant Manipulators Subject to Multiple Self-Motion Criteria/ Husnu Turker Sahin, Ufuk Ozbay and Erkan Zergeroglu// Decision and Control. – 2006. – 45th IEEE Conference. – 6 p.
23. Maxwell James Clerk A Treatise on Electricity & Magnetism. – 1893. – Dover Publications, New York ISBN 0-486-60636-8 (Vol. 1) & 0-486-60637-6 (Vol. 2)

QUATERNION THEORY USAGE IN FUNCTIONAL MODELS FORMATION OF MANIPULATIVE SYSTEMS OF INDUSTRIAL ROBOTS

Abstract. Formalized description manipulative systems of industrial robots (MS IR) also called functional model (FM) MS IR is suggested. FM MS IR based in usage of quaternion theory and its advantages.

Mark KRISTAL
Aleksey DROBOTOV
Dmitry CHERNYSHEV
Wołogradzki Uniwersytet Techniczny
Wołograd, Rosja

AUTOMATYCZNE URZĄDZENIA OBROTOWE Z TURBINOWYM NAPĘDEM DO MONTAŻU

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПОВОРОТНЫЕ УСТРОЙСТВА С ТУРБОПРИВОДОМ ДЛЯ СБОРКИ

При сборке изделий по методу групповой взаимозаменяемости детали собираемого узла предварительно сортируют на размерные группы с последующим комплектованием их в сборочные комплекты заданного качества. В качестве устройств, обеспечивающих перемещение деталей от позиций контроля до сортировочного отсека при их сортировке, или, наоборот, от групповых накопителей к позиции формирования сборочного комплекта при комплектовании, используют автоматические сортировочные устройства различного конструктивного исполнения.

Среди всего многообразия изделий, требующих выполнения описанных выше вспомогательных операций для их сборки, следует выделить шариковые и роликовые подшипники, номенклатура и программа выпуска которых достаточно велики. Это обуславливает необходимость повышения быстродействия средств сортировки (комплектования), а также их грузоподъемности при перемещении габаритных и массивных деталей. Обычно, для этой цели используют поворотные устройства (поворотные столы). Известные конструкции поворотных столов (ПС) содержат: поворотную часть с планшайбой, неподвижное основание, с установленным на нем приводом, делительные и фиксирующие механизмы, систему управления того или иного типа с датчиками обратной связи, информирующими о состоянии устройства. Наличие холостых ходов в делительных и фиксирующих механизмах ограничивают их быстродействие. Кроме того, в большинстве конструкций ПС поворот на угол больший углового шага, выполняют с промежуточными остановками. Также имеются ограничения по реализации реверсивных движений.

Для компенсации указанных недостатков, предложены новые конструктивные схемы ПС [1, 2], где в качестве механизмов поворота и фиксации использованы фрикционные или кулачковые муфты, включение и отключение которых выполняют попеременным созданием между их рабочими поверхностями разрежения и воздушной прослойки. При этом поворот подвижных частей ПС выполняют на создаваемой воздушной прослойке турбинным приводом.

На рис. 1. представлены этапы работы поворотного устройства, выполненного на основе зубчатой муфты. Подвижная часть (ПЧ) поворотного стола соединена с верхней полумуфтой 2 зубчатой муфты, а нижняя неподвижная 1 – с основанием. Нижняя полумуфта содержит силовые каналы 4 питания устройства, обеспечивающие поворот и фиксацию, и каналы 3 включения (отключения) зубчатой муфты. В положении «а» между рабочими поверхностями зубчатой муфты создают разрежение, обеспечивающее фиксацию планшайбы ПС. На этапе «б» между рабочими поверхностями муфты образуют воздушную прослойку, подав в канал 3 сжатый воздух, а, затем, на этапе «в», в канал 4 подают сжатый воздух для поворота ПЧ поворотного устройства. По завершению поворота на угловой шаг система управления, получив сигнал от датчика обратной связи, дает команду на подключение канала 4 к источнику вакуума, что приводит к этапу «г» обратного движения ПЧ на воздушной прослойке и замыканию полумуфт по боковым поверхностям зубьев. По окончании этого этапа, завершается процесс фиксации ПЧ созданием разрежения на

несущей поверхности нижней полумуфты, то есть поворотное устройство переходит в начальное состояние (рис.1 – а).

Достаточно проста реализация рассмотренного алгоритма работы поворотного устройства, а создание воздушной прослойки существенно повышает его быстродействие и грузоподъемность, что особенно целесообразно при сортировке и комплектовании габаритных деталей.

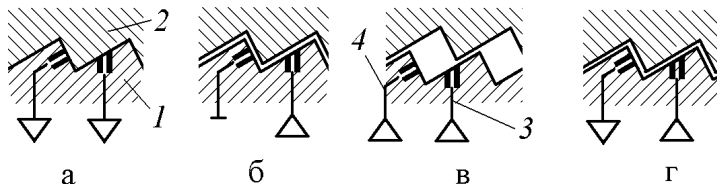


Рис. 1. Зубчатое поворотное устройство: а – исходное положение - рабочие поверхности зафиксированы созданным между ними разрежением; б – всплытие подвижной части на воздушной прослойке; в – прямой поворот ПЧ на воздушной прослойке; г – обратный поворот ПЧ на воздушной прослойке

Rys. 1. Zębate obrotowe urządzenia: a) początkowe położenie – powierzchnie robocze unieruchomione utworzonym między nimi podciśnieniem; b) wypływanie ruchomej części na powietrzną poduszkę; c) prosty obrót ruchomej części na poduszce powietrznej; d) powrotny obrót ruchomej części na poduszce powietrznej

По аналогии с включением (отключением) зубчатой муфты созданием между рабочими поверхностями разрежения (воздушной прослойки), предложена реализация поворотного устройства на основе фрикционных муфт. Рассмотрено два варианта. В первом - использована двухсторонняя муфта (поворот на заданный угловой шаг ограничен жесткими регулируемые упорами). Во втором - применяют одностороннюю муфту (поворот на произвольный задаваемый системой управления угол).

В первом случае (рис. 2) основание 1 и поворотную часть 2 с планшайбой, попеременно соединяют (разделяют) с промежуточным элементом 3, совершающим возвратно-поступательное движение углового поворота. При этом на начальном этапе «а» ПЧ 2 находится в исходном положении, зафиксированном разрежением, созданным между ПЧ 2 и несущей поверхностью основания 1, соплами 8. Здесь промежуточный элемент 3 находится в положении ограниченным упором 4. На этапе «б» между рабочими поверхностями основания 1 и, соответственно, ПЧ 2 и промежуточным элементом 3 соплами 8 и 9 одновременно создают воздушные прослойки, подготавливая тем самым переход к этапу «в». На этом этапе, соединенные друг с другом подвижная часть 2 и промежуточный элемент 3 под действием струй сжатого воздуха из силовых сопел 5 начинают перемещаться от упора 4 к упору 6, который и достигают в положении «г», переместившись на заданный угловой шаг. На этапе «д» между поворотной частью 2 и промежуточным элементом 3 соплами 10 также создают воздушную прослойку. А на заключительном этапе «е», под действием струй сжатого воздуха из силовых сопел 7, воздействующих на лопатки турбины турбинного привода, установленной на промежуточном элементе 3, возвращают последний в положение до упора 4, соответствующее исходному положению. Затем цикл движения может быть повторен. Для реверса система управления меняет приоритеты положений у соответствующих упоров. То есть начальное положение промежуточного элемента 3 будет находиться у упора 6.

Использование воздушной прослойки так же, как и в предыдущем случае, позволяет повысить грузоподъемность и быстродействие поворотных устройств. Точность углового перемещения обеспечивает настройка упоров 4 и 6.

Во втором случае (рис. 3), перемещение поворотной части 2 относительно неподвижного основания 1 на создаваемой воздушной прослойке также осуществляют под действием струй сжатого воздуха из силовых сопл 4, воздействующих на лопатки, установленной на поворотной части, турбины. А торможение и остановка поворотной части 2 выполняют струи сжатого воздуха из сопл 6, также воздействующих на лопатки турбины. Величину углового перемещения поворотной части устройства и его точность определяет точность датчика угла поворота и временная погрешность срабатывания электропневмопреобразователей.

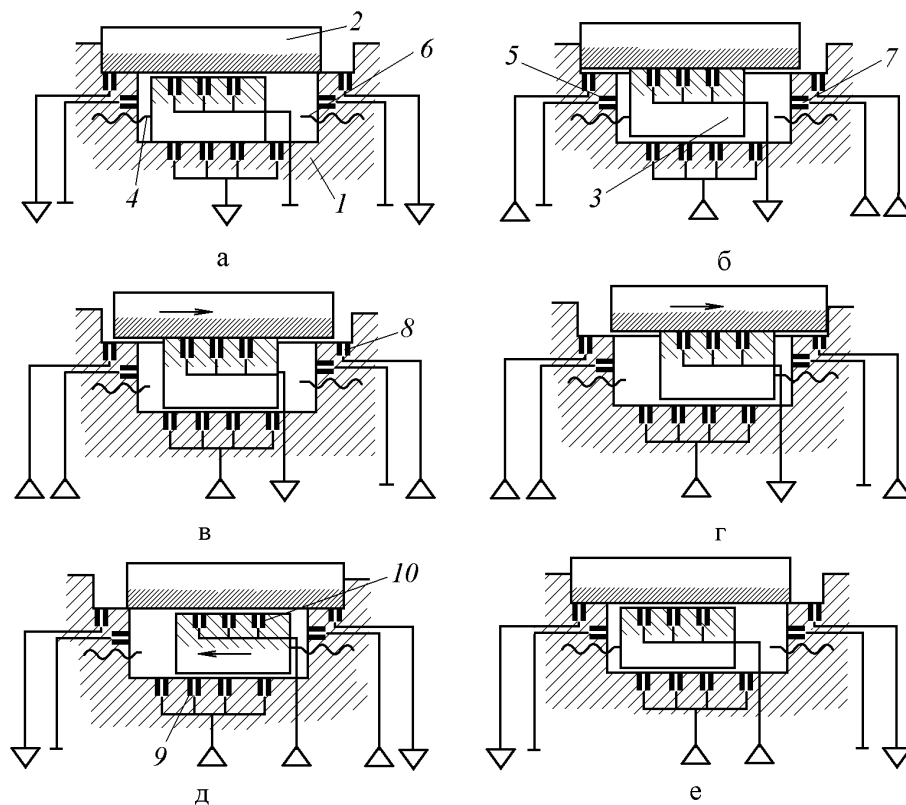


Рис. 2. Поворот подвижной части на угол заданный расположением упоров: а – исходное положение; б – совместное всплытие на воздушной прослойке поворотной части и промежуточного элемента; в – этап перемещения ПЧ между упорами; г – завершение перемещения ПЧ к противоположному упору; д – фиксация ПЧ и отсоединение промежуточного элемента от ПЧ и всплытие его на рабочих поверхностях основания; е – перемещение промежуточного элемента к упору исходного положения

