

**Jerzy ŁUNARSKI**

Politechnika Rzeszowska

## **Wprowadzenie**

### **MONTAŻ MASZYN JAKO REALIZACJA STRUMIENIA POŁĄCZEŃ**

Aktualne tendencje rozwoju technik wytwarzania wskazują na coraz szerszy rozwój zautomatyzowanych metod wytwarzania zarówno w procesach wytwarzania półfabrykatów (odlewy, odkuwki, wytłoczki), ich obróbki (wiórowej, ścierniej, nagniataniem), procesów konstituowania warstw (nawęglanie, azotowanie, implantacja i in.), nakładania powłok ochronnych (chemicznych, galwanicznych, natryskiwanych, z tworzyw sztucznych i in.) oraz metod łączenia elementów (spawanie, lutowanie, zgrzewanie i in.).

Z pomocą powyższych procesów można konstituować pożądane cechy elementów składowych maszyn (wytrzymałość, sztywność, odporność na zużycie i in.). Mają one znaczący wpływ na eksploatacyjne charakterystyki wyrobów maszynowych. Jednakże główne cechy użytkowe i eksploatacyjne w znacznym stopniu zależą od sposobów zaprojektowania i wykonania poszczególnych połączeń w wytwarzanym obiekcie. Montaż wyrobu można traktować jako ciąg wytwarzania poszczególnych połączeń z jednoczesnym nadaniem im pożądanych właściwości. W trakcie ich projektowania przejawiają się dwie przeciwstawne tendencje:

- uproszczenia konstrukcji i ułatwienia ich wykonania, co często preferuje połączenia nierozłączne (deformacyjne, lutowane, zgrzewane i in.),
- umożliwienia łatwego demontażu elementów po zakończeniu eksploatacji celem ich recyklingu, co preferuje połączenia rozłączne bardziej pracochłonne (skręcane, składane, zatrzaskowe, wciskane i in.).

Ze względu na konieczność zapewnienia wymaganej jakości użytkowej połączeń ich wytwarzanie wymaga starannego dopracowania szeregu układów (orientujących, ustalających, kontrolnych, diagnostycznych i in.), co łącznie znacznie komplikuje systemy montażowe, zwłaszcza zautomatyzowane. Ze względu na tę złożoność oraz różnorodność obiektów montażu automatyzacja tych procesów jest znacznie mniej zaawansowana jak automatyzacja innych technik wytwarzania, w których nie występują trudności porównywalne do montażowych.

Z powyższych względów zauważa się wzrost udziału pracochłonności prac montażowych w ogólnej pracochłonności wytwarzania wyrobów, która może wynosić od 20% do 30% dla produkcji wielkoseryjnej i masowej 60÷70% w produkcji małoseryjnej, przy wytwarzaniu złożonego osprzętu, wyrobów precyzyjnych i in.

Ten znaczny udział oraz tendencja jego wzrostu (ze względu na szybciej postępującą automatyzację innych technik wytwarzania) stanowią potencjalną rezerwę zmniejszenia pracochłonności montażu poprzez opracowania i upowszechnienie efektywnych metod automatyzacji procesów wytwarzania połączeń montażowych i ich ciągłego strumienia w wykonywanych obiektach finalnych. Skuteczne rozwiązanie tych problemów może przyczynić się do wyraźnego wzrostu konkurencyjności przedsiębiorstw z dużym udziałem prac montażowych w swojej ofercie.

Do ważniejszych przedsięwzięć, sprzyjających temu można zaliczyć następujące:

1. Konieczność zapewnienia odpowiedniej technologiczności konstrukcji w trakcie projektowania połączeń montażowych, przejawiające się między innymi w:
  - konstrukcja połączenia powinna ułatwiać stosowanie wysokowydajnych metod montażu i kontroli,
  - liczba łączonych elementów powinna być możliwie minimalna podobnie jak liczba połączeń w wytwarzanej maszynie,
  - należy zapewnić łatwą dostępność narzędzi do stref połączeń, koniecznych dla wykonania połączenia, kontroli, regulacji,
  - należy preferować połączenia łatwe do automatycznej realizacji i unikać połączeń pracochłonnych, trudnych do automatyzacji (drutowe, taśmowe, klejowe i in.),
  - preferować połączenia możliwe do realizacji przy osiowym pionowym montażu z zastosowaniem na elementach łączonych stref wejściowych ułatwiających rozpoczęcie montażu (fazki, stożki, zaokrąglenia itp.).
2. Konieczność przestrzegania zasad i wymagań normalizacji sprzyjających ograniczeniu różnorodności, tzn.:
  - ograniczanie typowymiarów do liczb preferowanych,
  - stosowanie luzów i wcisków odpowiadających preferowanym pasowaniom,
  - opracowaniu norm zakładowych na nowe, innowacyjne połączenia stosowane w przedsiębiorstwie, ograniczające ich rozwiązania konstrukcyjne,
  - stosowanie zasad typizacji i unifikacji przy projektowaniu połączeń.
3. Praktyczne wykorzystywanie zasad modularyzacji w procesach projektowania układów i systemów montażowych charakteryzujących się:
  - łatwością łączenia i rozłączania poszczególnych modułów z systemem montażowym,
  - kompatybilnością stref łączenia poszczególnych modułów,
  - zamiennością modułów ułatwiającą ich wymianę i sprzyjającą polepszeniu niezawodności obiektu.
4. Zalecany sposób postępowania w celu zapewnienia wymaganych właściwości eksploatacyjnych wykonywanych połączeń montażowych, obejmuje następujące czynności:
  - zdefiniowanie warunków funkcjonowania połączeń (obciążenia, prędkości, temperatury, wibracje i in.),
  - ustanowienie właściwości eksploatacyjnych poszczególnych elementów połączenia (materiał, wytrzymałość, odporność na zużycie i in.),
  - opracowanie procesu technologicznego montażu, którego parametry, jak również stan urządzeń montażowych, zapewnia uzyskanie wymaganych właściwości, w sposób ekonomiczny,
  - analiza pracochłonności i kosztochłonności opracowanego procesu celem jego ulepszenia pod względem uzyskiwanych właściwości i redukcji kosztów,
  - realizacja ulepszanego procesu z zastosowaniem środków kontroli i nadzoru zapewniających poprawną, bezusterkową realizację procesu.

Efektywność montażu, zarówno zmechanizowanego jak i zautomatyzowanego, jest w dominujący sposób uzależniona od konstrukcji połączenia i technologii jego wykonania, gdyż:

- wpływają one bezpośrednio na cechy jakościowe i niezawodność eksploatacji obiektu z tymi połączeniami,
- ich konstrukcja i sposób wykonania mają bezpośredni wpływ na pracochłonność i koszty wykonania montowanego obiektu,
- zastosowane rodzaje połączeń powinny sprzyjać procesom zrównoważonego rozwoju poprzez minimalizację ich materiałochłonności, energochłonności oraz możliwości łatwego recyklingu po zakończeniu eksploatacji.

Z powyższych względów konstrukcja, technologia i eksploatacja połączeń montażowych są przedmiotem zainteresowań i prac badawczo-rozwojowych w różnych ośrodkach naukowych i przemysłowych stanowiąc jeden z głównych i ważnych działań na rzecz doskonalenia i automatyzacji montażu.

Referaty naukowe publikowane w niniejszym, monotematycznym Zeszybie Naukowym Politechniki Rzeszowskiej opracowane zostały przez znanych specjalistów z zakresu montażu z różnych ośrodków krajowych i zagranicznych. Prezentowane w nich osiągnięcia teoretyczne, eksperymentalne i techniczno-wdrożeniowe powinny przyczynić się do upowszechnienia tej wiedzy wśród projektantów maszyn, technologów projektujących procesy montażowe i personelu nadzorującego realizację tych procesów.

O aktualności i ważności tych problemów świadczy również podjęcie tej problematyki przez kwartalnik naukowo-techniczny „TECHNOLOGIA I AUTOMATYZACJA MONTAŻU”, który w bieżącym roku większość prezentowanych prac poświęca również połączeniom montażowym, ich automatyzacji oraz wpływom połączeń na inne czynności montażowe (organizacja i technologia montażu, problemy jakości i niezawodności systemów montażowych i montowanych obiektów i in.).

Władze Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, doceniając ważność problematyki montażu maszyn, determinującej bezpieczeństwo i niezawodność ich funkcjonowania, co ma duże znaczenie zwłaszcza w przemyśle lotniczym, zachęcają Autorów publikowanych prac do podtrzymywania kontaktów i współpracy z Wydziałem w celu dalszego rozwoju i doskonalenia połączeń montażowych.



**I**  
**PROBLEMY PROJEKTOWANIA**  
**MONTAŻU I POŁĄCZEŃ**



Włodimir N. KORENKOW

Anatolij A. SUBIN

Uniwersytet Techniczny

„Politechnika Kijowska”

Kijów, Ukraina

### AUTOMATYZACJA FORMOWANIA POZĄTKOWEJ INFORMACJI DLA ANALIZY MONTOWANYCH WYROBÓW

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СБОРОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье приведен анализ исходных данных необходимых для автоматического функционирования программных модулей анализа сборочных изделий. Описано программное обеспечение для автоматизации ввода, а также обработки геометрической информации непосредственно со сборочной 3D модели изделия.

Одними из основных задач, связанными с обеспечением модуля САAPP (Computer aided assembly process planning) исходной информацией является поиск возможных направлений относительных перемещений деталей и проверка условия их доступа в зону сборки. Решению первой задачи посвящено достаточно большое количество работ. В целом, все методы можно разделить на три следующие группы.

Априорное определение возможных направлений перемещений (например, направления коллинеарные системе координат).

Определение возможных направлений перемещений на базе анализа *кинематических пар* [1-4]. Поскольку идентифицировать наиболее распространенные типы поверхностей в современных 3D CAD достаточно просто, выделяют плоскостные, сферические, цилиндрические, конические и винтовые пары. Возможные перемещения определяются по количеству степеней свобод (рис. 1).

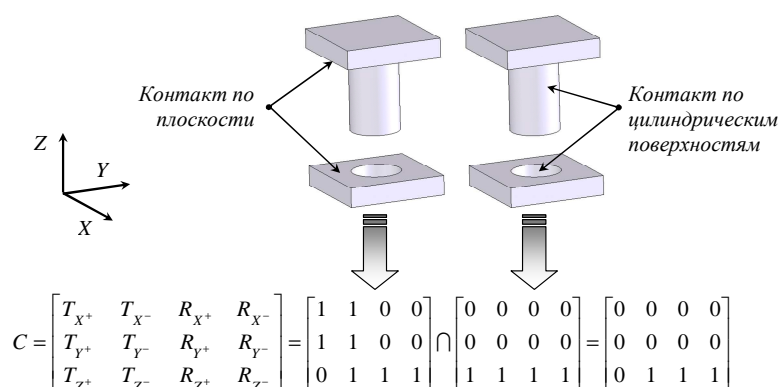


Рис. 1. Пример определения направлений взаимных перемещений деталей путем анализа движений в кинематических парах

Rys. 1. Przykład wyznaczania kierunków wzajemnych przemieszczeń części w oparciu o analizę ruchu w kinematycznych parach

Третья группа методов сводится к анализу *топологии поверхностей контакта* деталей [5-10]. Это позволяет определять не отдельно взятые направления, а объем пространства, в котором может перемещаться деталь по произвольной траектории относительно другой детали (рис. 2).

