

Anatolij ZENKIN  
Ivan OBORSKIY  
Sergiej OBORSKIY  
Uniwersytet Techniczny  
„Politechnika Kijowska”  
Kijów, Ukraina

## GRAFO-ANALITYCZNE WYZNACZANIE PARAMETRÓW MONTAŻU POŁĄCZEŃ WCISKANYCH METODĄ TERMICZNĄ

## ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕАЛИЗАЦИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ ТЕРМИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

### ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение для формирования посадок с натягом приобрели способы сборки с использованием неравномерного нагрева охватывающих и охлаждения охватываемых деталей. Использование этих способов позволяет сократить временные и энергетические затраты на сборку, повысить плотность зоны контакта сопрягаемых деталей и прочность посадок с натягом, снизить натяг и напряженно-деформированное состояние сборочных единиц. Для реализации этих способов сборки необходимо создание новых научно-практических подходов для разработки методологии расчета или выбора рациональных технологических сборочных параметров. В частности, весьма важно получить не только теоретические зависимости для определения температур предварительного неравномерного нагрева охватывающих и низкотемпературного охлаждения охватываемых деталей, но и создать графоаналитические способы, которые позволяли бы конструктору-технологу машиностроительного производства оперативно решать задачи проектирования посадок и технологий их создания [1, 2].

### ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РЕАЛИЗАЦИЮ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

На основании выполненных теоретических исследований разработаны графоаналитические способы, позволяющие при проектировании оперативно определять рациональные технологические параметры реализации технологии формирования соединений с натягом способом КТСС. Предлагаемые графоаналитические способы созданы с учетом технологических параметров, которые гарантируют прочность соединений с натягом и условия осуществления их бесконтактной сборки при вертикальной и горизонтальной схемах ориентирования деталей. Графоаналитические способы, включают номограммы и позволяющие оперативно определять технологические параметры, обеспечивающие реализацию КТСС без непосредственного контакта и повреждения сопрягаемых поверхностей деталей. Номограммы представлены на рис. 1 и 2 и состоят с шести квадрантов. На границе первого с четвертым квадрантами по оси ординат отложены значения величин максимального сборочного натяга  $N_{\text{макс}}$ . Задавшись условиями реализации сборки и коэффициентами, учитывающими тепловые потери при совмещении деталей  $k_y$  и цикла сборки в целом  $k_{\text{сб}}$ , определим необходимые суммарные значения увеличения диаметров посадки при неравномерном нагревании охватывающей детали и при неравномерном охлаждении охватываемой детали. По этим данным строим наклонные лучи в квадрантах 4 и 1, соответствующие значениям коэффициента  $k_y$  и коэффициента  $k_{\text{сб}}$ . В первом квадранте проведены наклонные лучи,

соответствующие коэффициенту  $k_y$  (установки охватываемой детали в охватывающую с временным зазором) технологических условий реализации сборки. По оси абсцисс между первым и вторым квадрантами отложены значения необходимой разности  $\Delta d$  диаметров собираемых деталей, определяемой с учетом условий реализации сборки.

Затем переходим в квадрант 2.

Используя зависимость

$$\Delta T = \frac{\Delta d}{\alpha \cdot d} \quad (1)$$

находим для каждого посадочного диаметра  $d$  значения необходимого зазора  $S_y$  для качественной установки одной детали в другую без контакта сопрягаемых поверхностей. Значения зазора  $S_y$  откладываем по ординате между квадрантами 2 и 3. С учетом данных [3] рассчитываем предельно допустимые значения углов  $\gamma$  перекоса осей сопрягаемых деталей при совмещении деталей. По данным расчетов строим в координатах  $S_y - \gamma$  кривые, соответствующие значениям  $l/d$  в квадрантах 3.

Для каждого посадочного диаметра  $d$  определяем значения  $\Delta T \cdot \alpha = \Delta d / d$ , которые откладываем на ординате между квадрантами 2 – 5 и по полученным данным строим в квадранте 2 наклонные лучи, соответствующие значениям посадочных диаметров.