Rys. 2. Obrót ruchomej części o kąt zadany położeniem zderzaków: a) położenie początkowe, b) wspólne wypłynięcie na poduszce powietrznej części obrotowej i pośredniego elementu; c) etap przemieszczenia części ruchomej między zderzakami; d) zakończenie przemieszczenia części ruchomej do przeciwnego zderzaka; e) unieruchomienie ruchomej części i odłączenie od niej pośredniego elementu i jego wypłynięcie na roboczych powierzchniach podstawy; f) przemieszczenie pośredniego elementu do zderzaka początkowego położenia

Последняя схема предусматривает поворот на любой задаваемый системой управления угол, включая и реверсивные движения. Величину требуемого угла поворота задает система управления в зависимости от команды, поступающей от устройства измерения параметра сортировки, либо от команды, определяющей требования комплектования для комплектующих устройств.

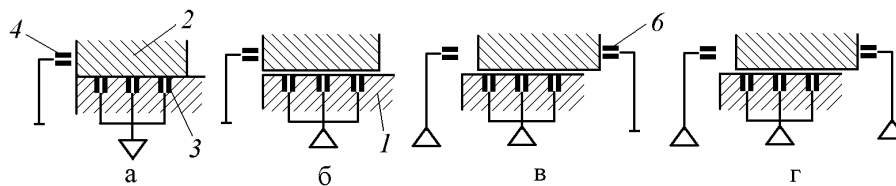


Рис. 3. Управление движением поворотной части на воздушной прослойке:
 а – исходное положение; б – всплытие на воздушной прослойке поворотной части устройства;
 в – поворот под действием турбинного привода; г – этап торможения поворотной части
 по достижению углового поворота

Rys. 3. Sterowanie ruchem obrotowej części na poduszce powietrznej: a) położenie początkowe,
 b) wypływ na poduszce powietrznej części obrotowej; c) obrót pod działaniem turbinowego napędu;
 d) etap hamowania części obrotowej po wykonaniu kąтового obrotu

Общим для рассмотренных устройств являются процессы всплытия на воздушной прослойке и углового перемещения подвижных частей. Для оценки быстродействия этих устройств авторами предложены модели динамики всплытия (фиксации) на воздушной прослойке (разрежении) подвижных масс, а также модели динамики [3] их углового перемещения под действием струй сжатого воздуха воздействующего на лопатки турбин привода.

Результаты теоретических расчетов проверены на адекватность экспериментальным исследованием специально разработанной установки с использованием скоростной видеосъемки видеокамерой VS-FAST/G06 (рис. 4). Установлено, что теоретические данные качественно хорошо согласуются с экспериментальными, а относительная погрешность расчетов с учетом принятых при выводе этих зависимостей допущений, не превышает 30 %.

Рассмотренные схемы поворотных устройств реализованы в конструкциях поворотных столов [1, 2], управление работой которых осуществляется от компьютера на базе микропроцессора AMD Sempron 3600+ через LTP-порт.

ВЫВОДЫ

Таким образом, представленные поворотные устройства позволяют реализовывать различные технологические схемы автоматической многодиапазонной сортировки крупногабаритных (массивных) деталей с повышенным быстродействием при сборке изделий по методу групповой взаимозаменяемости. Эти устройства могут также применяться при комплектовании собираемых узлов из подобных деталей.

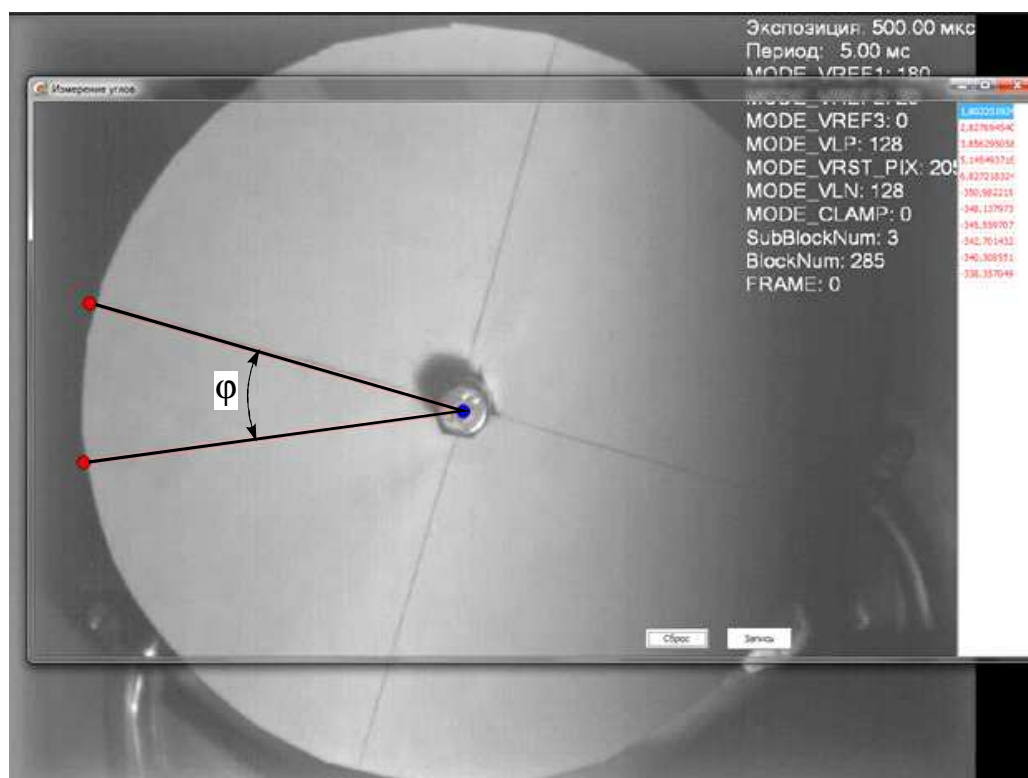


Рис. 4. Обработка результатов кадров скоростной видеосъемки

Rys. 4. Opracowanie wyników z klatki szybkiego filmowania

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2 376 123, МПК В23Q 16/10. Поворотный стол / Кристаль М.Г., Дроботов А.В., Стегачев Е.В., Астапенко А.А., Чувилин И.А. // Б.И. 2009, №35.
2. П.м. 74847 РФ, МПК В 23 Q 16/10. Поворотный стол / Кристаль М.Г., Дроботов А.В., Астапенко А.А., Стегачев Е.В., Чувилин И.А. // Б.И. 2008, № 20.
3. Особенности управления работой струйных поворотных устройств/А.В. Дроботов, М.Г. Кристаль//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. - № 3. – С. 13 — 16.

AUTOMATIC ROTATORS WITH TURBODRIVES FOR ASSEMBLY

Abstract. New constructions of rotary tables for automated assembly, picking and sorting parts. At the heart of these devices use the changes of friction between the rotating and fixed parts by introducing a layer of compressed air and a vacuum. Advantage compared to known designs is to improve performance and capacity with low structural complexity.

Robert JASTRZĘBSKI**Paweł OSÓWNIK****Anna SZEPKA**

Centrum Badawczo-Konstrukcyjne

Obrabiarek sp. z o.o., Warszawa

Tadeusz KOWALSKI

Politechnika Warszawska

WYKRYWANIE BŁĘDÓW MONTAŻU PRECYZYJNYCH SZYBKOOBROTOWYCH WRZECION OBRABIAREK**DETECTION OF MISTAKES IN ASSEMBLY OF PRECISE QUICK-ROTARY MACHINE SPINDLES****WYBÓR METOD WYKRYWANIA BŁĘDÓW MONTAŻU WRZECION**

Mówiąc o wykrywaniu błędów montażu zakładamy, że badamy nowe wrzeciona o znanej konstrukcji, z łożyskami o znanej klasie dokładności i przetwornikami kąta obrotu o znanej dokładności pozycjonowania i rozdzielczości. Wykluczamy występowanie błędów obróbki wynikających ze zużycia maszyny lub narzędzia skrawającego - diagnozujemy tylko jakość i poprawność montażu wrzeciona w odniesieniu do mogących wystąpić problemów dokładności obróbki.

Wrzeciono jest jednym z najważniejszych zespołów obrabiarki, realizujących ruch obrotowy narzędzia lub przedmiotu. Jego łożyska decydują o dokładności położenia osi obrotu, ustaleniu elementu wirującego i przenoszą siły skrawania. Rosnące wymagania dokładności i wydajności obróbki wymuszają stosowanie coraz wyższych prędkości obrotowych przy jednoczesnym wzroście dokładności obrotu. Wymaga to zwiększania dokładności łożysk i sztywności wrzeciennika. O dokładności obróbki zaczyna coraz mocniej decydować dynamika ruchu obrotowego, a nie dokładność geometryczna, a więc metody badań wrzecion szybkoobrotowych powinny uwzględniać nie tylko dokładność geometryczną, lecz także dynamikę ruchu. Wrzeciona stają się zespołem, którego koszt jest znaczący, dlatego powinno się od razu przy badaniach odbiorczych wiedzieć, czy możliwa jest zakładana dokładność obróbki. Podstawową metodą sprawdzenia są próby obróbki. Problem pojawia się, gdy próby te nie dają oczekiwanych rezultatów. Jak ocenić, co jest przyczyną występujących błędów obróbki, które metody badań zastosować?