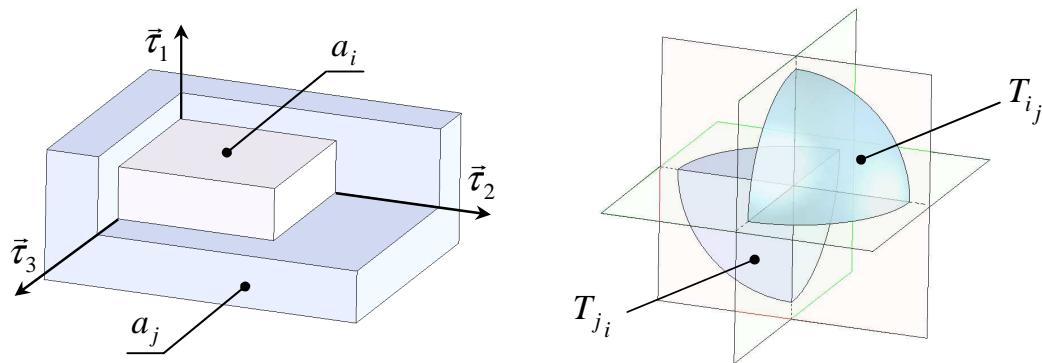


Рис. 2. Геометрическое представление множества траекторий перемещений  $T_{ij}$  детали  $a_i$  относительно  $a_j$

Rys. 2. Geometryczna wizualizacja zbioru trajektorii przemieszczeń  $T_{ij}$  części  $a_i$  względem  $a_j$

В общем случае, при перемещении детали  $a_i$  относительно группы деталей  $A' = \{a_j, \dots, a_m\}$ , справедливо равенство (рис. 3):

$$T_{i(j, \dots, m)} = \bigcap_{q=j}^m T_{iq}$$

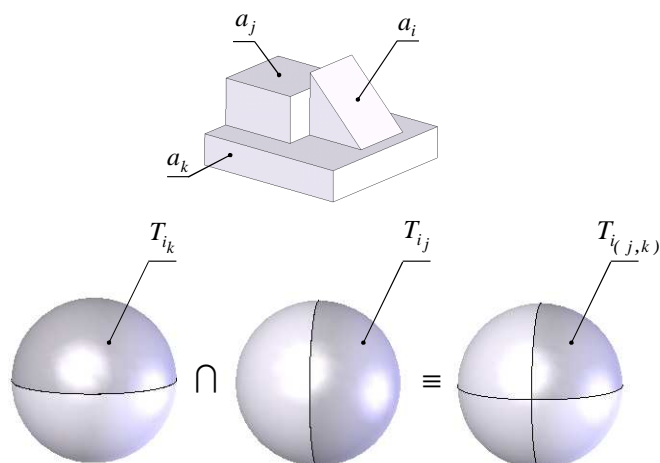


Рис. 3. Определение пространства перемещений групп деталей

Rys. 3. Wyznaczanie przestrzennych przemieszczeń grup części



Однако определив в один из приведенных выше способов потенциально возможное направление установки детали, необходимо проверить условие доступа данной детали к месту сборки.

С точки зрения геометрии, условие доступа выполняется, если трехмерный объект, представляющий собой след от движения детали по некоторой траектории, не пересекает ни одного из уже установленных в изделие элементов (рис. 4).

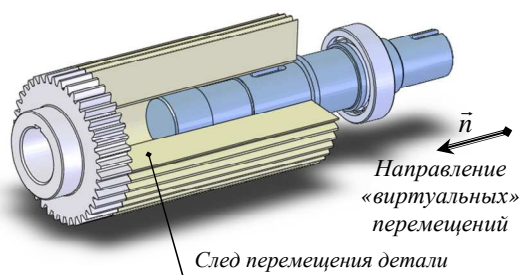


Рис. 4. Проверка условия доступа

Rys. 4. Sprawdzanie warunków dostępności

Алгоритмически реализовать данное определение современные 3D CAD системы на сегодня не позволяют. Поэтому возникает необходимость разработки методов, которые косвенно выполняли бы анализ условия доступа.

В случае использования твердотельных 3D моделей, эффективным является метод «виртуальных» перемещений объектов, описание программной реализации которого приведено в [11-13]. Содержание данного метода состоит в перемещении 3D модели детали  $a_i$  сборочного изделия относительно своего первоначального положения на некоторую величину  $\epsilon$  в направлении  $t \in T$  и проверке наличия области пересечения между объектами изделия. Деталь  $a_i$  ограничивает  $a_j$  в направлении  $t \in T$ , если на расстоянии, равном габаритному размеру изделия (при перемещении  $a_j$  с шагом  $\epsilon$ ), будет найдена область пересечения между соответствующими 3D объектами (рис. 5).

Одним из существенных недостатков данного метода является достаточно высокая трудоемкость вычислений при малых значениях  $\epsilon$ , а при увеличении значения  $\epsilon$  - появляется вероятность того, что элементы конструкций двух деталей могут находиться между фиксированными точками проверки. Как следствие, часть областей пересечения не будет обнаружена.

Данных недостатков лишен метод анализа пересечений проекций поверхностей деталей [14]. Его суть достаточно проста: если при взаимном поступательном перемещении деталей вдоль некоторого направления  $t \in T$  детали пересекаются, то также пересекаются и проекции участков поверхностей этих деталей на плоскость, перпендикулярную  $t$  (рис. 6).

Как видно из рис. 6, элемент  $S_j^p$  ограничивает возможное перемещение  $S_i^p$  в направлении  $\vec{t}_k \in T_{i_j}$  только при двух условиях:

- при наличии как минимум двух треугольников  $\Delta_g \in S_j^p$  и  $\Delta_q \in S_i^p$ , проекции которых на плоскость  $\chi$ , перпендикулярную  $\vec{t}_k \in T_{i_j}$ , пересекаются;
- при расстоянии между  $\Delta_g \in S_j^p$  и  $\Delta_q \in S_i^p$  в направлении движения  $L_{(\Delta_g, \Delta_q)} > 0$  (очевидно, что поверхность, которой принадлежит треугольник  $\Delta_r \in S_j^p$  не ограничивает перемещение  $S_i^p$ ).

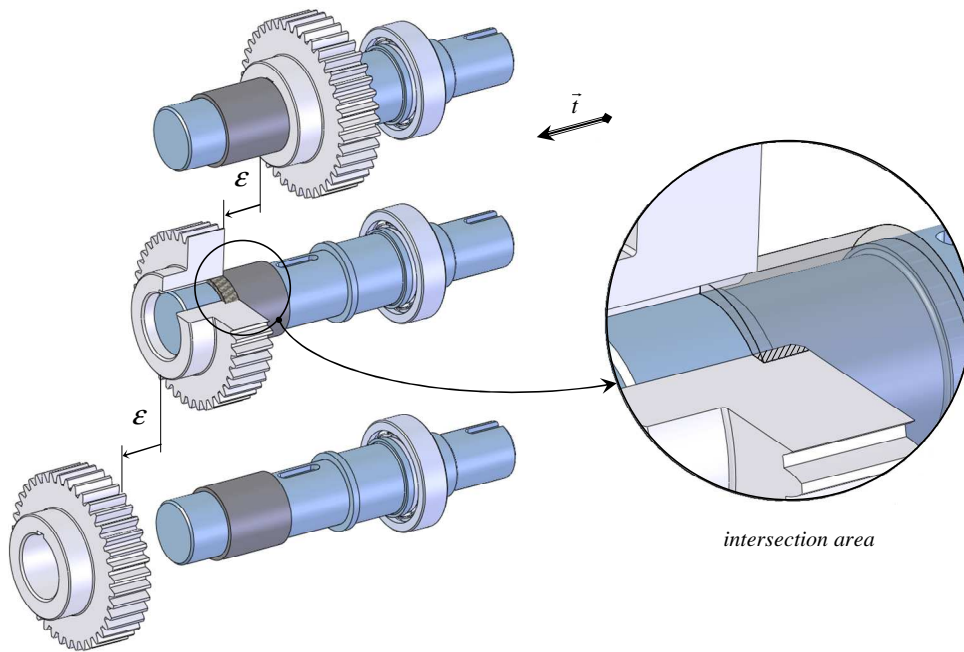


Рис. 5. Пример определения возможности установки детали «Зубчатое колесо» методом «виртуальных» перемещений

Rys. 5. Przykład określenia możliwości ustawienia części „koło zębate” metodą wizualnych przemieszczeń

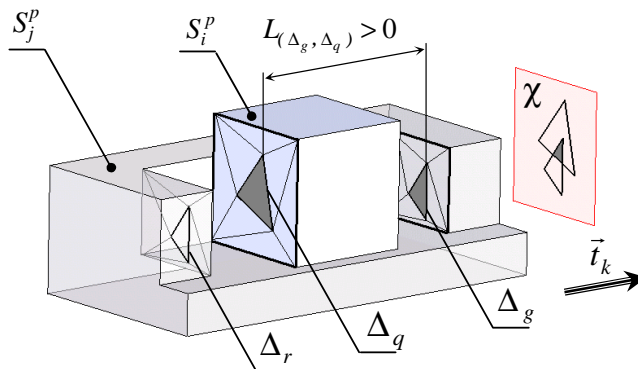


Рис. 6. Пример определения возможности установки детали методом анализа пересечений проекций поверхностей

Rys. 6. Przykład określenia możliwości ustawienia części metodą analizy przecięć projekcji powierzchni

Данный подход позволяет свести задачу из трехмерной к двухмерной. Чтобы проверить пересечения одной пары полигональных поверхностей (треугольников) требует лишь 74 арифметических операции. Но несмотря на все преимущества, главная причина, которая не позволяет его широко использовать - большая трудоемкость вычислений (при достаточно грубой аппроксимации, для сборки из  $\sim 100$  деталей необходимо выполнить более  $10^{12}$  операций, что естественно за приемлемое для конструктора время невозможно).

Наиболее удачным можно считать модификацию приведенного выше метода – анализ пересечения проекций отдельно взятых поверхностей [15, 16], а не только их аппроксимированных фрагментов.

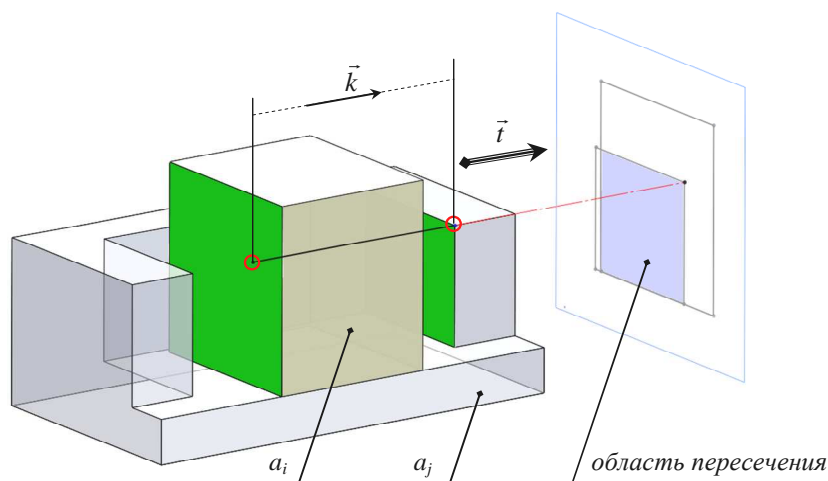


Рис. 7. Пример определения параметров детали методом проекций

Rys. 7. Przykład określenia parametrów części metodą projekcji

Алгоритмическая основа данного метода может быть описана следующим правилам:

1. Импорт через промежуточный формат (к примеру, \*.stp или \*.igs) геометрии из 3D CAD систем и формирования древовидной структуры: «деталь - перечень поверхностей».
2. Для каждой детали, исходя из контактных ограничений определить множество наиболее значимых направлений монтажа.
3. По каждому направлению для всех пар деталей:
  - Для всех комбинаций поверхностей двух деталей определить наличие области пересечения их проекций.
  - В случае выявления области пересечения, следует определить взаимное положение поверхностей касательно направления анализа (совпадение векторов  $t$  и  $k$ ).