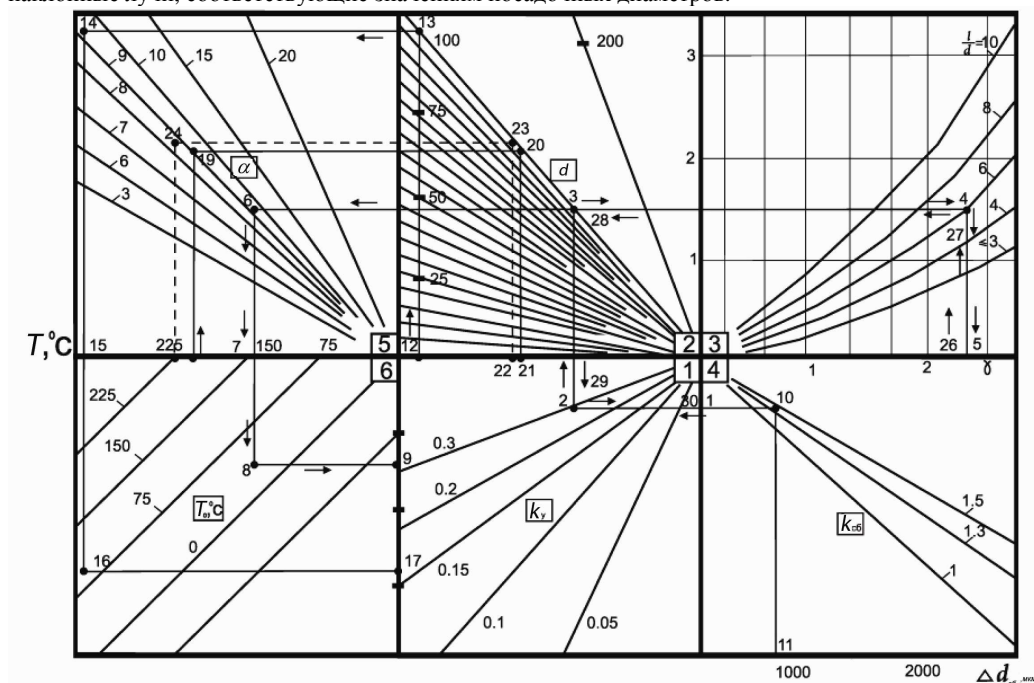


Рис. 1. Номограмма выбора технологических параметров КТСС соединений с натягом, обеспечивающих возможность качественной реализации технологии при вертикальной схеме сборки

Rys. 1. Nomogram wyboru parametrów technologicznych połączeń wciskanych sposobem termicznym umożliwiającą jakościowy montaż przy łączeniu pionowym

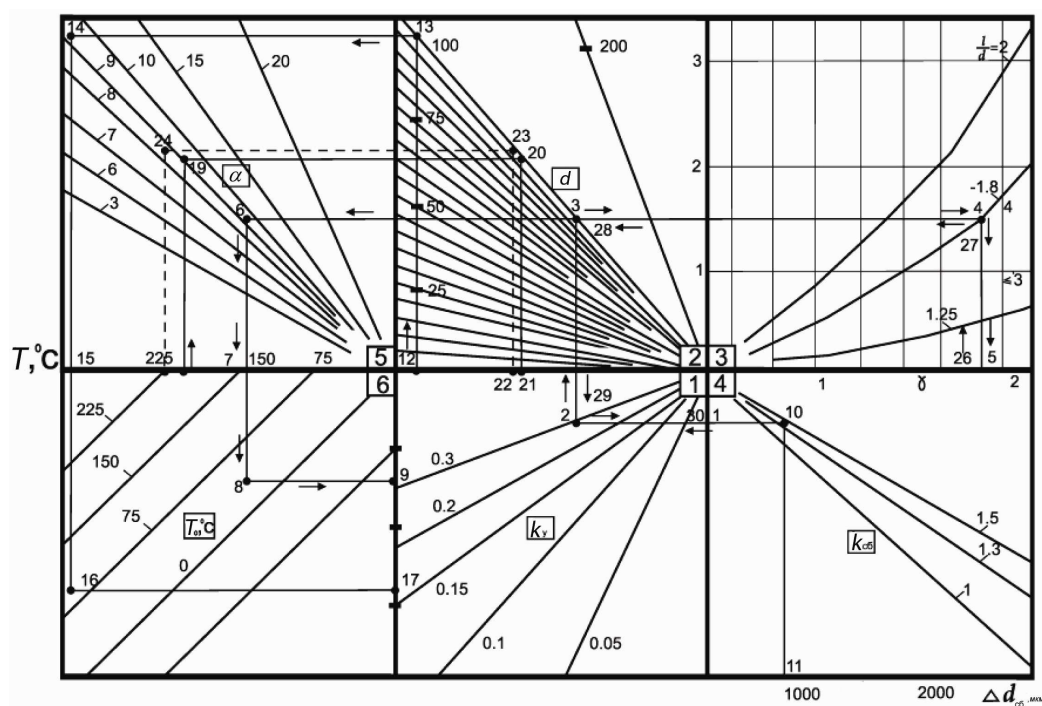


Рис. 2. Номограмма выбора технологических параметров КТСС соединений с натягом, обеспечивающих возможность качественной реализации технологии при горизонтальной схеме сборки

Rys. 2. Nomogram wyboru parametrów technologicznych połączeń wciskanych sposobem termicznym umożliwiającących jakościowy montaż przy łączeniu poziomym

Затем находим при заданных значениях коэффициентов линейного расширения  $\alpha_p$  и сжатия  $\alpha_{сж}$  материалов сопрягаемых деталей необходимые значения перепадов температуры  $\Delta T = \Delta d / d \cdot \alpha$ , которые откладываем с учетом значения температуры окружающей среды  $20^\circ\text{C}$  на абсциссе между квадрантами 5 – 6. По полученным данным в координатах  $\Delta T = \Delta d / d \cdot \alpha - T_0^\circ\text{C}$  строим в квадранте 5 наклонные лучи, соответствующие значениям коэффициентов линейного расширения  $\alpha_p$  и сжатия  $\alpha_{сж}$  материалов сопрягаемых деталей.