Znane są następujące metody badań, które można stosować do wrzecion obrabiarek:

1. Pomiary położenia wrzeciona względem innych elementów obrabiarki (równoległość, prostopadłość, współosiowość) [5]
2. Pomiary bicia osiowego i promieniowego wrzecion [5]
3. Pomiary dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi obrotowej „C” (pracującej w trybie pozycjonowania) [4] i [6]
4. Pomiary sztywności wrzeciona [10]
5. Pomiary drgań korpusów wrzecion [9]
6. Wyznaczanie dryftów temperaturowych osi wrzeciona [7]
7. Pomiary prędkości obrotowej [4]
8. Pomiary błędnych ruchów wirujących osi [3] i [8].

Nie wszystkie z wymienionych metod badań wrzecion są jednakowo przydatne, gdyż wyznaczane wskaźniki trudno powiązać z konkretnymi błędami obróbki.

Porównując możliwości wymienionych metod badań w tym zakresie można stwierdzić, że:

Ad. 1) Pierwszą z wymienionych metod można bezpośrednio zastosować, jeśli błędy dotyczą bezpośrednio nieprostopadłości, nierównoległości, niewspółosiowości w wykonaniu detali.

Ad. 2) Pomiary bicia promieniowego lub osiowego są sumą różnych błędów geometrycznych (mimośrodowości powierzchni mierzonej względem przejętego położenia osi obrotu, błędów okrągłości powierzchni pomiarowej, błędów okrągłości powierzchni ustalających położenie osi obrotu) i na ich podstawie trudno ocenić, co jest przyczyną błędów lub problemów obróbki.

Ad. 3) Jeśli występują błędy obróbki dotyczące podziału kąowego, należy wykonać pomiary dokładności pozycjonowania osi obrotowej i porównać z deklarowaną dokładnością zastosowanego przetwornika – jeśli błędy są znacznie większe, przyczyn należy szukać w błędnym montażu w zależności od konstrukcji i rodzaju błędu pozycjonowania – niewspółosiowości przetwornika i osi obrotu wyznaczonej przez łożyska, napięcia pasów przekładniowych itp.

Ad. 4) i 5) Metody te są metodami oceny właściwości maszyny i przy błędnych połączeniach montażowych lub niewyważeniu występuje problem z drganiami, jednak są to metody wtórne, pośrednie. Aby na ich podstawie ocenić problem, należy znać poziomy odniesienia,

Ad. 6) Podobnie jak dla p.4) i 5), także dla metody oceny dryftów temperaturowych, jeśli odkształcenia cieplne są wyższe niż zakładany poziom, można podejrzewać zbyt mocne napięcie wstępne łożysk, za ciasne pasowania montażowe, problem z chłodzeniem przy elektrowrzecionie.

Ad. 7) Odpowiednio zastosowana metoda pomiaru prędkości obrotowej (pomiar prędkości chwilowej, równomierności prędkości na obrót, odchyłki od prędkości nastawionej) daje ważne informacje o błędach montażu dotyczących dynamiki ruchu, mającej znaczenie przy obróbce synchronicznej lub ruchów skojarzonych – interpolowanych, błędy nadążania tu wykryte wpływają bezpośrednio na kształty obrabianych powierzchni. Przyczyn należy szukać, w zależności od konstrukcji: w różnicach rzeczywistego przełożenia względem założonego konstrukcyjnie przy napędach pasem, w zmianach chwilowych przełożenia, wynikających z bicia osi obrotowych, będącego następstwem błędów geometrycznych montażu lub nieprawidłowych naciągów pasów, ewentualnie w źle dobranych wzmocnieniach układu regulacji prędkości obrotowych. Jest to jedna z ważniejszych metod pomiaru dla błędów obróbki wynikających z dynamiki ruchu obrotowego.

Ad. 8) Ostatnia z wymienionych metod jest w mniemaniu autorów jedną z najlepszych do oceny i analizy błędów montażu wrzecion. Pozwala na ocenę błędów geometrycznych, dynamicznych i dryftów temperaturowych pracy wrzecion, dlatego też poświęcono jej największą uwagę. Wdrożono w Laboratorium CBKO metodę badań dynamiki ruchów wrzecion opracowaną przez profesora Tlustý'ego, która została uwzględniona w normie ISO 230-7:2006 [8]. Szersze zastosowanie tej metodyki umożliwił znaczny postęp w stosowanych obecnie komputerowych systemach akwizycji danych w zakresie dokładności i szybkości działania bezstykowych czujników przemieszczeń oraz rozdzielczości i szybkości działania przetworników analogowo-cyfrowych.

OPIS METODYKI POMIARÓW BŁĘDNYCH RUCHÓW WIRUJĄCYCH OSI WRZECION

Przy określaniu osi obrotu elementów wirujących można wyznaczyć obliczeniowo statyczne osie poszczególnych powierzchni walcowych jako prostą określoną przez minimum sumy kwadratów odległości punktów powierzchni walcowej od tej prostej. Reprezentuje ona wtedy teoretyczną oś obrotu dla określonej powierzchni walcowej. Natomiast oś obrotu wrzeciona określona przez osie czopów łożysk jest wyznaczana najczęściej przez różne powierzchnie walcowe. Odchyłki kształtu tych powierzchni powodują, że oś ta przyjmuje różne położenia chwilowe w zależności od pozycji kątowej i prędkości obrotowej.

Dodatkowo powstające przy obrotach siły (tarcia, niewyważenia, itp.) powodują drgania korpusu, w którym osadzone jest wrzeciono. Wskutek tego, podczas ruchu, nawet w tym samym położeniu kątowym, oś chwilowa może nie być w tym samym położeniu względem przyjętej bazy – najczęściej przedmiotu obrabianego. Chwilowe zmiany położenia osi podczas obrotu nazywane dalej błędnymi ruchami osi są trudne do wyodrębnienia, gdyż nakładają się na nie błędy geometrii (wykonania i montażu poszczególnych elementów). Mierząc bicie promieniowe mierzymy sumę różnych błędów, w tym geometrycznych, jak mimośrodowość powierzchni pomiarowej względem osi obrotu, błędy nieokrągłości powierzchni pomiaro-

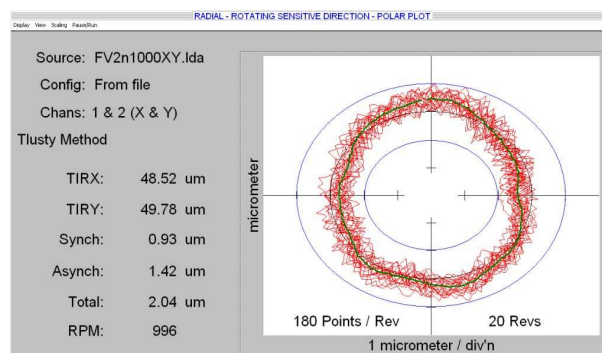
wej oraz zmiany statyczne położenia osi obrotu na kierunku pomiaru bicia, podczas ustawiania wrzeciona w różnych pozycjach kątowych.

Opisywana metodyka polega na takim sposobie pomiaru całkowitych ruchów promieniowych i osiowych wirującej osi, który eliminuje błędy geometryczne oraz pozwala na pomiar tych ruchów dla różnych prędkości obrotowych. Mierzone są całkowite przemieszczenia promieniowe i osiowe w wybranym punkcie wzdłuż osi obrotowej w trzech prostopadłych kierunkach. Pomiaru dokonuje się bezstykowymi czujnikami przemieszczeń o dużej szybkości działania, względem wirującego trzpienia wzorcowego.

Aby określić błędne ruchy osi wrzeciona w czasie obrotu, należy wyeliminować z pomiaru błędy geometryczne, których głównymi składnikami są nieokrągłość powierzchni, względem której wykonujemy pomiary i mimośrodowość tej powierzchni względem osi obrotu. Nieokrągłość powierzchni pomiarowej eliminowana jest przez stosowanie trzpieni wzorcowych o wysokiej okrągłości. Błąd okrągłości kulistej końcówki trzpienia wzorcowego, widocznej na rys. 1, wynosi 18nm, co redukuje błąd nieokrągłości powierzchni do wartości w praktyce pomijalnych. Natomiast mimośrodowość powierzchni pomiarowej względem osi obrotu jest eliminowana obliczeniowo – wynikiem pomiaru błędu mimośrodu osi powierzchni pomiarowej względem osi obrotu jest sinusoida – każda odchyłka od tej sinusoidy, pomijając błędy techniki pomiarowej, oznacza zmianę pozycji osi obrotu wrzeciona, dla danego położenia kątowego. Rys. 2 przedstawia przykładowe chwilowe położenia osi obrotu w funkcji kąta obrotu we współrzędnych biegunowych dla zadanej prędkości obrotowej (zawarte są pomiędzy okręgiem opisanym zewnętrznym i wewnętrznym względem wyznaczonego środka metodą minimum kwadratów odchyłek).



Rys. 1 Rozmieszczenie czujników pomiarowych względem trzpienia wzorcowego zamocowanego we wrzecionie



Rys. 2 Chwilowe zmiany położenia osi wrzeciona

Algorytm postępowania przy eliminacji mimośrodu i wyznaczaniu błędów ruchu osi jest następujący:

1. Z wyników wskazań czujników (X' , Y') (jako wektorów X' i Y') wyznaczany jest okrąg odpowiadający średniemu ruchowi osi wrzeciona w ten sposób, by suma kwadratów odchyłek punktów od okręgu była minimalna (tzw. okrąg najmniejszych kwadratów):

$$\sum_{i=1}^N [(x'_i - x_0)^2 + (y'_i - y_0)^2 - r_0^2] = \min \quad (1)$$

gdzie:

r_0 – promień okręgu odpowiadający mimośrodowości powierzchni pomiarowej,

x_0, y_0 – współrzędne środka okręgu,

x'_i, y'_i – wyniki kolejnych pomiarów (wskazania czujników przeliczone na μm).

Współrzędne środka okręgu wynikają z ustawienia czujników i nie są błędem, lecz wyznaczają rzeczywisty środek układu współrzędnych, względem którego zostają przeliczone wyniki pomiarów.

$$X = X' - x_0 \quad Y = Y' - y_0$$

gdzie:

X' – wektor wskazań czujnika w osi x,

Y' – wektor wskazań czujnika w osi y,

X – wektor przemieszczeń osi wrzeciona w kierunku x,

Y – wektor przemieszczeń osi wrzeciona w kierunku y.