Таким образом, можно сделать вывод, что анализ непосредственно топологии сплайновых поверхностей на данном этапе развития CAD является едва ли не единственным методом формирования начальных данных (за приемлемое для инженера время) для систем автоматизированного проектирования технологии сборки изделий.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Kramer G.A. Solving geometric constraint systems, a case study in kinematics, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
2. Laperrière L., ElMaraghy H. GAPP: A generative assembly process planner // Journal of Manufacturing Systems. – 1996. – Vol. 15, №4. – P. 282-293.
3. Turner J., Subramaniam S., Gupta S. Constrain representation and reduction in assembly modeling and analysis // IEEE Transaction on Robotics and Automation. – 1992. – Vol. 8, №6. – P. 741-749.
4. Пасічник В.А. Виявлення кінематичних з'єднань у складальній одиниці на основі інформації про бінарні відношення обмеження рухливості / В.А. Пасічник, Ю.В. Лашина // Труды Одесского политехнического университета: Науч. и произв.-прак. сб. по техн. и ест. наукам. – Одесса, 2008. – Вып. 1(29). – С.31-35
5. Woo T.C., Dutta D. Automatic disassembly and total ordering in three dimensions // Transactions of the ASME. – 1991. – Vol. 113, № 2. – P. 207-213.
6. Woo T.C. Visibility maps and spherical algorithms // Computer Aided Design. – 1994. – Vol. 26, №1. – P.6-16.
7. Wilson R.H., Latombe J. Geometric reasoning about mechanical assembly // Artificial Intelligence. – 1994. – Vol. 71, №2. – P. 371-396.
8. Latombe J., Wilson R.H., Cazals F. Assembly Sequence with tolerances parts // Computer Aided Design. – 1997. – Vol. 29, №2. – P.159-174.
9. Romney B., Godard C., Goldwasser M., Ramkumar G. An Efficient System for Geometric Assembly Sequence Generation and Evaluation // Proc. ASME International Computers in Engineering Conference. – 1995. – P. 699-712.
10. Siddique Z., Rosen D.W. A virtual prototyping approach to product disassembly reasoning // Computer Aided Design. – 1997. – Vol. 29, №12. – P. 847-860.
11. Давыгора В.Н., Пасечник В.А., Сімута Р.Р. Спосіб визначення взаємних обмежень рухливості деталей у складальній одиниці // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2000. – №3 / ч.2. – С. 157-161.
12. Сімута Р.Р. Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – К., 2003. –174 с.
13. Сімута Р.Р. Визначення бінарних відношень обмеження рухливості деталей складальної одиниці в напрямках, які не є колінеарними головній системі координат // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2002. – №6. – С. 89-93 .
14. Кореньков В.М. Автоматизований синтез маршрутних технологічних процесів складання. Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – К., 2005. –171 с.
15. Rejneri N. Détermination et simulation des opérations d'assemblage Lors de la conception de systèmes mécaniques: These Pour obtenir le grade de Docteur de l'Inpg Institut national polytechnique de Grenoble 2000.
16. Romney B., Godard C., Goldwasser M., Ramkumar G. An Efficient System for Geometric Assembly Sequence Generation and Evaluation // Proc. ASME International Computers in Engineering Conference. – 1995. – P. 699-712.

#### AUTOMATING THE FORMATION OF THE INITIAL DATA FOR THE ANALYSIS OF AN ASSEMBLY

**Abstract.** This paper presents the analysis of required initial data for computer-aided modules, which realize the analysis of an assembly. The software for computer-aided input of initial data as well as for the processing the geometric information directly from the product's 3D model is described.

**Vitaliy PASICHNYK****Julia ŁASZINA**

Uniwersytet Techniczny

„Politechnika Kijowska”

Kijów, Ukraina

**ANALIZA I DOSKONALENIE KONSTRUKCJI WYROBÓW Z WYKORZYSTANIEM  
OPROGRAMOWANIA „DFA EXPERT”****АНАЛИЗ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «DFA EXPERT»**

В статье представлен метод целенаправленного перепроектирования сборочного изделия и реализованная на его основе новая система DFA Expert. Использование в данной системе существующих математических моделей сборочного изделия и технологического процесса сборки позволило, кроме основных функции анализа, реализовать интеграцию DFA Expert с другими системами поддержки жизненного цикла изделий.

Многие современные предприятия стараются управлять процессами создания своей продукции, используя подход, называемый «Бережливое производство» (*Lean Production*). Основной целью такого подхода является сокращение издержек производства, а одним из инструментов реализации, – «Параллельное проектирование» (*Concurrent Engineering*), подразумевающее одновременное и взаимообусловленное проектирование конструкции изделия и производственных процессов.

Метод параллельного проектирования, направленный на снижение затрат на сборку продукта за счёт проектирования конструкций, изначально ориентированных на сборочные процессы, получил название «Конструирование, ориентированное на сборку» (*DFA – Design for Assembly*) [1]. Этот метод объединяет в себе как набор определённых правил и рекомендаций по проектированию конструкций новых изделий, так и процедуры анализа существующих изделий с целью их перепроектирования.

Проведённые исследования [1] свидетельствуют о том, что машиностроительная продукция содержит в среднем 50% «лишних» деталей, т.е. деталей, которые можно исключить путём перепроектирования, а потому и процессы сборки таких изделий оказываются значительно дороже, чем это необходимо. Данная ситуация может быть объяснена тем, что на сегодняшний день DFA анализ конструкции практически не автоматизирован.

Самыми известными методами DFA анализа являются: *Hitachi Assemblability Evaluation Method*, *Boothroyd Dewhurst System* [1], *Lucas DFA Technique* [2]. На основании этих методов реализованы следующие экспертные системы: *Design for Assembly 9.2 (Boothroyd Dewhurst System)* и *TeamSET Software (Lucas DFA Technique)*. Однако, даже для этих, общепризнанных систем, характерным является достаточно низкий уровень автоматизации, в частности то, что практически все исходные данные вводятся пользователем вручную, а обработка результатов выполняется человеком. Поэтому, актуальной задачей является разработка системы, позволяющей проводить DFA анализ продукта, для которой существует возможность интеграции с другими системами поддержки жизненного цикла изделия. В данной статье представлен метод целенаправленного перепроектирования сборочного изделия и реализованная на его основе новая система *DFA Expert*, имеющая возможность интеграции с системами проектирования изделий.

Сначала определим некоторые понятия и примем обозначения.

*Сборочное изделие* (СИ), спроектированное конструктором, представляет собой иерархически упорядоченное множество деталей и *сборочных единиц* (СЕ).

$A_{mn}^k$  –  $n$ -я СЕ  $k$ -го уровня декомпозиции, принадлежащая  $m$ -й СЕ  $(k-1)$ -го уровня;  $a_{mn}^k$  –  $n$ -я деталь  $k$ -го уровня декомпозиции, принадлежащая  $m$ -й СЕ  $(k-1)$ -го уровня.

Тогда любое СИ может быть описано следующим образом,

$$A^0 = A \cup a \quad (1)$$

Такое представление СИ является исходной информацией для создания *технологического дерева СИ*. Детали, принадлежащие каждому из поддеревьев дерева, представляющего СИ, упорядочиваются согласно *технологическому процессу сборки* (ТПС), а в каждой подсборке выделяются базовые детали. Отметим, что в процессе синтеза последовательности сборки, иерархия компонентов может быть изменена с целью улучшения самого процесса сборки. Для автоматизации решения данной задачи может быть использована математическая модель СИ в виде *бинарных отношений ограничения подвижности* (БООП) [3] и метод обратного синтеза [4]. Для описания процесса сборки нами разработана модель в виде *матрицы последовательности сборки* (МПС) и связанного с каждым её элементом *вектора атрибутов* (ВА) [5].

Каждая строка и столбец матрицы МПС соответствует абсолютному индексу элемента (детали или сборочной единицы) в СИ. Элемент МПС  $s_{ij} = T$ , если после установки элемента  $a_i$  может быть установлен элемент  $a_j$  в направлении  $T \in \{X \pm Y \pm Z \pm \dots\}$ , во всех других случаях  $s_{ij} = 0$ :

$$\exists q_n [Hc_n = Hc_{n-1} + a_i] \rightarrow \exists q_{n+1} [a_j \in Hc_{n+1}] \Rightarrow s_{ij} = T, q \in Q, a \in A, Hc \subseteq A, \quad (2)$$

где  $q_n$  – состояние СИ на  $n$ -ом этапе процесса сборки, принадлежит множеству  $Q$  всех возможных состояний СИ;  $Hc_n$  – состав деталей СИ на  $n$ -ом этапе процесса сборки, является подмножеством всех деталей изделия  $A$ .

ВА представляется в виде множества операций, связанных с конкретной деталью или СИ, содержащего последовательность технологических переходов при её установке (рис. 1).

$$BA(A_{mn}^k) = \{O_1, O_2, \dots, O_i\}, \quad (3)$$

где  $O_i$  – технологический переход.

В ТПС, кроме операций установки элементов СИ, входят операции, которые выполняются над предварительно установленными деталями (сварка, затягивание болтов и т.п.). Такие операции не относятся ни к какому элементу СИ, а просто должны выполняться после определённых операций установки. Предлагается в технологическое дерево СИ в качестве отдельных узлов добавлять псевдодетали (на рис.1 обозначены пунктирной линией), к которым и будут привязаны такие сборочные операции. Введём следующее обозначение:

$op_{mn}^k$  –  $n$ -я псевдодеталь  $k$ -го уровня декомпозиции, которая принадлежит  $m$ -й СЕ  $(k-1)$ -го уровня. С учетом этого, выражение (1) может быть уточнено.

$$A^0 = A \cup a \cup op \quad (4)$$

Технологическое дерево СИ может быть использовано только для описания последовательной сборки. Для распространения предложенного представления ТПС на последовательно-параллельные и параллельные сборочные процессы предлагается рядом с технологическим деревом представлять графическое описание процесса, учитывающее выполнение операций во времени (рис. 1).

Совокупность данных о конструкторских и технологических характеристиках изделия назовём *конструкторско-технологическим решением (КТР)*.

Для DFA анализа важно знать время и стоимость каждой сборочной операции и перехода, на основании которых можно получить временные и стоимостные показатели конкретного КТР. Такой анализ проводится с целью поиска КТР, которое бы обеспечило уменьшение затрат на производство без потери качества изделия. Одним из направлений DFA анализа является сокращение количества деталей СИ за счёт объединения нескольких деталей в одну. Ранее нами были выделены две группы ограничений на объединение деталей: первая – ограничения, анализ которых может быть автоматизирован; вторая – ограничения, которые необходимо оценивать человеку [6].

Результатом проведения автоматизированного DFA анализа в части сокращения количества деталей изделия является набор множеств деталей, которые могут быть объединены с учётом первой группы ограничений. Человек на основании второй группы ограничений принимает решение о переконструировании СИ, в результате получая новое КТР. Новое КТР необходимо оценить с точки зрения затрат, сравнить с уже проанализированными и принять решение относительно продолжения поиска лучшего КТР.

Рассмотрим порядок автоматизированного поиска лучшего КТР, который был положен в основу разрабатываемого нами программного обеспечения *DFA Expert*.

Проект в *DFA Expert* содержит иерархически упорядоченное множество КТР и глобальные настройки для расчёта экономических показателей. Множество КТР описывается деревом, корнем которого является базовый  $KTP_0$  (исходная конструкция), а узлами – все остальные КТР, рёбра отображают последовательность создания КТР.

Для ребра  $l$ , соединяющего два КТР: «родителем» будем называть КТР, соответствующее узлу  $n$ -го уровня, а «потомком» – КТР, соответствующее узлу  $(n+1)$ -го уровня.

Предлагается следующая последовательность поиска лучшего КТР СИ (рис. 2).

На основе трёхмерной модели детали, созданной в CAD-системе, может быть получена информация о конструкторской декомпозиции изделия, габаритных размерах деталей, массе, материалах, некоторых свойствах: хрупкости, гибкости и т.п. С помощью программного обеспечения *Extrass* [7] может быть сгенерирована математическая модель изделия в виде БООП, на основании которой, с использованием алгоритма, представленного в [5], может быть синтезирована математическая модель процесса сборки в виде МПС. Данная модель вместе с характеристиками деталей импортируется в *DFA Expert* через текстовый файл (рис. 3).

Программное обеспечение *DFA Expert* имеет однооконный интерфейс, в центральной части которого отображается текущее КТР, а в левой части отображается дерево существующих КТР. Представлено *технологическое дерево СИ*, затем *экономические показатели СИ* и ТПС (рис. 4).