Если величины температуры термовоздействия, например, при охлаждении охватываемой детали  $T_0^\circ\text{C}$  может быть недостаточно, то необходимо найти температуру нагрева охватываемой детали  $T_n^\circ\text{C}$ . Для ее нахождения воспользуемся зависимостью (2.92) и рассчитаем необходимую температуру нагрева охватываемой детали  $T_n^\circ\text{C}$ , значения которой наносим на ординату между квадрантами 6 – 1. По расчетным данным температур  $T_0^\circ\text{C}$  и  $T_n^\circ\text{C}$  строим в квадранте 6 наклонные кривые, соответствующие значениям  $T_0^\circ\text{C}$ .

Следует также отметить, что на границе первого и второго квадрантов по оси абсцисс отложены значения необходимого суммарного при КТСС значения  $\Delta d_{сб}$ , соответствующие его значениям, отложенным на абсциссе квадранта 4.

Рассмотрим вариант решения задач по разработанным номограммам.

Так, если известна величина максимального сборочного натяга  $N$  (точка 1) и условия технологической реализации взаимного соединения деталей с временным зазором, то проводя

горизонталь в первом квадранте до пересечения (точка 2) с наклонным лучом, соответствующим заданному коэффициенту  $k_y$  (установки охватываемой детали в охватывающую с временным зазором), с точки 2 – вертикаль в точку 3 до пересечения с заданным диаметром  $d$  посадки, с точки 3 – горизонталь в третий квадрант до пересечения в точке 4 с кривой, соответствующей заданному соотношению  $l/d$  длины  $l$  и диаметра  $d$  посадки, затем опустив из этой точки вертикаль вниз в точку 5, находим допустимый угол  $\gamma$  перекося осей сопрягаемых деталей в начальный момент сборки.

Далее из точки 3 проводим в квадрант 5 до пересечения с лучом (точка 6), соответствующим значению коэффициента  $\alpha$  линейного, например, сжатия  $\alpha_{сж}$  для материала охватываемой детали. Из точки 6 ставим вертикаль вниз (точка 7) до пересечения с осью абсцисс и находим перепад температур  $\Delta T_y$  между сопрягаемыми деталями в момент начала их взаимного соединения (установки с временным зазором). Затем определяемся с возможно допустимой величиной температуры охлаждения  $T_o$  охватываемой детали в начальный момент ее установки. Проводим из точки 7 вертикаль в точку 8 до пересечения с наклонной линией, соответствующей установленной величине температуры охлаждения  $T_{oy}$ . После этого из точки 8 проводим горизонталь вправо до пересечения в точке 9 с осью ординат и находим возможную температуру  $T_{ny}$  нагрева охватывающей детали в момент начала установки в нее охватываемой детали.

С помощью приведенной номограммы представляется возможность решения задачи по определению необходимых величин температуры нагрева  $T_n$  охватывающей и низкотемпературного охлаждения  $T_o$  охватываемой деталей перед началом осуществления технологического процесса сборки, то есть перепада  $\Delta T$  температур между сопрягаемыми деталями.

Так, если известна величина максимального сборочного натяга  $N$  (точка 1) и условия технологической реализации сборки деталей с временным зазором, то проведя горизонталь в первом квадранте до пересечения (точка 10) квадранта 4 с наклонным лучом, соответствующим заданному коэффициенту  $k_{сб}$  (сборки охватываемой детали с охватывающей с временным зазором), а из точки 10 вертикаль в точку 11 до пересечения с осью абсцисс найдем необходимую величину  $\Delta d_{сб}$ , то есть суммарное увеличение  $\Delta d_n$  диаметра охватывающей детали при ее нагревании и  $\Delta d_o$  охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении.

Определив необходимую величину  $\Delta d_{сб}$ , находим на оси абсцисс между первым и вторым квадрантами точку 12, определяющую величину  $\Delta d_{сб}$ .