Na rys.2 środek okręgu reprezentowany jest przez środkowy okrąg. Przy bezbłędnym ruchu obrotowym wrzeciona (i braku błędów wynikających z techniki pomiarowej) wykres ruchów promieniowych osi pokrywałby się z wyliczonym okręgiem, reprezentującym mimośród powierzchni pomiarowej względem teoretycznej osi obrotu. Skalę wykresu dobiera się tak, aby uwidocznili odchyłki od tego okręgu – przy rzeczywistych pomiarach mimośród jest najczęściej znacznie większy od występujących błędów ruchów osi. Podstawą do wyznaczania promieniowych błędów ruchu osi jest kołowy wykres chwilowych odchyłek odległości osi wrzeciona od środka układu współrzędnych. (Warto zwrócić uwagę, że odchylenia prostopadłe do chwilowego promienia powinny być ignorowane, jako nie mające wpływu na dokładność obróbki, a zakłócające obraz przebiegu ruchów promieniowych).

2. Po określeniu środka układu współrzędnych reprezentującego teoretyczną oś obrotu, sposób wyznaczania błędnych ruchów promieniowych wirującej osi jest następujący:

Dla każdego pomiaru wyznaczana jest odległość osi wrzeciona od środka układu, mierzona wzdłuż aktualnego promienia:

$$r_{ij}(\varphi_i) = X_{ij}(\varphi_i) \cos \varphi_i + Y_{ij}(\varphi_i) \sin \varphi_i \quad (2)$$

gdzie:

$i = 1..i_{\max}$ - numer położenia kąowego w danym obrocie,

$j = 1..j_{\max}$ - numer obrotu dla ilości obrotów j_{\max} , φ_i - kąt obrotu wrzeciona (reprezentuje chwilowe położenie wrzeciona podczas ruchu względem przyjętego zera położenia kąowego),

$X_{ij}(\varphi_i)$ - wskazanie czujnika x w i-tym położeniu kąowym, w j-tym obrocie,

$Y_{ij}(\varphi_i)$ - wskazanie czujnika y w i-tym położeniu kąowym, w j-tym obrocie.

Wzór (2) opisuje tzw. biegunowy wykres chwilowych położen osi powierzchni pomiarowej względem wyznaczonego wg wzoru (1) środka okręgu, reprezentującego położenie „idealne” osi. Różnica promieni okręgu opisanego na tym przebiegu i okręgu wpisanego w ten przebieg, wykreślone na rys. 2 jako okrąg zewnętrzny i wewnętrzny definiowana jest jako Błąd Całkowity Ruchów poprzecznych osi (Total Error Motion). Błąd ten reprezentuje maksymalną różnicę chwilowych odchyłek odległości osi wrzeciona od środka układu współrzędnych zdefiniowanego w (1). Różnica promieni eliminuje mimośród. Na rys. 2 wartość tego błędu wynosi $2,04\mu\text{m}$.

3. Określenie błędu asynchronicznego. Metodyka zakłada ocenę powtarzalności chwilowych położen osi, stąd wynik jest uśredniany z co najmniej kilku obrotów. Jeśli dla każdego położenia kąowego (φ_i) obliczymy maksymalną i minimalną wartość promienia: $r_{\max}(\varphi_i)$, $r_{\min}(\varphi_i)$, otrzymamy minimalne i maksymalne odchylenia osi wrzeciona odpowiadające każdemu położeniu kąowemu. Linie poprowadzone przez zbiory tych odchyłek w każdym położeniu kąowym mają pewien rozrzut od $r_{\min}(\varphi_i)$ do $r_{\max}(\varphi_i)$ (Na rys. 2 widoczne jako rozrzut cienkich linii, stanowią chwilowe położenia ruchów asynchronicznych –

nie związanych z obrotami wrzeciona). Maksymalna szerokość tego rozrzutu jest definiowana jako Błąd Asynchroniczny Ruchów promieniowych osi (Asynchronous Error Motion). Można go też interpretować jako maksymalną amplitudę drgań poprzecznych wirującej osi odniesioną do położenia kąowego. Na rys. 2 wartość tego błędu wynosi $1,42\mu\text{m}$.

4. Określenie błędu synchronicznego. Jeśli dla każdego położenia kąowego (φ_i) obliczymy średnią wartość promienia $r_s(\varphi_i)$, to zbiór tych wartości określi synchroniczne (skorelowane z obrotami) przemieszczanie się osi wrzeciona. Na rys. 2 wykreślono je grubą linią. Różnica promieni okręgów opisanego i wpisanego na średniej wartości odległości osi wrzeciona od środka układu, definiowana jest jako Błąd Synchroniczny Ruchów promieniowych osi (Synchronous Error Motion). Na rys. 2 jego wartość wynosi $0,93\mu\text{m}$. Podobnie wyznaczane są błędy ruchów wzdłużnych osi.

5. Przy pomiarach błędów ruchu osi bezpośrednio mierzony jest parametr nazywany TIR (Total Indicator Reading), na podstawie którego wyznaczamy błędy ruchu. Pomocny jest on także do sumarycznej analizy dokładności i diagnostyki wrzecion. Reprezentuje maksymalne zarejestrowane przemieszczenia na kierunku ustawienia czujnika przemieszczeń. Wyznaczony parametr TIR zawiera w sobie:

- mimośród powierzchni pomiarowej względem wyliczonej osi wrzeciona;
- błędy geometryczne powierzchni pomiarowej;
- błędy ruchów osi, na kierunku pomiaru;
- przemieszczenia dynamiczne korpusu wrzeciennika wynikające z niewyważenia, sztywności, właściwości dynamicznych (częstotliwość drgań własnych);
- szumy pomiarowe.

Przy odpowiedniej analizie i znajomości niektórych składników TIR (np. stosując trzpienie wzorcowe o znanej geometrii), można uzyskać informacje o przemieszczeniach końcówki narzędzia, błędach geometrycznych oprawek, a także wykorzystać TIR do pomiaru prędkości obrotowej.

WYTYCZNE DO WYKRYWANIA BŁĘDÓW MONTAŻU WEDŁUG OPISYWANEJ METODYKI BŁĘDNYCH RUCHÓW

Wyznaczane błędy pozwalają powiązać błędy pracy wrzeciona z dokładnością obróbki oraz z problemami źródłowymi mogącymi powodować błędy obróbki. Wytyczne przedstawiono w tab.1. Jakość obrabianej powierzchni rozumiana jest najczęściej jako chropowatość.

Tabela.1. Wytyczne do diagnostyki wrzecion na podstawie opisanej metodyki

Wyznaczane parametry ruchu wrzeciona wg opisanej metodyki	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe pracy wrzecion
Błąd synchroniczny promieniowy	Błąd okrągłości obrabianej powierzchni	Błąd okrągłości: - bieżni łożysk - obsady łożysk Błąd ustawienia obsady łożysk
Błąd asynchroniczny promieniowy	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni przy niektórych prędkościach	Niedostateczna sztywność lub niewyważenie, częstotliwości rezonansowe maszyny, luzy promieniowe
Błąd synchroniczny osiowy	Błąd jakości obrabianej powierzchni	Niewłaściwe napięcie wstępne łożysk, błędy ustawienia obsady łożysk
Błąd asynchroniczny osiowy	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni przy niektórych prędkościach	Niedostateczna sztywność lub niewyważenie, częstotliwości rezonansowe maszyny, luzy osiowe

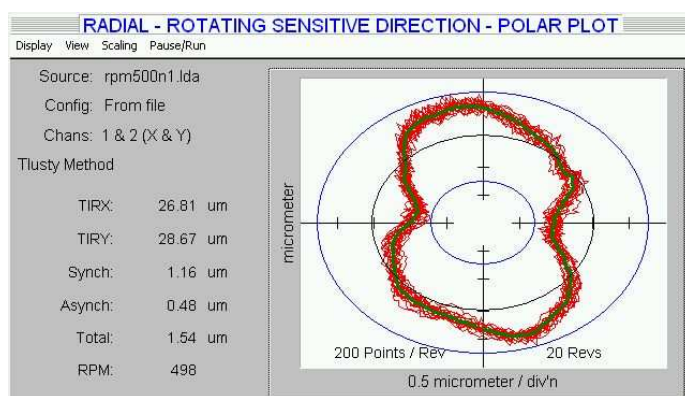
Tabela.1. cd.

Wyznaczane parametry ruchu wrzeciona wg opisanej metodyki	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe pracy wrzecion
Całkowite mierzone przemieszczenie promieniowe lub osiowe (TIR)	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni, błędy dokładności obróbki	Znaczna mimośrodowość oprawek lub szczęk uchwytów względem osi obrotu wrzecion
Znaczne zmiany całkowitego mierzonego przemieszczenia promieniowego lub osiowego (TIR) w funkcji obrotów	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni, szybsze zużycie płytek skrawających, błędy dokładności obróbki	Luzy osiowe i promieniowe w obsadach łożysk
Zmiana w czasie pozycji osi wrzeciona względem przedmiotu obrabianego	Błędy dokładności i powtarzalności obrabianych powierzchni od odkształceń cieplnych	Za duże napięcie wstępne łożysk, za ciasne pasowania łożysk, zbyt mała efektywność chłodzenia elektrowrzecion

Kierując się wymienionymi w tabeli 1 wytycznymi przedstawiono dwa przykłady wykrywania błędów wrzecion.

Przykład 1. Badania odbiorcze wrzecion

Na rys. 3 i 4 przedstawiono wyniki badań dwóch wrzecion tokarek zmontowanych z tych samych komponentów – dobrze i źle zmontowanego.

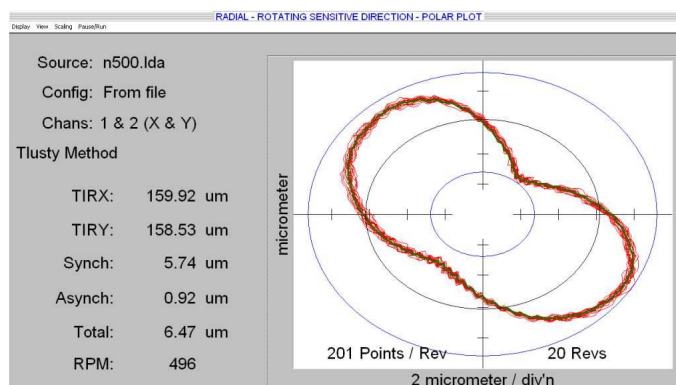


Rys. 3. Poprawnie zmontowane wrzeciono tokarki

W tokarce wg rys. 3 stwierdzono poprawność montażu i niewielkie błędy ruchów osi, spełniające wymagania WOT. Wyniki badań były podobne w całym zakresie sprawdzanych prędkości obrotowych. Z wykresu na rys.3 wynika, że błąd owalności np. wytaczanych otworów wynikający z dokładności osi obrotu wrzeciona (błąd synchroniczny) nie powinien znacznie przekraczać ok. $1\mu\text{m}$ (praktycznie wynika z błędów geometrycznych zastosowanych łożysk $=1\mu\text{m}$), a uzyskiwana chropowatość powierzchni powinna być wysoka (niewielki błąd asynchroniczny). Parametr TIR wskazuje na niewielki błąd mimośrodowości szczęk uchwytu względem uśrednionej wartości na poziomie ok. $25\mu\text{m}$.