Для каждого элемента СИ должны быть определены конструкторские и технологические характеристики, которые задаются и редактируются в отдельном окне (рис. 5). Интеграция *DFA Expert* с CAD в данной версии реализована через импорт информации о КТР из текстового

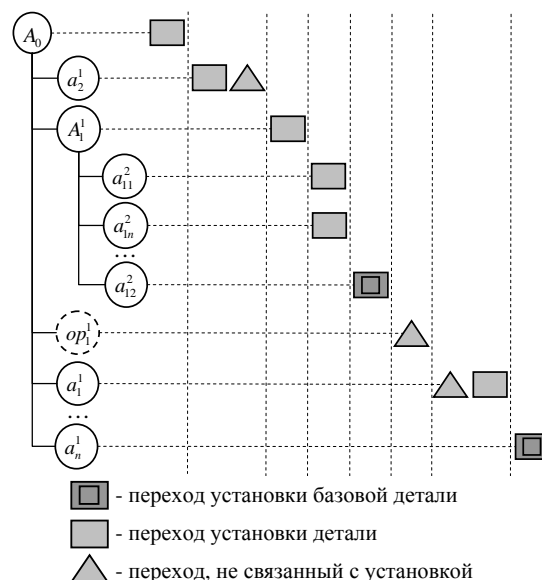


Рис. 1. Конструкторско-технологическое решение

Rys. 1. Konstrukcyjno-technologiczne rozwiązanie

файла, содержащего следующую информацию: количество деталей, название детали, масса, длина, ширина, идентификатор родителя, строка МПС.

Расчёт времени выполнения технологических переходов основывается на методике [1] и представляет собой экспертный расчет суммарного влияния двух составляющих основного времени, определяемого с учетом метода реализации соединения, наличия ограничений доступа и видимости, сложности ориентирования и удержания элементов, энергетических затрат; вспомогательного времени, определяемого с учетом ориентирования и манипулирования, технологических сложностей связанных со сцепляемостью, гибкостью, хрупкостью и т.д. элементов, дополнительных требований. На основании времени выполнения перехода и разрядной сетки, заданной в глобальных настройках проекта, может быть рассчитана стоимость установки каждой детали или СЕ при сборке СИ.



Рис. 2. Алгоритм поиска лучшего КТР

Rys. 2. Algorytm poszukiwania najlepszego konstrukcyjno-technologicznego rozwiązania (KTR)

Завершающим этапом и целью использования *DFA Expert* является сравнительный анализ трудоемкости изготовления и сборки двух или более вариантов КТР для одного изделия. Имеется возможность сравнения КТР по показателям: времени сборки, стоимости сборки, стоимости изготовления и общей стоимости производственных процессов. Результатом работы программного обеспечения является новое КТР, для которого может быть сгенерирован протокол ТПС.

Проиллюстрируем использование *DFA Expert* на примере переконструирования и сравнительного анализа изделия «Пневмораспределитель», исходный вариант конструкции которого представлен на рис. 6, а варианты перепроектирования – на рис. 7.



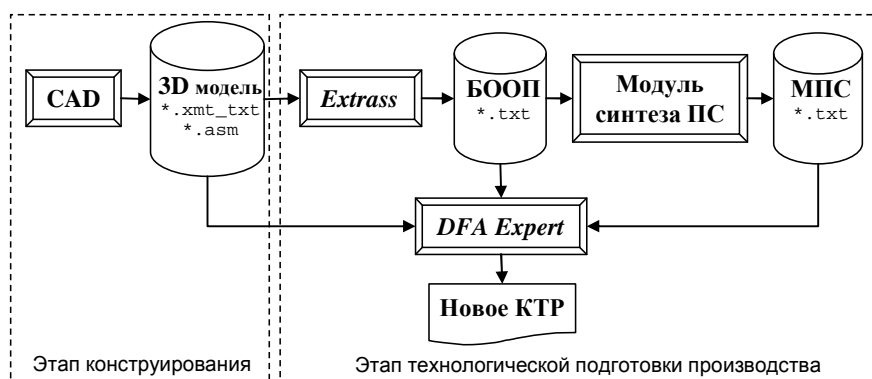


Рис. 3. Взаимодействие подсистем проектирования изделия и технологии

Rys. 3. Współoddziaływanie podsystemów projektowania wyrobu i technologii

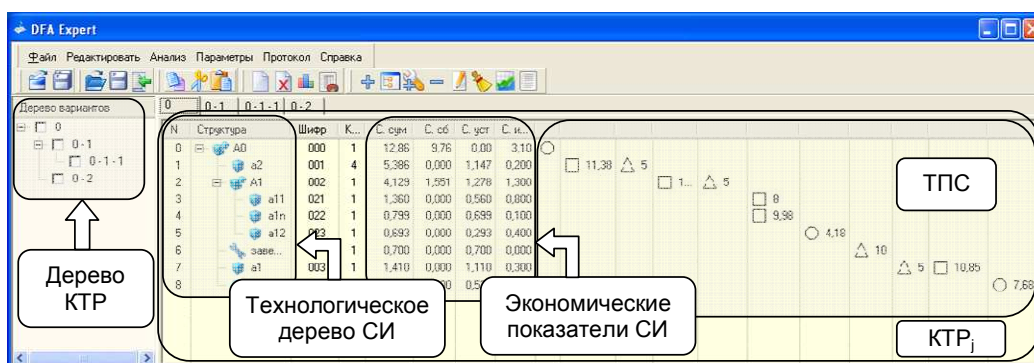


Рис. 4. Структурные элементы основного интерфейса программы DFA Expert

Rys. 4. Strukturalne elementy podstawowego interfejsu programu DFA Expert

Исходная конструкция СИ «Пневмораспределитель» содержит 31 деталь и включает нетехнологичные резьбовые и шплинтовые соединения. Анализ структуры временных затрат на сборочные операции (рис. 8) показал, что наиболее трудоёмкими являются процессы установки крышек  $a_5$ ,  $a_{24}$  и СЕ «Рычаг». После выполнения первой итерации перепроектирования (рис. 7а), нетехнологичные шплинтовые соединения были заменены более технологичными соединениями при помощи упругих деформаций, кроме того, детали  $a_{18}$ ,  $a_{19}$ ,  $a_{20}$  были объединены в одну деталь. Перепроектирование  $KTP_0$  привело к сокращению: количества деталей на 29%, времени сборки на 30%, затрат на изготовление на 23% (рис. 9).

После выполнения второй итерации перепроектирования (рис. 7б) корпус был объединён с крышками, исключены нетехнологичные резьбовые соединения. Сборка новой конструкции выполняется в одном направлении (за исключением установки рычага), что исключает необходимость перебазирования СИ в процессе сборки. Перепроектирование  $KTP_{0-1}$  привело к сокращению: количества деталей на 31,8%, времени сборки на 41%, затрат на изготовление на 27%.

Два этапа перепроектирования в целом привели к сокращению количества деталей на 51,6%; времени сборки на 58,7%, затрат на изготовление на 43,7%.

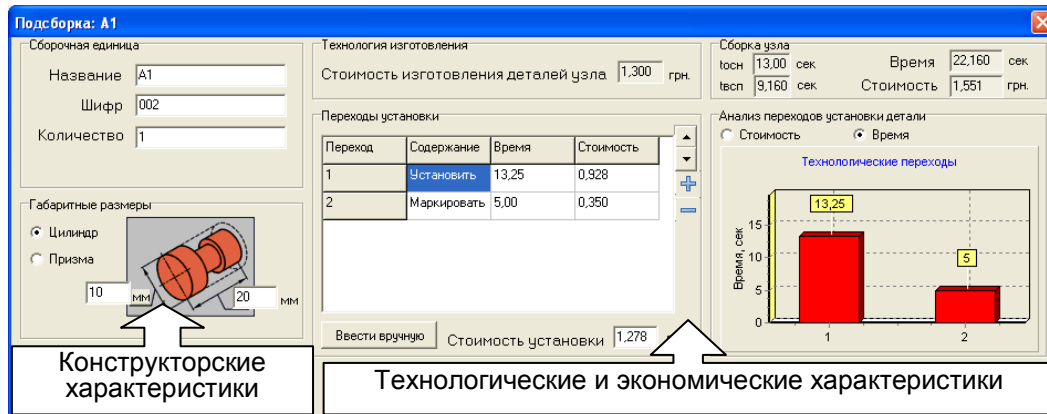


Рис. 5. Конструкторские, технологические и экономические характеристики сборочных единиц, деталей и операций

Rys. 5. Konstrukcyjne, technologiczne i ekonomiczne charakterystyki jednostek montażowych, części i operacji

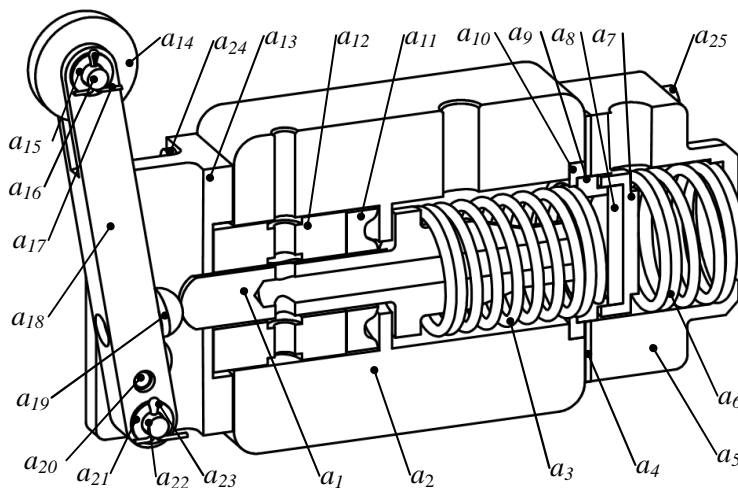


Рис. 6. Пневмораспределитель: а<sub>1</sub> – толкатель; а<sub>2</sub> – корпус; а<sub>3</sub>, а<sub>6</sub> – пружина; а<sub>4</sub>, а<sub>11</sub> – уплотнение; а<sub>5</sub>, а<sub>24</sub> – крышка; а<sub>7</sub> – седло; а<sub>8</sub> – клапан; а<sub>9</sub> – втулка; а<sub>10</sub> – шайба; а<sub>12</sub> – золотник; а<sub>14</sub> – ролик; а<sub>15</sub>, а<sub>21</sub> – шайба; а<sub>16</sub>, а<sub>22</sub> – штифт; а<sub>17</sub>, а<sub>23</sub> – шплинт; а<sub>18</sub> – рычаг; а<sub>19</sub> – опора; а<sub>20</sub> – штифт; а<sub>24</sub>, а<sub>25</sub> – винт

Rys. 6. Rozdzielacz powietrza (zawór): а<sub>1</sub> – popychacz; а<sub>2</sub> – korpus; а<sub>3</sub>, а<sub>6</sub> – sprężyna; а<sub>4</sub>, а<sub>11</sub> – uszczelka; а<sub>5</sub>, а<sub>24</sub> – pokrywa; а<sub>7</sub> – siodło; а<sub>8</sub> – zawór; а<sub>9</sub> – tulejka; а<sub>10</sub> – podkładka; а<sub>12</sub> – suwak; а<sub>14</sub> – rolka; а<sub>15</sub>, а<sub>21</sub> – podkładka; а<sub>16</sub>, а<sub>17</sub>, а<sub>20</sub>, а<sub>22</sub>, а<sub>23</sub> – kołek; а<sub>18</sub> – dźwignia; а<sub>19</sub> – opora; а<sub>24</sub>, а<sub>25</sub> – wkręt