Далее, из точки 12 проводим вертикаль вверх до пересечения в точке 13 с наклонной, соответствующей величине  $d$  посадки, а с точки 13 горизонталь в квадрант 5 до пересечения в точке 14 с наклонной кривой, соответствующей величине коэффициента линейного сжатия  $\alpha_{сж}$  для материала охватываемой детали. Опустив из точки 14 вертикаль вниз на ось абсцисс квадранта 5 (точка 15), находим величину перепада температур. Если этот перепад может быть реализован за счет низкотемпературного охлаждения в интервале температур до  $-195,6^\circ\text{C}$ , принимаем величину температуры  $T_o$  низкотемпературного охлаждения и перепад  $215,6^\circ\text{C}$ .

Если этот перепад не может быть реализован за счет низкотемпературного охлаждения в интервале температур до  $-195,6^\circ\text{C}$ , то необходимо определить температуру нагрева. Для этого продлеваем вертикаль в квадрант 6 до пересечения с наклонной, соответствующей температуре жидкого азота (точка 16), с нее проводим горизонталь влево к оси ординат до пересечения в точке 17 и находим температуру нагрева – около  $440^\circ\text{C}$ .

Если проводится сборка деталей из различных материалов, то на оси абсцисс квадрантов 5 и 6 находим величину температуры  $T_o$  низкотемпературного охлаждения охватываемой детали 9 (точка 18). Затем из нее восстанавливаем вертикаль в точку 19 до пересечения с наклонной, соответствующей коэффициенту линейного сжатия  $\alpha_{сж}$  для материала охватываемой детали. Далее проводим горизонталь в квадрант 2 до пересечения в точке 20 с лучом, соответствующим заданному диаметру посадки  $d$ , и из точки 20 – вертикаль вниз до абсциссы квадрантов 2 и 1 в точке 21. Так находим в точке 21 возможную величину усадки  $\Delta d_o = 212$  мкм охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении.

Определяем далее по номограмме разницу  $\Delta d_n = \Delta d_{сб} - \Delta d_o$  между общей необходимой величиной  $\Delta d_{сб}$  и  $\Delta d_o$  охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении, соответствующей необходимому значению  $\Delta d_n$  изменения диаметра посадки охватываемой детали при ее нагревании. Находим эту величину по линии абсцисс между квадрантами 1 и 2 (точка 22). Из точки 22 восстанавливаем вертикаль вверх до пересечения в точке 23 с лучом, соответствующим диаметру посадки. Затем проводим горизонталь влево в квадрант 5 до пересечения в точке 24 с лучом, соответствующим коэффициенту  $\alpha_r = 8,5$  линейного расширения для материала охватываемой детали. Восстанавливаем вертикаль с точки 24 вниз на ось абсцисс в точку 25 и находим необходимую величину  $\Delta T_n$  перепада температур за счет нагрева охватываемой детали и окончательную температуру  $T_n = \Delta T_n - T_c$  ее нагрева, где  $T_c$  – температура окружающей среды.

Если известен допустимый угол  $\gamma$  скрещивания осей сопрягаемых деталей, диаметр посадки, параметр соотношения длины и диаметра посадки, то возможно установить допустимую величину максимального натяга, при котором еще можно собрать детали.

При известном допустимом угле  $\gamma$  скрещивания осей сопрягаемых деталей восстанавливаем с точки 26 вертикаль до пересечения с кривой, соответствующей заданному соотношению длины и диаметра посадки (точка 27), а далее – с нее горизонталь в квадрант 2 до пересечения в точке 28 с лучом, соответствующим заданному диаметру  $d$  посадки. Из точки 28 устанавливаем вертикаль вниз в квадрант 1 до пересечения с лучом в точке 29, соответствующим заданному коэффициенту  $k_y$  (установки охватываемой детали в охватывающую с временным зазором), а далее – горизонталь вправо до оси ординат. Находим в точке 30 возможно допустимую величину натяга, при котором еще можно провести сборку деталей без заклинивания.

На основании проведенных исследований установлено, что с увеличением сборочного натяга необходимо увеличивать перепад температур между сопрягаемыми деталями. При идентичности условий сборки (коэффициенты условий сборки  $k_{сб}$  и взаимной установки  $k_y$  деталей постоянны) представляется возможность увеличения угла  $\gamma$  перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение соотношения  $l/d$  длины посадки к диаметру посадки требует уменьшения угла перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение времени сборки и продолжительности (коэффициенты условий сборки  $k_{сб}$  и взаимной установки  $k_y$  увеличиваются) при постоянной величине перепада температур между сопрягаемыми деталями требует роста начального угла перекоса их осей.

С увеличением диаметра посадки при фиксированных значениях сборочного натяга и условиях сборки ( $\Delta d_{сб} = \text{const}$  и  $k_y = \text{const}$ ) представляется возможность уменьшать перепад температур между сопрягаемыми деталями и увеличивать угол  $\gamma$  перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение соотношения  $l/d$  длины посадки к диаметру посадки требует уменьшения угла перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение времени сборки и продолжительности (коэффициенты условий сборки  $k_{сб}$  и взаимной установки  $k_y$  увеличиваются) при постоянной величине перепада температур между сопрягаемыми деталями требует уменьшения начального угла перекоса их осей.