W tokarce wg rys. 4 stwierdzono około pięciokrotnie wyższy błąd synchroniczny, niż wynika z zastosowanych łożysk, co będzie powodować błąd owalności toczonej powierzchni. Jednocześnie stwierdzono znaczne bicie nowych szczęk uchwytu (TIR), co przy większych prędkościach obrotowych może powodować drgania od niewyważenia i problemy z odpowiednią chropowatością powierzchni, szyb-

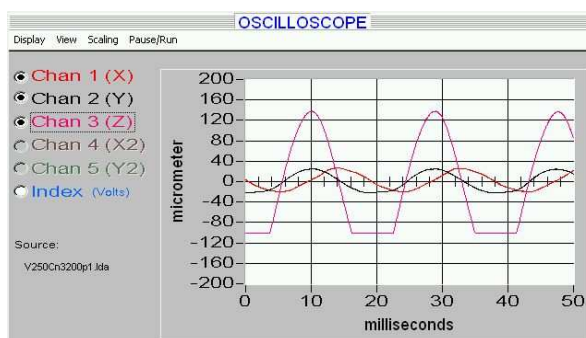
sze zużywanie płytek skrawających – występuje prawie dwukrotnie większy błąd asynchroniczny niż w przykładzie z rys.3. Prawdopodobna przyczyna zniekształcenia bieżni łożysk to owalność obsad lub błąd montażowy powodujący przekoszenie obsad łożysk (błąd wymiarowy, napięcia wstępnego).



Rys. 4. Niepoprawnie zmontowane wrzeciono tokarki

Przykład 2. Błędy jakości obróbki i wzrost drgań przy wzroście obrotów w tokarce

Próby obróbki wykazały znaczny wzrost drgań wrzeciona przy wzroście prędkości oraz znacznie szybsze zużywanie się płytek skrawających, niż wcześniej, kłopoty z utrzymaniem odpowiedniej jakości powierzchni obrabianej. Przy wolnych obrotach błędy obrotu wrzeciona były niewielkie, przy wzroście prędkości stwierdzono (max. dla prędkości ok. 3200obr/min) nawet stukrotny wzrost ruchów wzdłużnych osi wrzeciona, z 3 do ok. 300µm, z częstotliwością obrotów wrzeciona. Po analizie konstrukcji wrzeciona stwierdzono, że przyczyną wzrostu drgań wrzeciona może być luz wzdłużny na zewnętrznym pierścieniu oporowym łożyska. Pierścień odkształcił się i wgniół częściowo w miękką korpus wrzeciennika – użyto zbyt dużych sił przy montażu -powodem był błąd konstrukcyjny, podcięcie technologiczne szersze niż pierścień oporowy łożyska, co w tym przypadku spowodowało złe ułożenie się pierścienia w montażu. Błąd ujawniał się dopiero przy znacznym wzroście sił dynamicznych przewyższających masę wrzeciona i opory tarcia w obudowie, czyli przy wzroście obrotów powyżej 2000obr/min. Nie było potrzeby wymiany łożysk, wystarczyło wymienić pierścień na grubszy i odpowiednio napiąć łożyska. Na rys. 5 przedstawiono wykresy rejestrowanego parametru TIR dla $n=3200\text{obr/min}$ (na osi Z przekroczony ustawiony zakres pomiarowy czujnika – 0,25mm).



Rys. 5. Ruch wzdłużny osi Z z częstotliwością obrotów przekraczający zakres pomiarowy czujników – objawiający się znacznymi drganiami przy obróbce

Metody pomiarów drgań korpusu nie wykrywały przyczyny powstających błędów obróbki i szybkiego zużywania się płytek skrawających, a pomiary bicia geometrycznego nie pokazywały błędów.

OPIS METODYKI POMIARÓW BŁĘDÓW ZADANEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ I WYTTCZNE DO WYKRYWANIA BŁĘDÓW MONTAŻU

Odpowiednia metoda pomiaru prędkości obrotowej jest niezbędna dla oceny błędów i zjawisk zachodzących dla niektórych rodzajów obróbki wymagających synchronizacji prędkości i ruchów interpolowanych, np:

- błędów synchronizacji prędkości (np. przy pracy z przechwytem),
- dokładności obróbki metodą skojarzonego ruchu przedmiotu i narzędzia (np. przy „toczeniu” wielokątów na tokarkach),
- błędów obróbki kształtowej skojarzonego ruchu obrotowego osi „C” wrzeciona i osi posuwowej (np. toczenie gwintów falistych).

Wyznaczane parametry to prędkość chwilowa, równomierność prędkości nastawionej, odchyłka od prędkości zadanej. Problem dokładnego pomiaru prędkości chwilowej wynika z dwóch przyczyn technicznych – wymagania bardzo dokładnego pomiaru drogi i bardzo krótkich odcinków czasu.

Przykładowo: dla 1000obr/min i tylko dla 60pkt/obr, czas pomiaru 1/60obr wynosi 1ms. Dla zachowania dokładności 0,1obr/min przy 1000obr/min czas 1/60obr. należy zmierzyć z dokładnością 0,5ns! Przy wyższych prędkościach i np. 360pkt/obr czasy zmniejszają się do pikosekund, a wymagana dokładność pomiaru będzie zachowana przy odmierzaniu także bardzo dokładnych odcinków drogi.

Rozwiązano to poprzez wprowadzenie standardowego sygnału z enkodera na wejście licznikowe karty pomiarowej taktowanej częstotliwością 80MHz i zliczaniu ilości impulsów pomiędzy kolejnymi sygnałami z enkodera o bardzo dokładnie odmierzanych odcinkach drogi. Dokładne enkodery najczęściej mają zbyt dużą rozdzielczość, odcinki czasu są przy większych prędkościach za krótkie przy dysponowanej częstotliwości 80MHz, aby zapewnić odpowiednią dokładność z pomiaru prędkości pojedynczych impulsów - konieczna jest dodatkowa obróbka sygnałów zarejestrowanych, polegająca na uśrednieniu prędkości z dowolnie wybieranej ilości kolejnych próbek. Zastosowano enkoder z pomiarem optycznym bezstykowym o 11840imp/obr, o dokładności 7” i rozdzielczości impulsów na drodze co 0,1μm dla wolnych obrotów do 50obr/min i co 20 μm dla stosowanych prędkości do 2000obr/min.

Opracowana w Laboratorium CBKO metoda [4] pozwala na ocenę średniej odchyłki prędkości od prędkości zadanej oraz ocenę równomierności prędkości. Pozwala wykryć w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego błędy montażu związane z dokładnością ustalonego przełożenia obrotów silnika na obroty wrzeciona, błędnym napięciem pasów, biciem osi wrzeciona i silnika, powodującą zmiany chwilowe przełożenia i nierównomierność prędkości, ewentualnie błędy ustawień układu regulacji prędkości. Błędy należy diagnozować w odniesieniu do rozwiązania konstrukcji napędu. Przykładowo, jeśli występuje napęd z silnika na wrzeciono pasem z przełożeniem różnym od jedności, to niewielki błąd rozstawu osi nawet o ułamki % powoduje błąd nastawy, a bicie osi wałów silnika i wrzeciona powoduje nierównomierność prędkości na obrót. W tabeli 2 przedstawiono wytyczne do diagnostyki wrzecion na podstawie opisanej metodyki pomiarów.

Kierując się w/w wytycznymi przedstawiono 2 przykłady wykrywania błędów wrzecion.

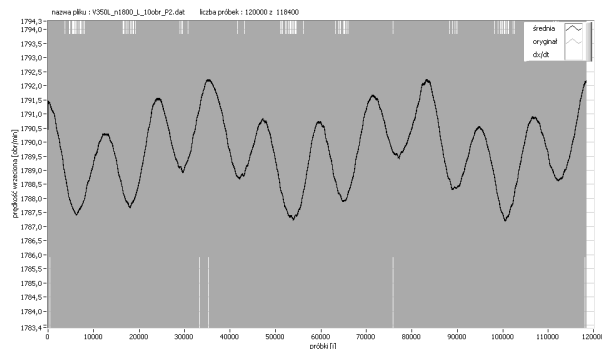
Na rys.6 przedstawiono przykład występowania wymienionych błędów dla nastawionej prędkości 1800obr/min. Występuje błąd średniej prędkości ok. 10obr/min i błąd nierównomierności prędkości ok. 5obr/min. Wykres przedstawia zmiany prędkości w czasie 10 obrotów. Główna częstotliwość zmian to częstotliwość wynikająca z obrotów. Przyczyn należy szukać w błędach rozstawu i bicia osi lub zbyt dużym napięciu pasa powodującego odkształcenia geometrii osi obrotu, ewentualnie błędu współosiowości przetwornika kąta i osi wrzeciona montowanego na jednej osi. Widoczne są także zmiany powtarzalne co ok. 3 obroty - mogą wynikać z ustawień regulatora obrotów. Błędy te przekładają się na znaczne błędy obróbki związane z synchronizacją obrotów.

Na rys. 7. przedstawiono przykład błędów nastaw prędkości przy obróbce wykorzystującej ruchy skojarzone obrotowe i posuwowe. Widoczny znaczny błąd nastawy (ok. 9%) może prowadzić do dużych błędów kształtu obrabianych powierzchni i może wynikać ze źle dobranych nastaw regulatora prędkości. Błąd nierównomierność prędkości, przy tak wolnych obrotach, może wynikać z błędów pozycjonowania zastosowanego przetwornika kąta obrotu, lub zmian oporów ruchu, które przy źle dobranych nastawach regulatorów prędkości może powodować błędy nadążania objawiające się nierównomiernością prędkości.