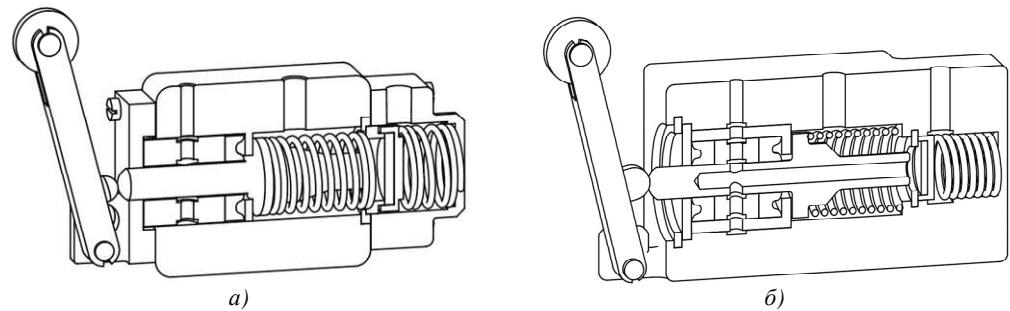


Рис. 7. Варианты переконструирования изделия «Пневмораспределитель»

Rys. 7. Warianty przekonstruowania wyrobu „Rozdzielacz powietrza”

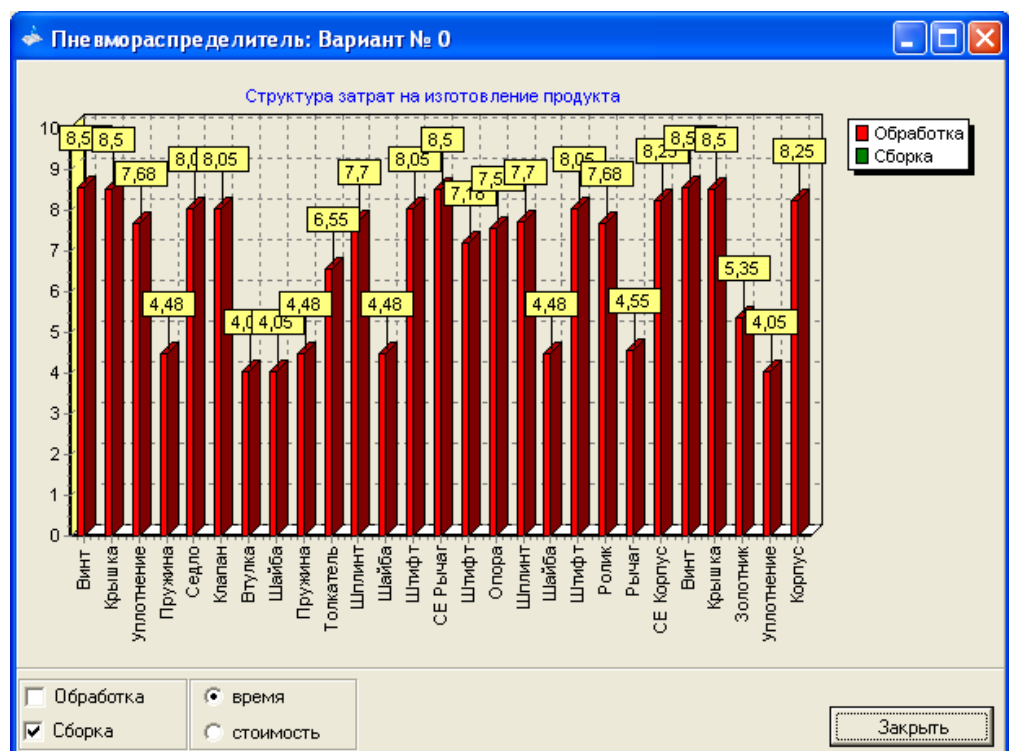


Рис. 8. Структура временных затрат на сборку KTR<sub>0</sub>

Rys. 8. Struktura chwilowych nakładów na montaż KTR<sub>0</sub>

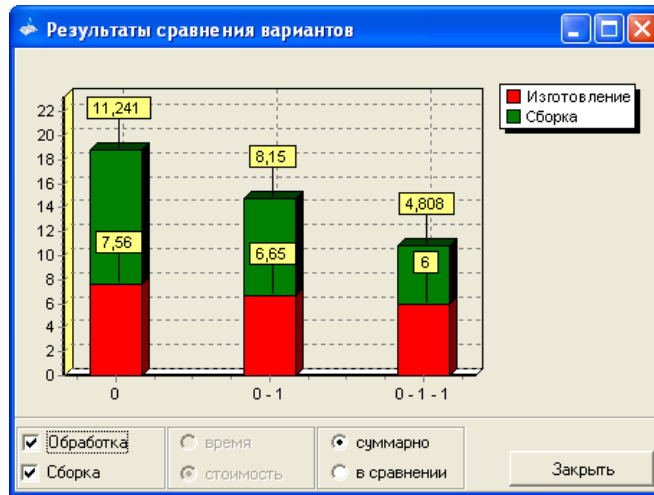


Рис. 9. Сравнительный анализ вариантов переконструирования СИ

Rys. 9. Analiza porównawcza wariantów przekonstruowania jednostki montażowej

## ВЫВОДЫ

Представлен алгоритм поиска лучшего КТР и разработанное на его основе программное обеспечение DFA Expert. Для данного программного обеспечения существует возможность информационной интеграции с другими системами поддержки жизненного цикла изделия за счёт использования математической модели СИ в виде БООП и модели сборочного процесса в виде МПС и ВА. Кроме того, использование модели СИ в виде БООП позволит применить предложенные нами ранее алгоритмы автоматизированного DFA анализа. В целом, разработанное программное обеспечение позволяет повысить эффективность производства за счёт снижения затрат на сборочные процессы. Эффективность целенаправленного поиска лучшего КТР подтверждена на примере СИ «Пневмораспределитель», так, два этапа перепроектирования в целом привели к сокращению количества деталей в СИ на 51,6%; времени сборки на 58,7%, затрат на изготовление на 43,7%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Anthony Knight. Product design for manufacture and assembly. 2nd ed. ISBN 10: 082470584X, CRC Press Taylor & Francis Group, 2001
2. Lucas Engineering Systems Ltd., University Of Hull, Design For Assembly / Manufacture Analysis Practitioners Manual, Version 10.5, CSC Manufacturing, Solihull, UK, 1995.
3. Пасічник В. А. Принципи формування математичної моделі складальної одиниці в виді бінарних відношень обмежень рухливості / В. А. Пасічник, В. М. Кореньков // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр XV межд. науч. техн. конф., В 4-х томах. – Донецк : ДонНТУ, 2008. Т. 3. – С. 64–70.
4. Давыгора В. Н. Теория формализованного синтеза множества альтернатив доминирующих порядков последовательно-параллельной сборки / В. Н. Давыгора, В. А. Пасечник // Вестник НТУУ „КПИ”. – К.: 2000. – № 39 / Машиностроение. С. 55–77.

5. Пасічник В. А. Синтез технологічного процесу складання виробу на основі інформації про бінарні відношення обмежень рухливості / В. А. Пасічник, Ю. В. Лашина // Вісник НТУУ «КПІ» – К.: 2009. – № 57 / Машинобудування. С. 75–81
6. Korenko W. Procedura ukierunkowanej analizy DFA dla jednostek montażowych / W. Korenko, W. Pasiecznik, J. Łaszczyna // Technologia i automatyzacja montażu. Ogólnopolski Kwartalnik Naukowo-Techniczny Nr 4 (62) październik – grudzień 2008. P. 11–14.
7. Пасічник В. А. Програмне забезпечення автоматизованого формування математичної моделі складального виробу / В. А. Пасічник, Р. Р. Сімута // Вестник НТУУ „КПІ”.– К.: 2003.– № 44 / Машиностроение. С.173-175.

#### ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF PRODUCT DESIGN USING SOFTWARE «DFA EXPERT»

**Abstract.** The product design has a significant influence on assembly processes and, thus, production costs. This paper presents an algorithm for analyzing and improving the product design. The algorithm uses the BRRR assembly model and the assembly sequence matrix for the assembly process representation. There is an opportunity for computer-aided generating these models on the basis of the product's 3D model, created in the CAD system. The new computer-aided DFA tool named “DFA Expert” has been developed. The implementation of DFA Expert is based on the proposed algorithm. An example of Air Distributor redesign has been included to illustrate the application of DFA Expert.

**Tomasz WÓJCICKI****Piotr CZAJKA****Tomasz GIESKO**

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB

Radom, Polska

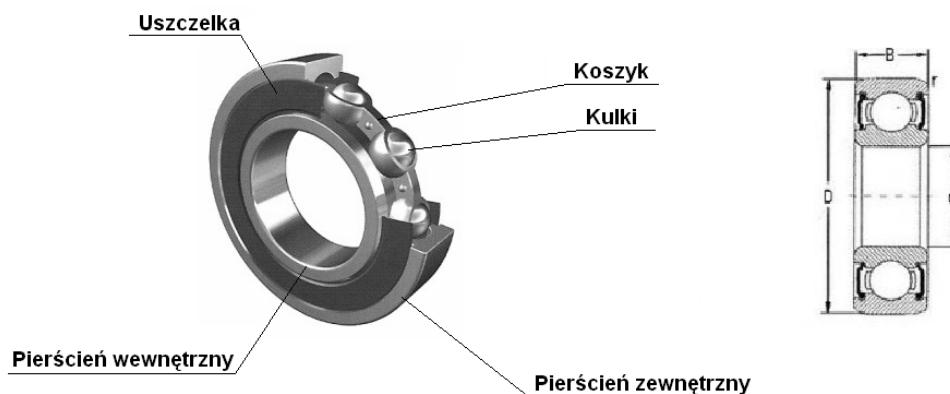
## **AUTOMATYCZNA INSPEKCJA MONTAŻU USZCZELEK ŁOŻYSK TOCZNYCH Z WYKORZYSTANIEM KOMPUTEROWYCH METOD PRZETWARZANIA I ANALIZY OBRAZÓW**

W artykule zaprezentowano opracowaną optoelektroniczną metodę inspekcji montażu uszczelnień w łożyskach tocznych bezpośrednio na linii technologicznej. Do wykrywania i identyfikacji wad montażu uszczelnień zastosowano komputerowe metody przetwarzania i analizy obrazów. Omówiono podstawy teoretyczne zastosowanych metod oraz ich walory i ograniczenia. Przedstawiono zastosowane techniki oświetlenia umożliwiające wizualizację i detekcję wad. W ramach badań opracowano katalog wad montażu uszczelnek, który obejmuje występujące w praktyce wady, m. in. wadliwy montaż uszczelki w łożysku, wystawanie uszczelki poza gabaryt łożyska, ubytki materiałowe, podwinięcie, załamanie, wystawanie wargi z kanałka, zniekształcenie powierzchni. Zaprezentowano wyniki testów przeprowadzonych na stanowisku eksperymentalnym.

### **WPROWADZENIE**

Łożyska toczne wchodzi w skład wielu maszyn często stanowiąc w nich element krytyczny dlatego bezawaryjność łożysk odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu tych urządzeń. W związku z tym kontrola jakości łożysk przed ich montażem w urządzeniach jest bardzo ważnym elementem. Zastosowanie zautomatyzowanych systemów inspekcji optycznej w procesach produkcyjnych umożliwia wyeliminowanie bezpośredniego udziału człowieka w operacjach kontroli jakości, przyczyniając się do podwyższenia efektywności kontroli oraz skutecznej eliminacji wyrobów wadliwych. Wprowadzenie na linię produkcyjną systemów bazujących na automatycznej optycznej inspekcji (*Automatic Optical Inspection* - AOI) [1], wyposażonych w kamery oraz wyspecjalizowane oprogramowanie do przetwarzania i analizy obrazów, umożliwia podniesienie jakości wyrobów oraz zwiększenie wydajności poprzez wyeliminowanie czynników ludzkich związanych ze zmęczeniem i mniejszą sprawnością. Cyfrowe przetwarzanie obrazów (*Digital Image Processing* - DIP) [2] to dziedzina cyfrowego przetwarzania sygnałów (*Digital Signal Processing* - DSP) zajmująca się cyfrową reprezentacją obrazu a także technikami jego przekształcania. Wśród licznej grupy metod przetwarzania obrazów wyróżniają się metody charakteryzujące się uniwersalnością. Do grupy tej zaliczane są między innymi algorytmy służące polepszaniu jakości obrazów [3], segmentacja [4], transformacje morfologiczne [3], transformacje liniowe [5]. Analiza obrazów (*Image Analysis* - IA) [6] to proces polegający na wydzieleniu istotnej z punktu widzenia użytkownika informacji zawartej w obrazie docierającym do obserwatora lub detektora. Proces analizy obrazów związany jest ze znaczącą redukcją ilości informacji. Zawarte w obrazie dane wydobyte z niego w wyniku działania algorytmów analizy stanowią zaledwie ułamek całego zbioru bitów reprezentujących obraz cyfrowy. Analizę obrazów prowadzi się z wykorzystaniem narzędzi programowych (software) lub sprzętowych (hardware).