По разработанным номограммам представляется возможным решать следующие задачи:

1 – определять режимы термовоздействия на сопрягаемые детали с учетом заданной величины допустимого угла  $\gamma$  перекоса осей при заданных условиях реализации сборки, позволяющего разрабатывать в перспективе необходимые модули для нагрева и охлаждения конкретных изделий;

2 – устанавливать условия реализации сборки с учетом режимов термовоздействия на сопрягаемые детали и угла  $\gamma$  перекоса их осей при ориентировании и совмещении;

3 – определять величину допустимого угла  $\gamma$  перекоса осей сопрягаемых деталей при заданных режимах термовоздействия и условиях сборки, позволяющего разрабатывать в перспективе необходимые ориентирующие модули для конкретных изделий.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, создан способ и номограммы, позволяющие оперативно решать задачи по выбору взаимосвязанного комплекса технологических параметров, обеспечивающих успешную реализацию сборки соединений с натягом с использованием КТСС и создавать оригинальные модули для ориентирования деталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И.Л., Шалай В.А., Зенкин А.С. Выбор температуры нагрева и охлаждения для сборки соединений с натягом комбинированным термическим способом. «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциалов в современных условиях» Сб.: Материалы 9-й юбилейной Промышленной конференции с международным участием и блиц – выставки, 11- 18 февраля 2009 г., п. Славское, Карпаты. – К., 2009.- с. 315 – 316
2. Оборский И.Л. Выбор условий для качественной реализации процесса формирования соединений деталей с натягом КТСС.// "Человек–технологии–среда. Теория и практика". 15 – 19 сентября 2009 г. Сб.: Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции, 15 – 19 сентября 2009 г., г. Судак, Украина. – 2009. – С. 83 – 85.
3. Оборский И.Л. Методология определения технологических параметров, обеспечивающих качественный процесс выполнения соединений деталей с натягом КТСС. // "Человек–технологии–среда. Теория и практика". 15 – 19 сентября 2009 г. Сб.: Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции, 15 – 19 сентября 2009 г., г. Судак, Украина. – 2009. – С. 85 – 88.

## GRAPHO - ANALYTICAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE REALIZATION OF ASSEMBLING CONNECTIONS WITH THE INTERFERENCE BY THE THERMAL METHODS

**Abstract.** *It is developed method and the nomograms, which make it possible to operationally solve problems in the selection of the interconnected complex of the technological parameters, which ensure the successful realization of assembling connections with the interference with the use [KTSS] and to create original modules for the orientation of components.*

Vitalii PASICHNYK  
 Vladimir KORENKOV  
 Bayesteh ABDOLREZA  
 Uniwersytet Techniczny  
 „Politechnika Kijowska”  
 Kijów, Ukraina

## ZWIĘKSZENIE WYDAJNOŚCI OPRACOWANIA MODELI MATEMATYCZNYCH PODWÓJNYCH OGRANICZEŃ PRZEMIESZCZEŃ ELEMENTÓW WYROBÓW MONTOWANYCH

### ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БИНАРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ОГРАНИЧЕНИЙ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СБОРОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Представлено новое решение задачи автоматизированного формирования математической модели сборочной единицы в виде бинарных отношений ограничений подвижности на основе трехмерной модели, созданной в CATIA. Показано, что применение нового программного обеспечения позволяет анализировать сборки с большим числом деталей практически за полиномиальное время.

На данном этапе развития 3D CAD/CAPP систем, в частности по автоматизированному проектированию технологических процессов сборки, одной из основных проблем является большой объем и сложность ввода исходной информации о деталях и изделии в целом. Под термином «исходной» чаще всего понимают информацию о механических связях между деталями, их размерные, точностные характеристики и т.п.

В работах [1-3] уже рассматривались способы представления и математического описания подобной информации, а также подходы к формализованному анализу и синтезу порядков сборки изделий на ее основе.

В соответствии с данными работами, ограничения подвижности деталей в сборочной единице представляются в виде матриц  $M(T+)$  БООП (бинарных отношений ограничений подвижности) размером  $N \times N$  ( $N$  – количество деталей изделия). Каждой детали  $a_i \in A$  ( $A$  – множество всех деталей изделия) соответствует  $i$ -я строка и  $i$ -й столбец. Элемент  $m_{ij} \in M(T+)$  является не нулевым, если деталь  $a_i$  ограничивает возможное перемещение детали  $a_j$  в положительном направлении оси  $T = \{X, Y, Z, \dots\}$ . При этом, символ «1» отражает факт существования контактных, а «8» – удаленных БООП (рис. 1).