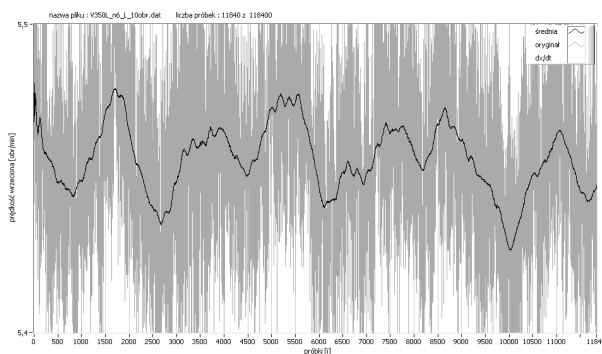
Na opisanych przykładach widać, że metoda pozwala wykrywać prawdopodobne przyczyny błędów obróbki wynikające z dokładności ruchu obrotowego i wskazuje dalszy tok postępowania dla usunięcia problemów. Np. jeśli stwierdzone błędy nierównomierności są duże, to pomiar pozycjonowania osi obrotowej powinien wyjaśnić, czy źródła błędów należy szukać w dokładności pozycjonowania, czy w nastawach układu sterowania.

Tabela.2. Wytyczne do diagnostyki wrzecion na podstawie opisanej metodyki

Wyznaczane wskaźniki dokładności ruchu obrotowego wrzeciona wg opisanej metodyki	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe montażu wrzecion
Błąd średniej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie nastawionych obrotów	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu obrotowego przedmiotu i narzędzia	<ul style="list-style-type: none"> - Błąd przełożenia przekładni wynikający z błędów rozstawu osi lub średnic kół - Błąd nadążania wynikający z za niskich wzmocnień regulatora prędkości
Błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie nastawionych obrotów	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu przedmiotu i narzędzia Błędy podziału kąтового obrabianych przedmiotów przy stosowaniu obróbki z synchronizacją prędkości dwóch osi obrotowych	<ul style="list-style-type: none"> - Błąd bicia promieniowego kół przekładniowych względem osi wrzeciona lub osi silnika napędowego - Zbyt duże lub zbyt małe napięcie pasów przekładniowych - Błąd współosiowości przetwornika obrotów i osi wrzeciona - Zbyt mała prędkość działania układu regulacji prędkości
Błąd nastawionej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie pozycjonowania kąowego	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonych ruchów osi posuwowych i obrotowej	<ul style="list-style-type: none"> - Błąd przełożenia przekładni wynikający z błędów rozstawu osi lub średnic kół - Błąd nadążania wynikający z za niskich wzmocnień regulatora prędkości lub za dużych oporów ruchu
Błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie pozycjonowania kąowego	Błędy kształtu i falistość obrabianych powierzchni metodami skojarzonych ruchów osi posuwowych i obrotowej	<ul style="list-style-type: none"> - Zbyt duże lub zbyt małe napięcie pasów przekładniowych - Błąd bicia promieniowego kół przekładniowych względem osi wrzeciona lub osi silnika napędowego - Błędy pozycjonowania przetwornika kąta obrotu - Zmienne opory ruchu (wynikające np. z ustawionego zbyt dużego napięcia wstępnego łożysk)



Rys. 6. Wykres rzeczywistej prędkości (z 10 obrotów) dla nastawy 1800obr/min



Rys. 7. Wykres rzeczywistej prędkości (1 obrót) dla nastawy 6 obr/min

PODSUMOWANIE

- Najbardziej efektywne z punktu widzenia dokładności obróbki i analizy błędów montażu są opisane szerzej w p.2 i 4 dwie metody badań, inne wymienione metodyki mogą być stosowane jako pomocnicze do dalszej diagnostyki.
- Przedstawiona metodyka badań i oceny dokładności wirujących wrzecion, poza bezpośrednią oceną dokładności jest wyjątkowo przydatna do diagnostyki problemów związanych z pracą wrzecion, a w porównaniu z diagnostyką wibracyjną związaną z analizą drgań korpusów ułatwia wnioskowanie, gdyż uzyskiwane wyniki bezpośrednio przekładają się na wzajemne przemieszczenia przedmiotu i narzędzia. Na podstawie uzyskiwanych wyników można wnioskować o spodziewanej dokładności i jakości obróbki, przy zadanej prędkości obrotowej wrzeciona.
- Przedstawiona metoda pomiarów prędkości chwilowych uzupełnia metodę pomiarów błędnych ruchów wirujących osi pozwalając diagnozować błędy obróbki wynikające ze sterowania i regulacji obrotów oraz ich przyczyny, co jest bardzo istotne z punktu widzenia niektórych rodzajów obróbki.
- Przedstawione metodyki przeznaczone są do oceny pracy precyzyjnych wrzecion obrabiarek, ale nie wyklucza to innych podobnych zastosowań w zakresie diagnostyki ruchu obrotowego (np. stołów obrotowych lub diagnostyki innych rodzajów maszyn).

LITERATURA

1. Jastrzębski R. (2006), Metodyka badań elektrowrzeciennika zabudowanego na obrabiarce, Sprawozdanie NH/B-05-2006, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek
2. Jastrzębski R., Szepke A. (2009), Badanie wpływu wybranych czynników na dokładność i stabilność pracy elektrowrzeciennika na przykładzie centrum obróbkowego frezarskiego DIANA 1000, Sprawozdanie NH/B-01-2009, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek Sp. z o.o.
3. Jemielniak K. (2004), Analiza błędnych ruchów wrzecion szybkoobrotowych, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska, Vol. 24, Nr 2
4. Jastrzębski R., Welk A. (2006), Badanie dokładności obrabiarek sterowanych numerycznie. Badanie synchronizacji prędkości obrotowej wrzecion napędzanych silnikiem przez przekładnie pasowe we wrzeciennikach głównym i przechwytyjącym zainstalowanych w tokarce Venus 350/750, Sprawozdanie NH/B-03-2007, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek
5. PN-ISO 230-1:1998 – Przepisy badania obrabiarek. Dokładność geometryczna obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej
6. PN-ISO 230-2:1999 – Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie
7. ISO 230-3:2007 – Test code for machine tools – Part 3: Determination of thermal effects
8. ISO 230-7:2006 – Test code for machine tools – Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation
9. Marchelek K. (1997) Dynamika obrabiarek, WNT, Warszawa 1997
10. Wysocki P. (1998), Opracowanie metody pomiarów sztywności statycznej w oparciu o tory pomiarowe przemieszczeń liniowych, Sprawozdanie NB-30-1998, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek
11. Cempel Cz. (1982), Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT, Warszawa 1982

„Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy”.

DETECTION OF MISTAKES IN ASSEMBLY OF PRECISE QUICK-ROTARY MACHINE SPINDLES

Abstract. *The increase of competitiveness of companies is possible through production of goods of higher quality and of tighter tolerances. This is related to higher demands of accuracy of technological machines, which include CNC machine tools. From a certain level of accuracy, it is not enough to use most precise parts in assembly, it is also necessary to assemble them precisely in components and to be able to evaluate the assembly quality. In machine tools, one of main components that influence machining accuracy is the spindle. In this article, presented are procedure and possible utilization of various test methods used to evaluate the spindle work, that influence the machining quality in terms of such assembly errors as accuracy of bearing rotation, backlash, errors of set rotational speed, accuracy of clamping of tool or workpiece, sources of excessive vibrations and heat induced displacement of tool or workpiece. Capabilities of various spindle test methods are compared as used for diagnostics of assembly errors. Examples are given of CNC machine tools spindle tests and detected assembly errors that are the cause of improper machining.*

Katarzyna ANTOSZ
Jerzy LUNARSKI
Politechnika Rzeszowska

OCENA KONKURENCYJNOŚCI SYSTEMU MASZYN TECHNOLOGICZNYCH W PROCESACH MONTAŻU

THE ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL MACHINES SYSTEM COMPETITIVE IN ASSEMBLY PROCESSES

WPROWADZENIE

Posiadany SMT powinien realizować cały portfel technologii wykorzystywanych przez organizację do wytwarzania swoich wyrobów za wyjątkiem tych technologii, którymi dysponują kooperanci będący dostawcami organizacji. SMT powinien być dobrany nie tylko pod kątem realizowanych technologii, lecz również przewidywanych zmian asortymentowych i ilościowych produkcji. Ponieważ popyt na wytwarzane wyroby może ulegać zmianom, to zmienia się również wewnętrzne zapotrzebowanie na posiadane zdolności produkcyjne powodujące ich nierównomierne obciążenie w czasie [1].

Zadanie to łatwiej jest realizować w ustabilizowanej produkcji seryjnej, a trudniej w nieustabilizowanej małoseryjnej, zmiennej asortymentowo produkcji, koniecznym jest przy tym stałe bilansowanie zdolności produkcyjnej SMT i popytu na te zdolności w postaci produkcji wyrobów potrzebnych na rynku. Trudność takiego bilansowania polega na tym, że zdolności produkcyjne są stałe a zmienia się zapotrzebowanie na te zdolności, przy czym to zapotrzebowanie może być różne na poszczególne grupy maszyn lub pojedyncze maszyny. Powoduje to, że tam gdzie zapotrzebowanie jest duże a zdolności ograniczone, pojawiają się zatory produkcyjne zwane „wąskimi gardłami” tzw. zasoby krytyczne. Istniejące w organizacji zasoby krytyczne limitują jej zdolności produkcyjne – produktywność maszyn [3].

Jeszcze jednym czynnikiem utrudniającym opracowanie metodyki oceny lub samooceny przydatności konkurencyjnej SMT są zróżnicowane sposoby grupowania poszczególnych maszyn i urządzeń w komórkach organizacyjnych takich jak: gniazda, oddziały, linie, elastyczne systemy wytwarzania, wydziały i in. Wszystkie wymienione wyżej czynniki powodują, że przeprowadzenie dokładnej oceny przydatności konkurencyjnej całego SMT jest trudne. Istnieje natomiast potrzeba dokonywania określonych ocen tej przydatności np. w trakcie przeglądów zarządzania, przeglądów strategii, technologii, konkurencyjności itp. W celu ukierunkowania procesów decyzyjnych skierowanych na doskonalenie struktury SMT dla lepszego wykorzystania tkwiących w nim potencjalnych możliwości.