Prezentowany system przeznaczony jest do detekcji wad w uszczelkach łożysk tocznych typu RS. Są to gumowo-metalowe uszczelki zewnętrzne, osadzone na pierścieniu zewnętrznym łożyska. Osadzenie uszczelki polega na tym, że wargi uszczelnienia opierają się o wybranie (podtoczenie) na powierzchni pierścienia zewnętrznego. Uszczelki typu RS należą do grupy uszczelki stykowych które mogą być mocowane w łożysku z jednej lub dwóch jego stron. Uszczelnione łożyska wypełniane są zazwyczaj smarem posiadającym właściwości antykorozyjne. Uszczelki produkowane są w różnych kolorach co wpływa na parametry algorytmów detekcji wad takie jak np. progi segmentacji. Budowę łożyska wyposażonego w uszczelkę typu RS przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Budowa łożyska tocznego kulkowego wyposażonego w uszczelkę

#### WADY USZCZELEK

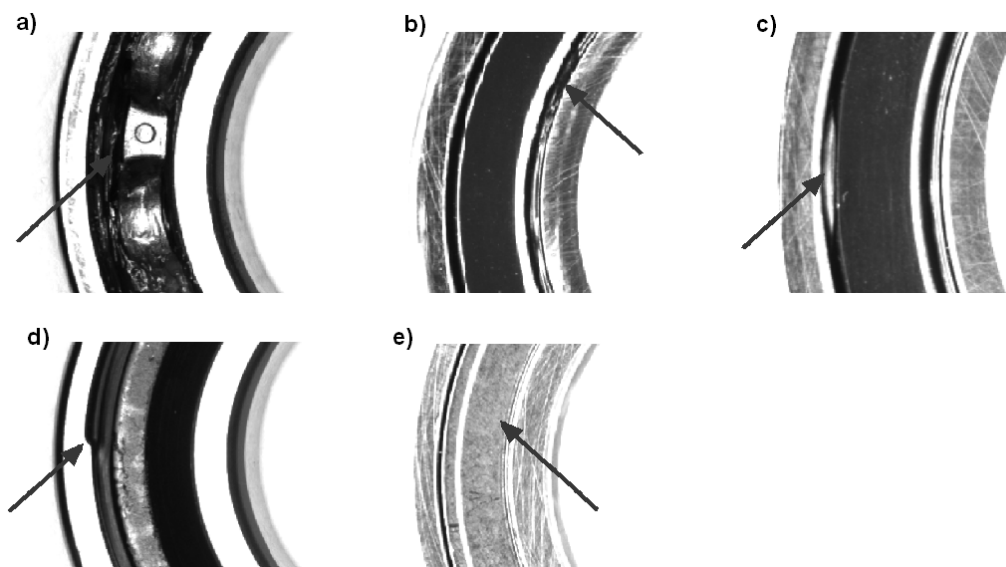
W ramach prowadzonych prac związanych z analizą wadliwych produktów oraz na podstawie informacji dostarczonych przez producenta łożysk zidentyfikowano następujące typy wad:

- brak obecności uszczelki w łożysku,
- odwrotny montaż uszczelki (nośnikiem na zewnątrz, gumą do środka),
- pomyłkowe wmontowanie uszczelki innego typu (z metalową osłoną),
- wystawanie uszczelki poza gabaryt łożyska,
- ubytki materiału na wardze wewnętrznej uszczelki,
- podwinięcie, załamanie lub wystawanie wargi z kanałka,
- wadliwy montaż uszczelki w postaci tworzenia przez uszczelkę stożka w stosunku do czoła łożyska,
- pofałdowanie powierzchni uszczelki.

Przykładowe wady uszczelki łożysk tocznych przedstawiono na rys. 2.

Specyfika wad występujących w uszczelkach łożysk tocznych spowodowała konieczność zastosowania systemu hybrydowego obejmującego kontrolę wizyjną oraz laserową. W celu znalezienia najlepszej metody detekcji wyspecyfikowanych wad przeprowadzono badania z udziałem obu technik. Na podstawie ich wyników opracowano klasyfikację wad możliwych do wyznaczenia proponowanymi metodami (TAB. 1).

System komputerowy zapewnia klasyfikację łożysk na dobre oraz wadliwe a także ich fizyczną segregację zgodnie z ograniczeniami czasowymi narzuconymi przez producenta nie przekraczającymi 3,5 do 4 sekund, co umożliwia synchronizację z cyklem linii produkcyjnej.



Rys. 2. Przykładowe wady uszczelk łożysk tocznych:

- a) brak uszczelki; b) ubytki na wardze wewnętrznej uszczelki; c) podwinięcie wargi zewnętrznej uszczelki;  
d) wystawianie uszczelki poza gabaryt łożyska; e) uszczelka z metalową osłoną;

Tabela. 1. Klasyfikacja wad możliwych do wyznaczenia za pomocą kontroli wizyjnej i laserowej

Kontrola wizyjna	Kontrola laserowa
<ul style="list-style-type: none"> <li>- brak uszczelki</li> <li>- odwrotny montaż uszczelki</li> <li>- uszczelka niewłaściwego typu</li> <li>- wystawianie uszczelki poza gabaryt łożyska</li> <li>- ubytki na wardze wewnętrznej</li> <li>- podwinięcie, załamanie, wystawianie wargi</li> <li>- ułożenie w „stożek”</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brak uszczelki</li> <li>- odwrotny montaż uszczelki</li> <li>- uszczelka niewłaściwego typu</li> <li>- wystawianie uszczelki poza gabaryt łożyska</li> <li>- pofałdowanie powierzchni uszczelki</li> </ul>

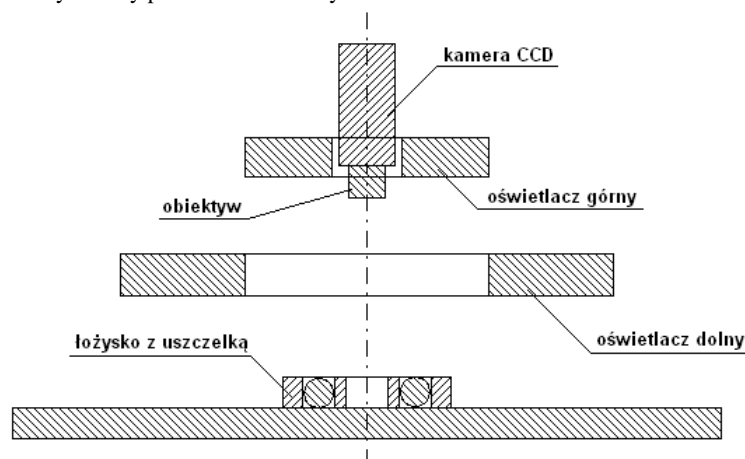
#### BUDOWA STANOWISKA DO BADANIA WAD USZCZELNIEN

Zastosowanie hybrydowej metody kontroli powoduje wprowadzenie dwóch etapów inspekcji: kontroli laserowej i wizyjnej następujących kolejno po sobie. Kontrola laserowa polega na pomiarze odległości od obiektu za pomocą głowicy triangulacyjnej. Jest to metoda punktowa co wymusza konieczność obrotu łożyska w celu przebadania całej powierzchni uszczelki. Kontrola wizyjna prowadzona jest z wykorzystaniem kamery matrycowej, rejestrującej obraz całej powierzchni czołowej łożyska, eliminując dzięki temu potrzebę wykonywania kilku zdjęć do pojedynczego pomiaru. W celu przetestowania opracowanych metod przetwarzania i analizy obrazów zbudowane zostało eksperymentalne stanowisko umożliwiające prowadzenie inspekcji wizyjnej jednej strony powierzchni czołowej łożyska. Docelowa konstrukcja stanowiska powinna umożliwiać dostęp torów wizyjnych do powierzchni czołowej łożyska po obu jego stronach.

Jednym z kluczowych czynników wpływających na jakość rejestrowanych obrazów w systemach maszynowego widzenia jest sposób oświetlenia. Przy budowie systemu oświetleniowego należy dążyć do wyznaczenia minimalnej struktury oświetlenia, zapewniającej realizację wszystkich zadań [7].



W zaproponowanym rozwiązaniu zastosowane zostały dwa pierścieniowe oświetlacze emitujące światło białe zbudowane z diod LED (oświetlacz górny, oświetlacz dolny). Umieszczenie oświetlaczy, kamery oraz obiektu analizy zostały przedstawione na rys. 3.



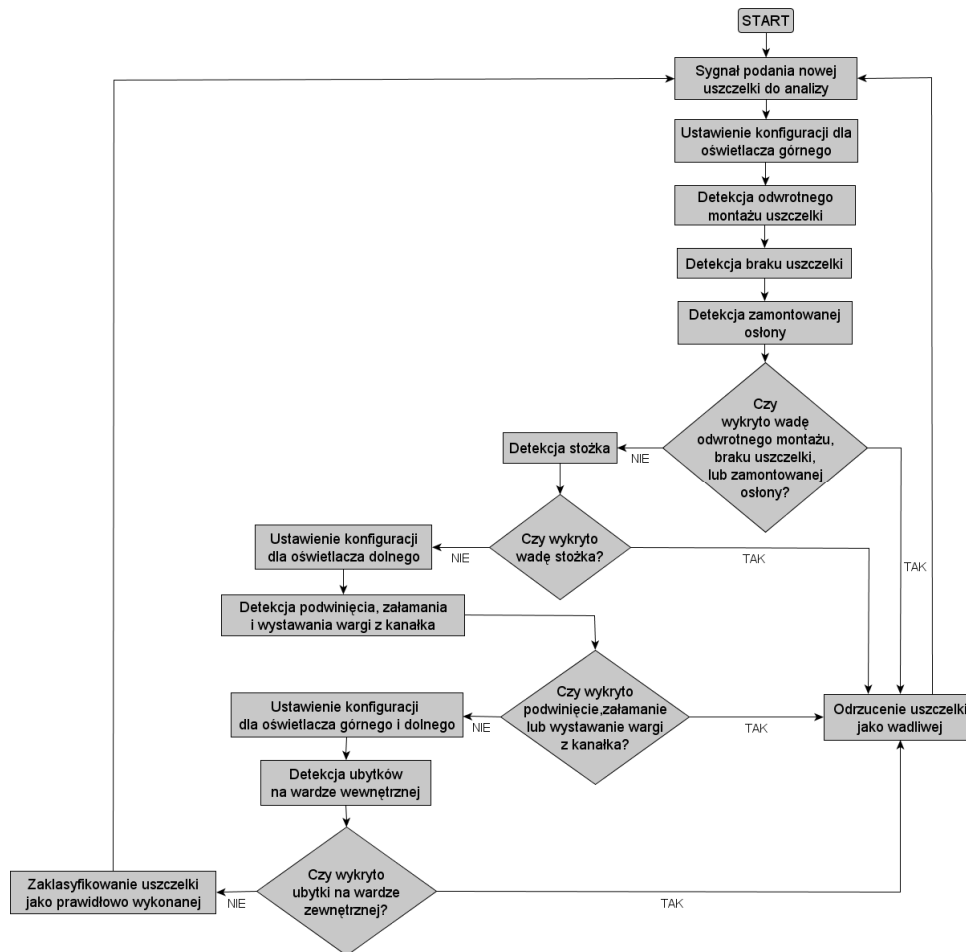
Rys. 3. Stanowisko przeznaczone do automatycznej detekcji wad w uszczelkach łożysk tocznych

Oświetlacz górny umiejscowiony jest na poziomie kamery i zbudowany jest z 400 diod LED w obudowie do montażu powierzchniowego posiadających kąt emisji  $\pm 60^\circ$ . Oświetlacz ten pełni funkcję oświetlacza czołowego (Front Lighting) [7, 8] w którym diody zostały umieszczone prostopadle do powierzchni czołowej łożyska. Oświetlacz dolny wykonuje funkcję oświetlenia ukośnego (Oblique) [7, 8] i znajduje się bliżej obiektu analizy. Oświetlacz ten zbudowany jest z 360 diod LED w obudowie kopułkowej do montażu przewlekane o średnicy 5 mm i kącie emisji  $\pm 10^\circ$ . Diody zostały umieszczone w oświetlaczu pod kątem ok.  $15^\circ$  do powierzchni czołowej łożyska. W celu wyrównania rozkładu natężenia światła dla obu oświetlaczy zastosowano matówki. Oświetlacze są uruchamiane naprzemiennie lub jednocześnie w zależności od typu rozpoznawanej wady. W celu zapewnienia wyraźnego konturowania łożyska zastosowano jasne tło za obiektem analizy. W docelowym układzie zastosowane zostanie oświetlenie wsteczne (Back Lighting) [7, 8] w postaci podświetlacza dolnego co zapewni większą odporność na zanieczyszczenia. Obrazy do analizy pozyskiwane są z wykorzystaniem monochromatycznej kamery CCD o rozdzielczości 1000 x 1000 pikseli umożliwiające rejestrację obrazów w 256 odcieniach szarości.