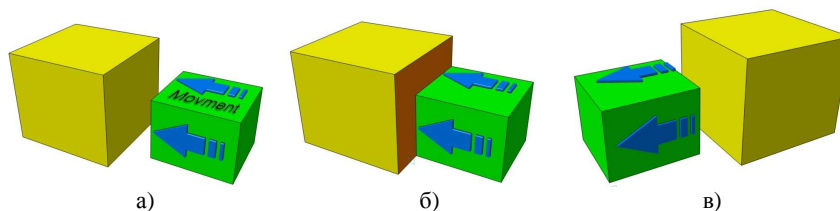


Рис. 1. Типы БООП: а) удаленное ограничение подвижности; б) контактное ограничение подвижности; в) отсутствие ограничений

Rys. 1. Typy podwójnych ograniczeń przemieszczeń (BOOP); a) odległościowe ograniczenie, b) ograniczenia kontaktowe, c) brak ograniczenia

В работе [4] представлен расширенный способ описания соединений, позволяющий

идентифицировать их тип (а соответственно и назначать типовой технологический процесс сборки данного соединения), сложную траекторию перемещения и пр. Однако в данной статье рассматривается лишь формирование упрощенной математической модели, которая не детализирует специфику технологии сборки, а ограничивается только инвариантной составляющей последовательности сборки.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОРОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ

Формирование матриц БООП является одним из самых узких мест в современных CAPP системах сборки, так как требует заполнения матриц размерностью как минимум  $3 \times N \times N$ . Диалоговый режим заполнения в данном случае следует сразу отбросить, поскольку помимо высокой трудоемкости самого процесса не исключаются ошибки, существенно влияющие на правильность и эффективность проектных решений. Попытки автоматизировать ввод информации путем анализа сборочного чертежа или анализа различных проекций сборочной единицы при 2D моделировании мы также считаем бесперспективными. Подобный анализ, наверное, сугубо теоретически возможно описать, но практически реализовать чрезвычайно сложно. Таким образом, единственным выходом для автоматизированного ввода исходных данных является использование 3D моделей, полученных в одной из современных CAD системах.

В этой статье мы предлагаем подход к выявлению взаимных ограничений подвижности деталей, реализованный в системе CATIA V5R20.

Основная идея предлагаемого подхода заключается в следующем: мы последовательно перебираем все пары деталей, входящих в изделие и одной из них предоставляем виртуальные перемещения в положительном и/или отрицательном направлении оси X, Y, Z и определяем, возникла ли область пересечения этих деталей или нет. Наличие такой области свидетельствует о наличии ограничений подвижности, а ее отсутствие – о том, что данные детали не ограничивают друг друга по данному координатному направлению. Факт наличия или отсутствия области пересечения двух деталей при виртуальном перемещении можно определяется встроенной функцией «Clash».

Рассмотрим более подробно общий алгоритм формирования матриц БООП.

*Шаг 1.* На основании информации о габаритах объектов (рис. 2) решается вопрос о потенциальной возможности их пересечения, – если проекции ограничивающих параллелепипедов в определенном координатном направлении пересекаются, то высока вероятность того, что рассматриваемые объекты при монтажном перемещении также могут столкнуться.

*Шаг 2.* В случае выявления области пересечения выполняется уточнение наличия или отсутствия препятствия выполнению монтажного перемещения. Для этого сборочный элемент передвигается на некоторую величину  $\Delta$  вдоль координатного направления и выполняется функция «Clash».

Данная функция определяет область пересечения между трехмерными телами в CAD системе. В ее основу положен алгоритм поиска пересечения полигональных фигур. То есть, вначале анализа модель разбивается на сетку треугольников (рис. 3), а далее выявляются области пересечения данных треугольников.

Следует отметить, что размеры треугольников настраиваемы и зависят от формы и габаритов деталей. В настоящее время величина перемещений  $\Delta$ , а также точность расчета (фактически, размер полигональной фигуры) задаются пользователем вручную, однако ведутся работы по автоматизации данного процесса.

*Шаг 3.* Выявляются крепежные соединения: на данном этапе автоматически выявляются резьбовые соединения, моделируемые функцией «Cosmetic Thread», а также соединения определенные как библиотечные (например, заклепки, сварные швы и пр.).

Результатом работы описанного выше алгоритма будут матрицы БООП, имеющие вид, показанный на рис. 4.