MODEL OCENY KONKURENCYJNOŚCI SYSTEMU MASZYN TECHNOLOGICZNYCH

W celu umożliwienia przeprowadzenia samooceny przydatności konkurencyjnej SMT w sposób uproszczony, który byłby przydatny dla celów porównawczych i decyzyjnych, proponuje się następujący tok postępowania:

1. W pierwszym etapie oceny określić odpowiedni wskaźnik przydatności konkurencyjnej poszczególnych maszyn i urządzeń zgrupowanych w konkretnej komórce organizacyjnej w oparciu o przyjęte kryteria i zdefiniowaną skalę oceny (dla ułatwienia proponowana jest skala 1 ÷ 5, przy czym 1 oznacza słabą lub złą przydatność, a 5 – bardzo dobrą przydatność).
2. W drugim etapie dokonuje się oceny zgrupowania maszyn i urządzeń znajdujących się w określonej komórce organizacyjnej, wykorzystując ocenę poszczególnych jednostek oraz

posługując się kryteriami i skalami ocenowymi (od 1 do 5) adekwatnymi dla danej komórki i stosując odpowiednio dobrane współczynniki wagowe.

3. W trzecim etapie przeprowadza się obliczenia uśrednionej przydatności wszystkich ocenianych komórek organizacyjnych wprowadzając, w razie potrzeby, współczynniki wagowe różnicujące znaczenie dla organizacji jej szczególnie ważnych, ze względów strategicznych, komórek produkcyjnych.

Dla oceny poszczególnych maszyn lub urządzeń zgrupowanych w poszczególnych komórkach wskazanym jest przyjąć następujące kryteria ocenowe:

M 1. Przydatność serwisowa urządzenia i stopień doskonałości zorganizowanej obsługi.

M 2. Stopień zautomatyzowania urządzenia zwiększający jego wydajność.

M 3. Bezpieczeństwo pracy i bezpieczeństwo ekologiczne, które sformułowano w [4]

M 4. Stopień wyeksploatowania i postępującego zużycia

M 5. Zdolność maszyny. Szczegółowa charakterystyka kryteriów ocenowych została zaprezentowana w publikacji [6].

Etap pierwszy podsumujemy wyznaczając dla każdego urządzenia średnią wartość jego przydatności przy rozpatrywanych pięciu kryteriach (w określonych przypadkach w celu uproszczenia można wybrane kryterium pominąć). Traktując je jako równorzędne tzn. dla dowolnego urządzenia ocenę oblicza się wg wzoru:

$$PM_i = \frac{M1 + M2 + M3 + M4 + M5}{5} \quad (1)$$

gdzie: za $M1 \div M5$ podstawia się wartości punktowe dla każdego kryterium ustalone w oparciu o przytoczone skale.

Wyznaczone wartości PM_i dla poszczególnych maszyn i urządzeń wskazują na ich potencjalną przydatność w prowadzonej działalności produkcyjnej. W podobny sposób uśredniając można obliczyć potencjalną przydatność grupy urządzeń usytuowanych w rozpatrywanej komórce organizacyjnej jako:

$$GPM = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m PM_i \quad (2)$$

gdzie: m – liczba maszyn i urządzeń ocenianych w rozpatrywanej komórce organizacyjnej.

Celem drugiego etapu oceny jest wyznaczenie konkretnej przydatności (a nie potencjalnych możliwości jak w etapie poprzednim) rozpatrywanej grupy maszyn i urządzeń w istniejących warunkach funkcjonującej produkcji. W tym celu można posłużyć się dwoma kryteriami:

K 1 – kryterium kategoryzacji maszyn i urządzeń w rozpatrywanej grupie wskazujące na realnie istniejące zapotrzebowanie na jego zdolności produkcyjne [5].

Dla rozpatrywanej komórki organizacyjnej kategorię przydatności produkcyjnej rozpatrywanej grupy maszyn można obliczyć w sposób następujący:

$$GPK = \frac{n_5 \cdot 5 + n_4 \cdot 4 + n_3 \cdot 3 + n_2 \cdot 2 + n_1 \cdot 1}{m} \quad (3)$$

gdzie: n_1 – liczba maszyn i urządzeń zaliczana do kategorii 1,

n_2 – liczba maszyn zaliczonych do kategorii 2 itd.

$m = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5$ – łączna liczba maszyn i urządzeń w rozpatrywanej komórce.

K 2. Drugim kryterium oceny zespołu maszyn w rozpatrywanej komórce jest średni czas pracy wyrażony w procentach czasu dysponowanego GPC (przy przyjętej zmianowości, 1- lub 2-zmianowa praca). Obliczamy go w ten sposób, że sumujemy rzeczywiste czasy pracy poszczególnych urządzeń i dzielimy przez iloczyn czasu dysponowanego i liczby urządzeń w rozpatrywanej komórce i wyrażamy ten stosunek w procentach.

Na ostateczną ocenę przydatności grupy maszyn zlokalizowanych w rozpatrywanej komórce organizacyjnej złożą się następujące oceny cząstkowe:

- średnia ocena potencjalnych możliwości i cech sprzyjających przydatności tych maszyn GPM z wagą $W=1$,
- średnia ocena kategoryzacji maszyn ze względu na ich możliwości i ich wykorzystywanie w bieżącej produkcji GPK z wagą $W_2=3$,
- średnia ocena wykorzystania w czasie grupy maszyn przy realizacji bieżących zadań produkcyjnych GPC z wagą $W_3=2$.

Wówczas ostateczna ocena przydatności i konkurencyjności OPK grupy maszyn i urządzeń usytuowanych w rozpatrywanej komórce wyniesie:

$$OPK = \frac{GPK \cdot 3 + GPC \cdot 2 + GPM}{6} \quad (4)$$

Obliczona wg powyższej zależności wartość OPK może się znajdować w przedziale wartości od 1 (zły i słabo przystosowany SMT do potrzeb konkurencyjności) do 5 (optymalnie przystosowany system do potrzeb konkurencyjności). Ocena ta uwzględnia nie tylko cechy poszczególnych maszyn i urządzeń, lecz również umiejętności i kompetencje organizacji w racjonalnym wykorzystywaniu tego SMT do potrzeb produkcyjnych.

Trzeci i ostatni etap oceny polega na obliczeniu wartości OPK w poszczególnych komórkach produkcyjnych i obliczenie wartości uśrednionej. Jeśli poszczególne komórki są w przybliżeniu równorzędne, może to być średnia arytmetyczna. Jeśli natomiast niektóre komórki spełniają szczególnie ważną rolę, to ich wartość OPK można pomnożyć przez odpowiednio dobrany współczynnik wagowy ($w = 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$), zaś obliczoną średnią podzielić przez sumę użytych współczynników wagowych, aby ostateczny wynik mieścił się w przedziale wartości od 1 do 5.

W przybliżeniu można przyjąć, że gdy obliczone wartości przytoczonych wskaźników (GPM, GPC, GPK i OPK) mieszczą się w przedziale wartości 1 – 2,5, to wskazuje to na brak cech konkurencyjności SMT lub też brak umiejętności jego właściwego wykorzystania (projektowanie wyrobu, planowanie produkcji, organizacja obsługi, marketing i in.). Wartości tych wskaźników w przedziale 2,5 – 3,5 wskazują na średnią konkurencyjność posiadanego SMT oraz średnie umiejętności i kompetencje personelu przy jego użytkowaniu. Natomiast wartości tych wskaźników w przedziale 3,5 – 5,0 wskazują na dużą konkurencyjność organizacji, umiejętnie wykorzystującej swój SMT przez zapewnienie zgodności wyrobów ze strukturą SMT, właściwą obsługą i odnowę oraz racjonalne planowanie zadań realizowanych w SMT. Na rys. 1 przedstawiono algorytm postępowania przy ocenie parku maszyn technologicznych z wykorzystaniem modelu oceny przydatności konkurencyjnej.

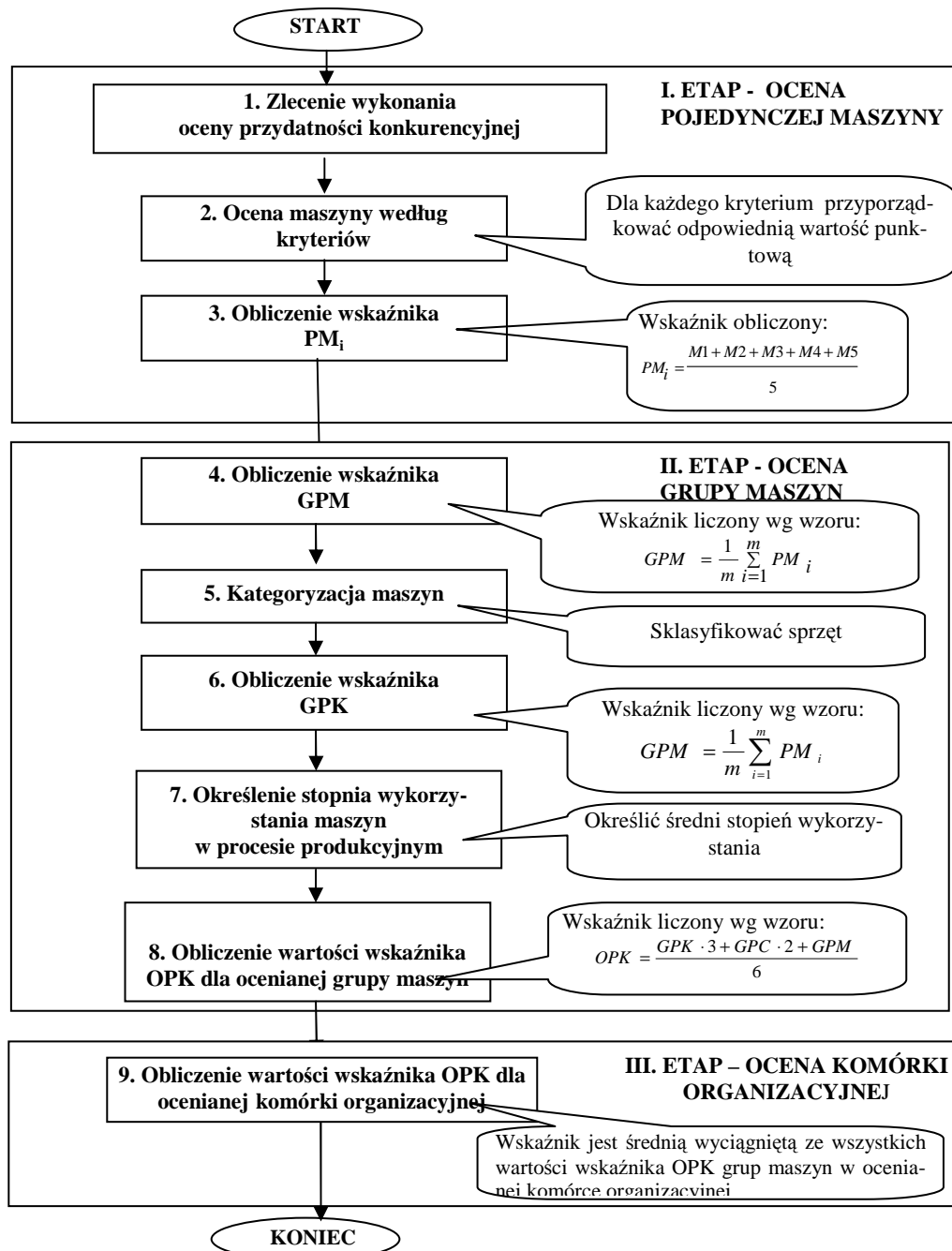
WERYFIKACJA PRZEMYSŁOWA OPRACOWANEGO MODELU