### ALGORYTM DETEKCJI WAD

Główny algorytm procesu detekcji wad stanowi pętla wykonywana aż do momentu przerwania jej przez operatora systemu lub zadziałania czujników na linii produkcyjnej. W skład głównego algorytmu procesu detekcji wchodzi procedura detekcyjna umożliwiające wykrywanie wad poszczególnych rodzajów. Schemat algorytmu przedstawiono na rys. 4.

Jednym z kluczowych elementów procesu detekcji jest ustalenie obszarów zainteresowań (*Region Of Interest - ROI*) [9] dla poszczególnych procedur detekcyjnych. Obszary zainteresowań to fragmenty obrazu, które mają podlegać dalszemu przetwarzaniu, gdyż z punktu widzenia użytkownika zawierają istotne informacje. Zależnie od rodzaju wady ROI ustalane są w różnych obszarach obrazu.



Rys. 4. Schemat algorytmu detekcji wad w uszczelkach łożysk tocznych

Pozycjonowanie ROI dla procedur detekcyjnych wykonywane jest względem osi symetrii łożyska, która wykrywana jest z wykorzystaniem algorytmu najlepszego dopasowania wzorca do badanego obszaru obrazu (Template matching) [10], który z kolei jest zależny od konfiguracji oświetlenia łożyska z uszczelką. Dla konfiguracji oświetlenia, w której aktywny jest wyłącznie oświetlacz górny wzorcem jest pierścień, którego większy promień umiejscowiony jest w połowie szerokości pierścienia wewnętrznego łożyska, zaś mniejszy promień umiejscowiony jest w połowie wewnętrznej fazy pierścienia łożyska. Dla konfiguracji oświetlenia, w której aktywny jest wyłącznie oświetlacz dolny wzorcem jest pierścień umiejscowiony na uszczelce, którego mniejszy i większy promień znajdują się odpowiednio na największej płaskiej powierzchni uszczelki oraz w połowie wewnętrznego ścięcia uszczelki. W przypadku konfiguracji oświetlenia z aktywnym jednocześnie górnym i dolnym oświetlaczem wzorcem jest pierścień, którego większy promień jest w połowie pierścienia zewnętrznego łożyska, zaś mniejszy znajduje się na wewnętrznej fazie pierścienia zewnętrznego łożyska. Dodatkowo przed procesem pozycjonowania obraz filtrowany jest z wykorzystaniem filtru uśredniającego [11] z maską 3x3.

Procedura detekcji odwrotnie zamontowanej uszczelki realizowana jest przy wykorzystaniu oświetlacza górnego. Dla wady tej ROI jest pierścieniem, którego większy promień oparty jest na wewnętrznej krawędzi pierścienia zewnętrznego łożyska, mniejszy promień zaś opiera się na zewnętrznej krawędzi pierścienia wewnętrznego łożyska. Obszar ROI poddawany jest segmentacji poprzez progowanie z doświadczalnie dobranymi dwoma progami, których wartości zależne są od koloru uszczelki. Dla uszczelki o barwie czarnej dolny i górny próg segmentacji wynoszą odpowiednio 35 oraz 255. Kolejnym krokiem w procedurze detekcji odwrotnie zamontowanej uszczelki jest zliczenie białych oraz czarnych pikseli. Jeśli liczba białych pikseli jest mniejsza niż zdefiniowana wartość progowa wówczas łożysko uznawane jest za wadliwe. Dla czarnych uszczelki wartość progowa wynosi 114 tysięcy pikseli.

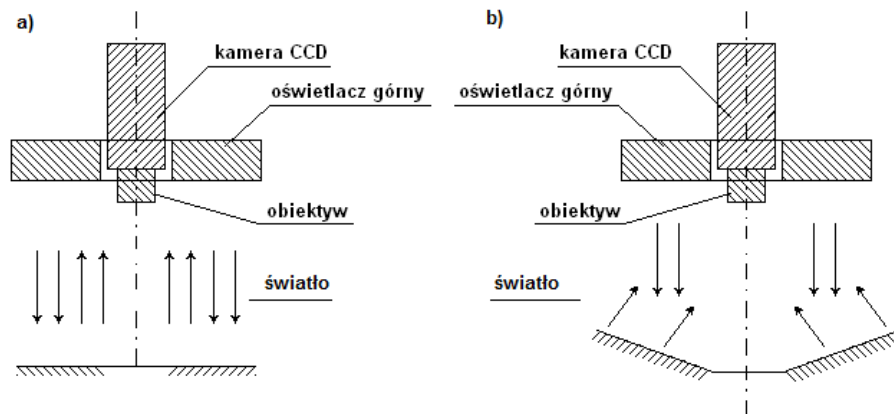
Procedura detekcji braku uszczelki realizowana jest przy wykorzystaniu oświetlacza górnego i wykorzystuje ROI ustalone na tej samej zasadzie co dla procedury detekcji odwrotnie zamontowanej uszczelki. W dalszej części ROI poddawany jest segmentacji poprzez progowanie z doświadczalnie dobranymi dwoma progami, zależnymi od koloru uszczelki. Dla uszczelki o barwie czarnej dolny i górny próg segmentacji wynoszą odpowiednio 6 oraz 230, po czym następuje zliczenie białych i czarnych pikseli. Jeśli liczba białych pikseli jest mniejsza niż założony próg, który dla uszczelki w kolorze czarnym wynosi 170 tysięcy, wówczas uszczelka uznawana jest za uszczelkę z „podejrzeniem” wady. Ponieważ próg liczby białych pikseli jest większy dla „podejrzenia” wady polegającej na braku uszczelki niż próg dla wady polegającej na odwrotnie zamontowanej uszczelce aby odróżnić jeden rodzaj wady od drugiej przyjęto założenie, że jeśli progi zostały przekroczone jednocześnie wówczas występuje wada polegająca na braku uszczelki.

Wykrywanie obecności metalowej osłony odbywa się z wykorzystaniem oświetlacza górnego. ROI ustalany jest tak jak dla przypadków braku uszczelki i odwrotnie zamontowanej uszczelki. Kolejnym krokiem w procedurze detekcji obecności metalowej osłony jest wykonanie segmentacji poprzez progowanie z doświadczalnie dobranymi progami. Dla uszczelki o barwie czarnej progi te są takie same jak w przypadku detekcji braku uszczelki i wynoszą 6 oraz 230. W dalszej kolejności zliczane są białe oraz czarne piksele. Jeśli liczba białych pikseli jest mniejsza niż zdefiniowana wartość progowa, która przykładowo dla uszczelki w kolorze czarnym wynosi 30 tysięcy wówczas uszczelka uznawana jest za uszczelkę z „podejrzeniem” wady. Jeśli wcześniej wykryto wadę polegającą na braku uszczelki oraz uszczelka jest „podejrzana” o wadę w postaci zamontowanej osłony, wówczas przyjmowane jest, że uszczelka jest wadliwa i posiada wadę w postaci zamontowanej osłony.

„Stożek” to wada montażu uszczelki w łożysku charakteryzującą się tym, że powierzchnia uszczelki tworzy w stosunku do czoła łożyska kształt ściętego stożka. „Stożek” wykrywany jest z wykorzystaniem oświetlacza górnego. Idea metody opiera się na założeniu, że ilość światła jaka powraca do kamery po odbiciu od uszczelki ułożonej w stożek jest mniejsza niż dla uszczelki zamontowanej prawidłowo (rys. 5). Obszar ROI dla „stożka” jest taki sam jak dla procedury odwrotnie zamontowanej uszczelki.

W procedurze detekcji „stożka” nie jest wykonywana operacja segmentacji. Zamiast niej liczona jest średnia jasność pikseli, która następnie przyrównywana jest do zdefiniowanej wartości progowej, zależnej od koloru uszczelki. Gdy średnia jasność pikseli ROI jest mniejsza niż 45 (dla uszczelki w kolorze czarnym) wówczas stwierdza się występowanie wady w postaci „stożka”.

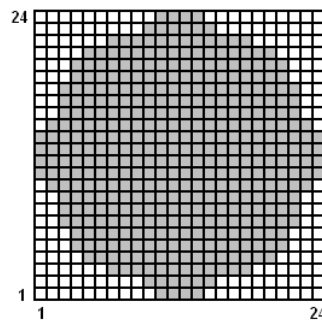
Procedura detekcji wad w postaci podwinięcia, załamania i wystawiania wargi z kanałki realizowana jest z wykorzystaniem oświetlacza dolnego. ROI dla tego przypadku zdefiniowany jest jako pierścień, którego większy promień opiera się o mniejszy promień pierścienia zewnętrznego łożyska. Mniejszy promień ROI opiera się zaś na wgłębieniu uszczelki, które wyznacza granice wargi zewnętrznej uszczelki. ROI poddawany jest procedurze segmentacji poprzez progowanie z ogólnie zdefiniowanymi dwoma progami zależnymi od koloru uszczelki. Dla uszczelki w kolorze czarnym próg dolny oraz górny segmentacji wynoszą odpowiednio 80 oraz 255. Po tej operacji wady widoczne są jako białe plamy, jednakże poza nimi znajdują się również plamy, które nie reprezentują wad. W celu wyeliminowania szumu, który stanowią plamy nie będące wadami, obraz jest filtrowany z wykorzystaniem algorytmu erozji [12] przy użyciu elementu strukturyzującego w postaci macierzy kwadratowej o rozmiarze 5x5.



Rys. 5. Idea metody wykrywania wady w postaci uszczelki ułożonej w stożek:  
a) uszczelka prawidłowa; b) uszczelka ułożona w stożek

Jeśli obszar plamy przekroczy odgórnie zdefiniowany próg wówczas przyjmowane jest, że uszczelka posiada wadę. Próg ten ustalany jest jako 100 pikseli dla uszczelki w kolorze czarnym.

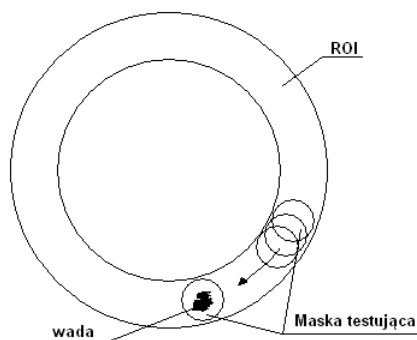
Procedura detekcji ubytków na wardze wewnętrznej realizowana jest z jednoczesnym wykorzystaniem oświetlacza górnego oraz dolnego. ROI tej procedury zdefiniowany jest jako pierścień, którego większy promień opiera się o wgłębienie uszczelki wyznaczające granice wargi wewnętrznej, zaś mniejszy promień pierścienia stanowiącego ROI zachodzi na pierścień wewnętrzny łożyska. Detekcja wady odbywa się z wykorzystaniem maski testującej, którą stanowi macierz o rozmiarze 24x24. Wygląd maski przedstawiony został na rys. 6.



Rys. 6. Maska testująca wykorzystana w algorytmie detekcji ubytków na wardze wewnętrznej uszczelki

Piksele z ROI testowane są z wykorzystaniem maski testującej w celu wyznaczenia ich średniej wartości intensywności. Maska testująca przemieszczana jest w ROI tak, aby przetestować wszystkie piksele tego obszaru. Sposób poruszania się maski testującej w ROI przedstawiono na rys. 7.

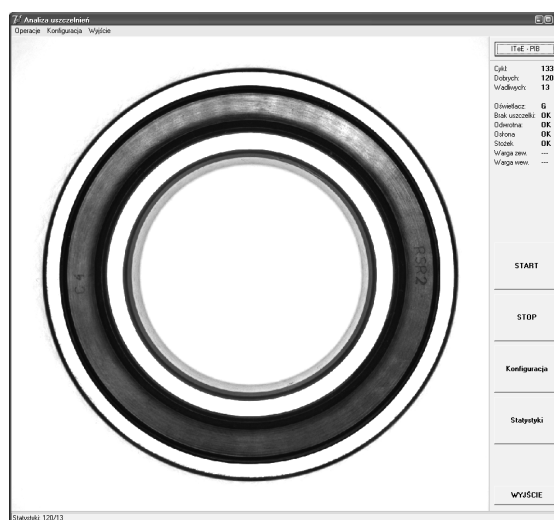
Jeśli średnia intensywność pikseli przekracza zdefiniowaną wartość progową, wówczas przyjmowane jest, że testowana uszczelka posiada wadę. Wartość progowa ustalana jest doświadczalnie i dla uszczelki w kolorze czarnym wynosi 10.



Rys. 7. Zasada działania algorytmu detekcji ubytków na wardze wewnętrznej uszczelki z wykorzystaniem maski testującej

### IMPLEMENTACJA

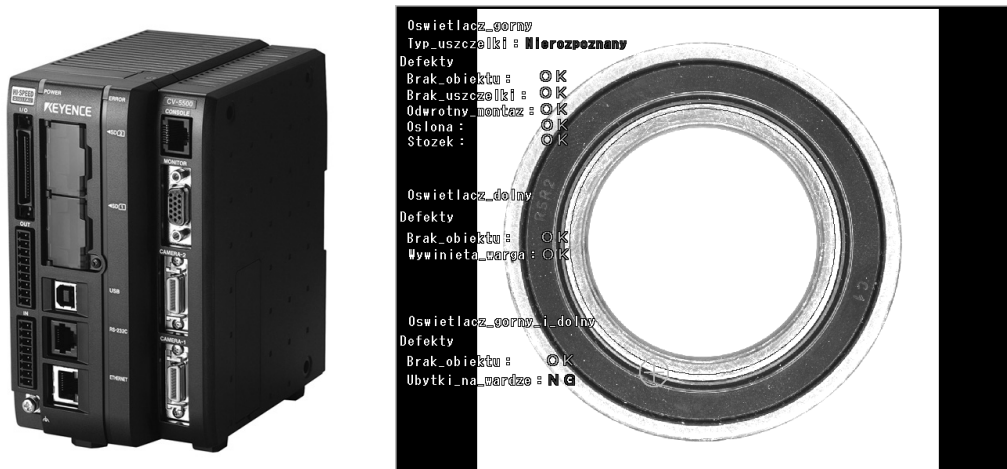
Implementacji rozwiązania dokonano w dwóch wersjach. Pierwszy wariant przeznaczony jest do pracy w środowisku Microsoft Windows i wykonany został przy wykorzystaniu narzędzi programistycznych firmy Borland (rys 8).



Rys. 8. Wygląd okna pomiarowego aplikacji dla systemu MS Windows przeznaczonej do detekcji wad uszczelnień łożysk tocznych

Zalecana minimalna konfiguracja komputera oraz systemu operacyjnego niezbędna do prawidłowej pracy oprogramowania jest następująca: mikroprocesor klasy Pentium IV, 256 MB pamięci typu RAM, 20 MB wolnej przestrzeni na dysku twardym, rozdzielczość karty graficznej 1024x764 pikseli, karta typu frame-grabber umożliwiającą przechwytywanie obrazu z częstotliwością nie mniejszą niż 1 Hz.

Druga wersja oprogramowania została osadzona na urządzeniu Keyence CV-5000, które jest uniwersalnym systemem optycznej inspekcji bazującym na obrazie pozyskiwanym z jednej lub kilku kamer równocześnie (rys.9).



Rys. 9. Urządzenie Keyence CV-5000 oraz okno pomiarowe z zaimplementowanym algorytmem detekcji wad uszczelnień łożysk tocznych

System Keyence zbudowany jest z jednostki centralnej, kamery, monitora, pilota zdalnego sterowania oraz zasilacza. W skład jednostki centralnej, będącej też jednostką kontrolującą, wchodzi procesor wykonany w technologii RISC wspierany przez dwa procesory sygnałowe DSP przeznaczone do obróbki obrazu. Moduł kontrolera został zaopatrzony w następujące interfejsy: port równoległy, czytnik kart pamięci typu SD, port USB, port szeregowy RS-232C, złącze sieciowe w standardzie Ethernet, specjalne złącze rozszerzające, złącze do podłączenia pilota zdalnego sterowania, wyjście VGA do podłączenia zewnętrznego monitora oraz złącza do podłączenia kamer.

## PODSUMOWANIE

Opracowany algorytm automatycznej inspekcji montażu uszczelnień łożysk tocznych spełnia swoją funkcję zgodnie z przyjętymi założeniami co zostało potwierdzone eksperymentalnie. Aplikacja przeznaczona dla systemu MS Windows jak też urządzenia Keyence CV-5000 umożliwiają automatyczną klasyfikację uszczelnień z prędkością co najmniej jednej na dwie sekundy. Opisane w artykule rozwiązanie po zmodyfikowaniu może znaleźć zastosowanie w badaniu uszczelnień zaworów lub tłoków. Kolejnym etapem prac będzie integracja systemów kontroli wizyjnej i laserowej w ramach jednego urządzenia. Przeprowadzone zostaną również badania weryfikacyjne możliwości poprawnej pracy obu modułów w warunkach symulujących oddziaływania środowiskowe w postaci wibracji, zanieczyszczeń, pozostałości smaru i płynów technologicznych. Pozytywne wyniki prac umożliwią budowę systemu kontroli uszczelnień łożysk tocznych w wykonaniu przemysłowym.

## LITERATURA

1. Tadeusiewicz R.: Systemy wizyjne robotów przemysłowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1992.
2. Batchelor B., Waltz F.: Intelligent Machine Vision, Techniques, Implementations and Applications. Springer-Verlag, London, 2001.
3. Vorobel R., Stoińska M.: Adaptacyjna metoda poprawy kontrastu obrazu. Automatyka, Tom 9, Zeszyt 3, 2005.
4. Liao P.S., Chen T.S., Chung P.C.: A fast algorithm for multilevel thresholding. Journal of Information Science and Engineering 17, s. 713-727, 2001.
5. Szymocha A.: Przestrzeń i ruch. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 1997.
6. Tadeusiewicz R., Korohoda P.: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.
7. Giesko T.: Metody oświetlania w systemach maszynowego widzenia 3-D. Problemy Eksploatacji, Radom, 2005, 1, s. 43-51.
8. VanDommelen C. H.: Choose the Right Lighting for Inspection. Test & Measurement World, 10/1/1996.
9. Batchelor B., Waltz F.: Intelligent Machine Vision, Springer, 2001.
10. Brunelli R.: Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice. JohnWiley & Son Ltd, Torquay, 2009.
11. Chan H.: Medical Image Analysis Methods, CRC Press Inc., 2005.
12. O'gorman L., Sammon M. J., Seul M.: Practical Algorithms For Image Analysis. Cambridge University Press, 2008.

## AUTOMATIC INSPECTION OF GASKETS ASSEMBLY IN ROLLER BEARINGS WITH THE USE OF COMPUTER BASED PROCESSING AND IMAGE ANALYSING METHODS

**Abstract.** This article presents the opto-electronic inspection method of gaskets assembly in roller bearings developed directly in a process line. Computer based processing and image analysing methods were applied to detect and identify defects of the gaskets assembled. This paper describes the theory behind the methods used, its advantages as well as limitations. Moreover, lighting techniques that enable visualisation and detection of defects are presented in this article. The catalogue of gaskets assembly defects was prepared within the research work. It covers such defects as: the faulty assembly of the gasket in the bearing, the protrusion of the gasket beyond a bearing, the loss of material, rolling up, bending, the protrusion of the gasket lip from the duct and surface deformation. The article presents the results of the tests carried out on the experimental stand as well..

Aleksander NIEOCZYM

Wyższa Szkoła Zawodowa

Zamość, Polska

## MODUŁOWE STANOWISKA OBRÓBKOWE

### ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

W katedrze PKM Politechniki Lubelskiej wykonane były projekty stanowisk montażowych bazujących na stole obrotowym [1, 2]. Konstrukcje te cechowały się mechanicznymi układami wydawania detali z magazynów grawitacyjnych zasilanych zasobnikami wibracyjnymi. Obecnie w projektach zastosowano typowe elementy modułowe zasilane pneumatycznie. Stosowanie konstrukcji modułowych spowodowane jest możliwością rozbudowy istniejących stanowisk obróbkowych i montażowych, umożliwia obniżenia kosztów, skrócenie terminów: projektowania, wykonania i wdrożenia. Ponadto urządzenie o strukturze modułowej, złożone ze standardowych elementów, spełniających samodzielną funkcję w urządzeniu odznacza się wysoką uniwersalnością zapewniającą możliwość wielokrotnego zastosowania przy zmianie obiektu produkcji, szybkością i łatwością wymiany modułów. Umożliwia to skrócenie czasu i pracochłonności projektowania oraz wykonania poprzez wysoki stopień unifikacji i normalizacji elementów zespołów konstrukcji. Wynikają stąd cechy modułów:

- niezależność konstrukcyjna,
- możliwość połączeń modułów w różnych kombinacjach, łatwość i niezawodność ich łączenia,
- zgodność wymiarów przyłączeniowych elementów stykających się w zespołach o jednakowym przeznaczeniu.

Przedstawione stanowisko jest modułowym gniazdem obróbkowym gdzie zachodzi proces frezowania otworu w przedmiocie obrabianym. Stanowisko to (rys. 1) stanowi rozwinięcie i unowocześnienie wcześniejszych projektów, przy czym operacja montażu została zastąpiona operacją obróbki skrawaniem.

Budowa strukturalna i rozmieszczenie poszczególnych elementów wynikają z zachodzących czterech etapów cyklu pracy:

- transportu – pobieranie półfabrykatu z zasobnika grawitacyjnego,
- obróbki,
- kontroli poprawności wykonania otworu,
- sortowania i transportu do odpowiedniego gniazda magazynu elementów gotowych.

Do wykonania prac projektowych gniazda obróbkowego posłużył program Catia V5. Przy tworzeniu projektu modułowego gniazda obróbkowego zostały wykorzystane następujące moduły: Sketcher, Part Desing, Assembly Design, Drafting, DMU Kinematics.

Proces produkcyjny realizowany w gnieździe obróbkowym składa się z czterech etapów:

- 1) etapu transportu – pobranie półfabrykatu z zasobnika grawitacyjnego,
- 2) etapu obróbki frezowania,
- 3) etapu kontroli poprawności wykonania otworu,
- 4) etapu sortowania przedmiotu obrabianego do odpowiedniego gniazda magazynu.