Weryfikacji modelu oceny przydatności konkurencyjnej parku maszyn technologicznych dokonano dla pięciu wybranych losowo liniach produkcyjnych przedsiębiorstwa, w którym prowadzone były działania wdrożeniowe w zakresie metody wartościowania procesowego. Na ocenianych liniach produkcyjnych wytwarzane były części składowe wyrobu finalnego.

Przy przeprowadzaniu oceny uczestniczył mistrz linii oraz operator poszczególnej obrabiarki, a jej wyniki posłużyły do oceny przydatności konkurencyjnej grupy maszyn.

Średni stopień wykorzystania grupy maszyn w rozpatrywanej komórce oszacowany został na podstawie informacji dotyczących planowanego obciążenia maszyn oraz ich rzeczywistego wykorzystania w procesie produkcyjnym.

W tab. 1 przedstawione zostały wyniki z przeprowadzonych ocen przydatności konkurencyjnej dla wybranej linii produkcyjnej. W tabeli umieszczone zostały następujące kryteria ocenowe: przydatność serwisowa, stopień zautomatyzowania, bezpieczeństwo pracy i ekologia, stopień wyeksploatowania, współczynnik zdatności oraz ich wartości punktowe dla każdej maszyny z linii uzyskane w trakcie badań, jak również ich wartości średnie dla ocenianej grup maszyn.



Rys. 1. Model oceny przydatności konkurencyjnej – algorytm postępowania

Ponadto dla każdego stanowiska przedstawiono wartość wskaźnika PM. W dolnej części tabeli umieszczone zostały obliczone wartości pozostałych wskaźników: GPK, GPC, GPM. W prawnym dolnym rogu przedstawiono wartość miernika OPK dla rozpatrywanej linii produkcyjnej.

Tab. 1. Wskaźniki przydatności konkurencyjnej dla wybranej linii produkcyjnej.

Kryteria	Maszyna																	Wartość średnia
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Przydatność serwisowa	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5	5	5	5	4	4,29
Stopień automatyzacji - zowania	1	4	4	4	4	1	3	1	1	4	4	1	4	4	4	4	1	2,88
Bezpieczeństwo pracy i ekologia	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	n/d	5	4	5	5	4,81
Stopień wyeksploatowania	1	1	1	1	2	1	1	2	1	5	5	1	n/d	5	5	5	1	2,38
Współczynnik zdolności n/d - nie badano	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
PM	2,75	3,5	3,5	3,5	3,75	2,75	3,25	3	2,75	4,75	4,25	2,5	4,5	4,75	4,5	4,75	2,75	
Wartości wskaźników																		
GPM	3,54	GPC				4,35		GPK			3,0			OPK				3,54

Wszystkie oceniana linia osiągnęły wartość wskaźnika OPK z najwyższego przedziału wartości. Najniższą wartość wskaźnika uzyskano w przypadku linii piątej i wyniósł on 3,54, a najwyższy był w przypadku linii pierwszej i osiągnął poziom 4,07. Taki przedział wartości wskaźnika świadczy o dużej konkurencyjności ocenianego parku maszyn technologicznych. Niemniej jednak nie jest to wartość maksymalna, możliwa do osiągnięcia, dlatego warto byłoby przeanalizować wartości poszczególnych mierników cząstkowych dla całej linii produkcyjnej (GPM, GPK, GPC). Ponadto istotnym elementem analizy powinna być prześledzenie kształtowania się wartości przy poszczególnych kryteriach ocenowych. Przykładowo w przypadku linii 5 bardzo niską średnią wartość uzyskano przy kryterium stopień wyeksploatowania – 2,38, co świadczy, że w procesie produkcyjnym wykorzystywane są maszyny przestarzałe, w których okres amortyzacji został wykorzystany, w 100%, czego efektem mogą być nagłe zmiany ich stanu technicznego, a w rezultacie nieplanowane przestoje, nieoczekiwane zmiany parametrów obróbki oraz związane z tym straty produkcyjne. W takim przypadku należałoby się zastanowić nad możliwością wymiany poszczególnych maszyn na nowsze lub przeprowadzeniu na wybranych z nich prac remontowych połączonych z modernizacją. Niską wartością wskaźnika na tej linii charakteryzuje się stopień zautomatyzowania – osiąga wartość 2,88. W przypadku tego kryterium należałoby przeanalizować rodzaj wykonywanych prac na poszczególnych stanowiskach roboczych, co ułatwiłoby identyfikację możliwości wymiany wykorzystywanych maszyn na bardziej zautomatyzowane. Pozostałe kryteria uzyskały bardzo wysokie oceny powyżej 4.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzenie weryfikacji przemysłowej opracowanego modelu oceny przydatności konkurencyjnej miało na celu uzyskania dwóch typów informacji. Po pierwsze przydatności oraz możliwości wykorzystania zaprezentowanego modelu w warunkach produkcyjnych. Po drugie natomiast czy uzyskiwane informacje dają podstawę do dalszego doskonalenia procesu zarządzania systemem maszyn technologicznych w przedsiębiorstwie. Na podstawie przedstawionych wyników oraz doświadczeń zdobytych w trakcie prowadzonych badań oceniono bardzo wysoką przydatność opracowanego modelu, czego dowodem jest:

– Akceptacja oraz bardzo wysoka ocena ze względu, na jakość oraz ilość uzyskiwanych informacji ze strony kierowników oraz menedżerów poszczególnych komórek organizacyjnych, czego dowodem jest

proponując powszechnego wykorzystania opracowanego modelu jako jednego z narzędzi benchmarkingu wewnętrznego,

– Uznanie ze strony osób wypełniających ankietę, którzy podkreślali jej prosty i czytelny sposób, co nie sprawiało im trudności w jej realizacji oraz nie było pracą zbyt czasochłonną,

Ponadto zaprezentowane sklasyfikowanie sprzętu ma ogromne znaczenie przy organizacji odpowiedniego procesu nadzorowania szczególnie w realizacji procesu usuwania awarii, oraz planowania działań prewencyjnych (przeglądy, okresowe kontrole wybranych parametrów eksploatacyjnych) Te elementy systemu obsługi i nadzoru będą miały zastosowanie do wszystkich grup maszyn, w pierwszej jednak kolejności dla maszyn kategorii pierwszej i drugiej.

Zastosowanie takiego podejścia pozwoli na wyeliminowanie dwóch przyczyn nieefektywności funkcjonowania obszaru działalności remontowej w przedsiębiorstwach, a mianowicie różnorodność procedur służb utrzymania ruchu w odniesieniu do podobnych lub identycznych maszyn i urządzeń, jak również wykonywanie przez Służby Utrzymania Ruchu niepotrzebnych prac oraz wykorzystywanie zbyt konserwatywnych metod.

W przedsiębiorstwach o specyficznych cechach parku maszyn technologicznych możliwe jest wprowadzenie odmiennych kryteriów od proponowanych lub odmienne scharakteryzowanie pięciostopniowych skal ocenowych w celu uwzględnienia uzyskania wyników wiarygodnych dla tej organizacji. Ponadto przy poszczególnych wskaźnikach możliwe jest wprowadzenie współczynników wagowych uwzględniających aktualne lub też wynikające ze strategicznych założeń rozwojowych priorytety organizacji.

Zaprezentowany model oceny przydatności konkurencyjnej przedsiębiorstwa jest narzędziem przydatnym zarówno w małych, średnich jak również dużych przedsiębiorstwach.

LITERATURA

1. Downarowicz O.: System eksploatacji . Zarządzanie zasobami techniki. ITE radom, Gdańsk – Radom, 2000.
2. Kaźmierczak J.: Eksploatacja systemów technicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
3. Łunarski J., Antosz K.: Niektóre problemy polepszania efektywności eksploatacyjnej systemu maszyn technologicznych (SMT). Materiały. Konferencyjne – Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych., Radom – Stare Jabłonki, 2005.
4. Łunarski J., Antosz K.: Ecological, technical, and organizational aspects of machine tools repair and modernization, Acta Mechanica Slovaca. Koszyce 2002.
5. Łunarski J., Antosz K.: Operation of system automatized technological machinery with quantification price input, , Acta Mechanica Slovaca, 2-A/2006, Ročník 10.
6. Łunarski J., Antosz K.: Uproszczony model oceny przydatności konkurencyjnej maszyn technologicznych , TiAM 3/2007.

THE ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL MACHINES SYSTEM COMPETITIVE IN ASSEMBLY PROCESSES

Abstract. *In this work the model of the technological machines system assessment is presented. This model was elaborated in Department of Manufacturing Processes and Production Organization of the Technical University in Rzeszów. Self - assessment concerns systems three levels of the technological machines system: a single machine, the group of machines (production line) and an organization cell. Presented model was verified in the company.*