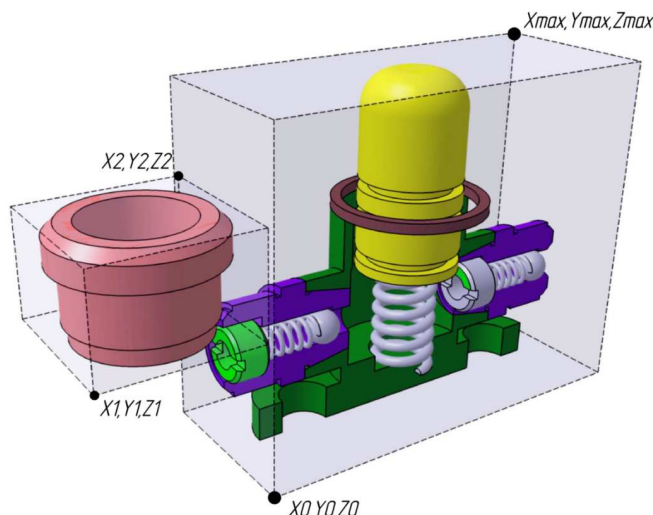


Рис. 2. Предварительный этап выявления механических связей, накладывающих ограничения на перемещения элементов сборки в зону монтажа

Rys. 2. Wstępny etap identyfikacji mechanicznych powiązań wywołujących ograniczenia przemieszczeń elementów montowanych do strefy montażu

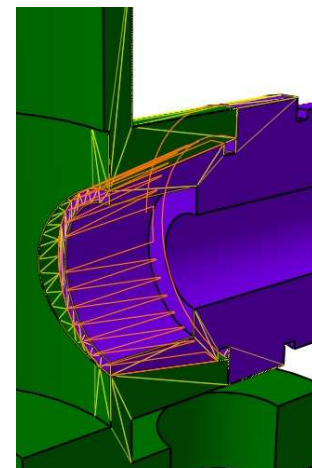


Рис. 3. Определение места контакта или области пересечения моделей функцией «Clash»

Rys. 3. Wyznaczanie miejsca kontaktu lub obszaru przecinania modelu funkcji „Clash”

Математическая модель сборочного изделия имеет иерархическую структуру и кроме геометрической информации (о БООП и свободных для доступа поверхностях) содержит еще достаточно большое количество параметров: массово-инерционные характеристики элементов; ссылки на типовые переходы сборки отдельных соединений; временные характеристики и пр., которые в данной статье не рассматриваются.

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ

Основное внимание при разработке САПР систем уделяется методам синтеза последовательностей сборки. Данное положение объясняется тем, что:

- задача синтеза – математическая и не требует особых знаний технологии сборки;
- от полноты решения данной задачи зависит эффективность всей системы;
- задача в любом случае имеет ограниченное множество решений (их количество хотя и достаточно велико, но конечно, поскольку является функцией от числа деталей в изделии).

Известны несколько подходов к решению данной задачи. Среди них наибольшее распространение получили: вероятностные методы, использующие в основном генетические алгоритмы [5,6]; методы прямого синтеза [7-9], характеризующиеся большой трудоемкостью вычислений, и методы обратного синтеза [4]. Вероятностные методы не гарантируют оптимальности решения, а методы прямого синтеза являются комбинаторными с трудоемкостью алгоритмов  $\sim O(2^N)$  и, следовательно, не могут применяться на больших сборках. Данных недостатков лишены методы обратного синтеза последовательностей сборки.

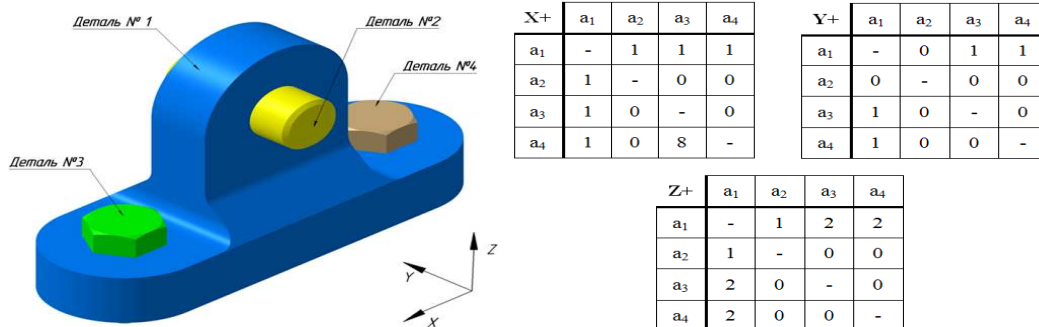


Рис. 4. Математическая модель сборочного изделия

Rys. 4. Model matematyczny montowanego wyrobu

Сама процедура происходит в два этапа. На первом этапе устанавливаются допустимые конструкцией варианты разборки изделия, которые потом, на втором этапе, трансформируются во множество технологически целесообразных вариантов последовательно-параллельной сборки.

Определение множества последовательностей разборки изделий сводится к поиску в матрицах БООП элементов  $a_i \in A$ , представляющих собой мажоранту на отношении  $L \subseteq A \times A$ , если для всех  $a_j \in A$  выполняется  $a_j \bar{L} a_i$ , или миноранту, если для всех  $a_j \in A$  выполняется  $a_i \bar{L} a_j$ . Отсутствие ограничений подвижности в положительном или отрицательном направлениях свидетельствует о возможности беспрепятственного удаления  $a_i$  из изделия, а итерационный процесс удаления таких деталей, с поэтапным сужением матриц БООП, соответствует процессу последовательно-параллельной разборки изделия. В целом трудоемкость подобных алгоритмов  $\sim O(N)$ , что позволяет их применять к изделиям с числом деталей  $>100$ .

### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

С целью проверки и тестирования разработанных алгоритмов, была написана программа на языке C#, использующая функции API системы CATIA V5R20 (рис. 5).

В настоящее время функционал программы обеспечивает:

- полностью автоматическое построение матриц БООП для прямолинейных поступательных перемещений деталей во время сборки;
- ввод информации о крепежных соединениях (автоматизирована процедура выявления резьбовых, а также библиотечных элементов);
- автоматизированный синтез последовательностей сборки изделий с произвольным уровнем вложенности подборок (технологическая структура изделия строится по принципу максимальной концентрации операций);
- программную интеграцию с офисными пакетами (файлы MS Excel используются в качестве носителей исходных данных, а MS Word – для вывода отчетов);
- представление последовательностей сборки в виде диаграмм.

Тестирования программного обеспечения проводились на сборочных изделиях машино- и приборостроения. Усредненные оценки времени работы программы приведены на рис. 6.

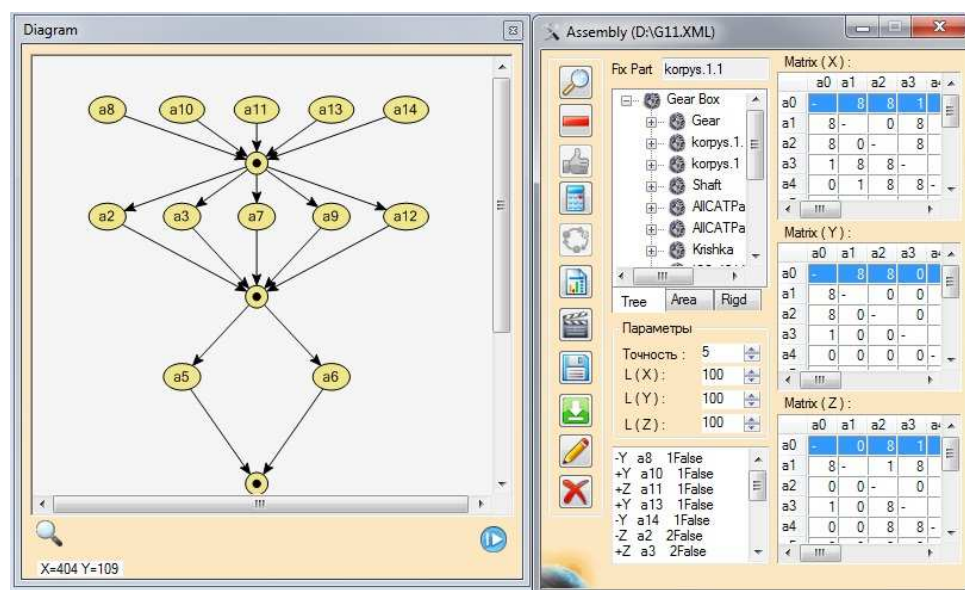


Рис. 5. Интерфейс программы

Rys. 5. Widok okna programu

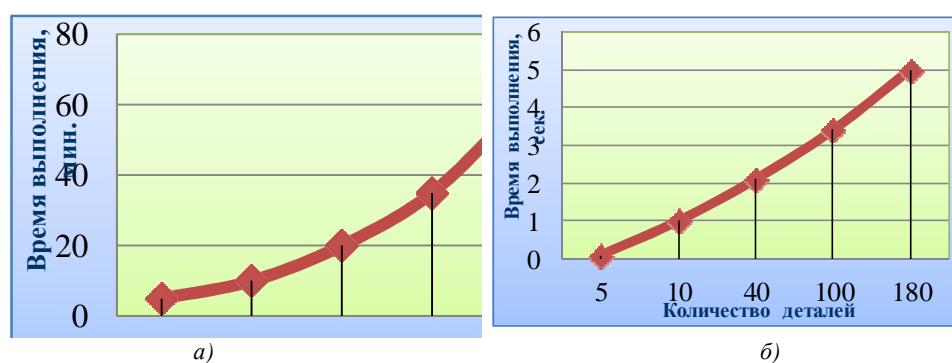


Рис. 6. Средняя оценка времени работы программы:  
 а) анализ геометрии трехмерной сборочной модели и формирование матриц БООП;  
 б) синтез последовательностей сборки с последующим выводом результатов

Rys. 6. Średnia ocena czasu pracy programu: a) analiza geometrii trójwymiarowego modelu montażowego i kształtowanie matryc BOOP; b) synteza kolejności montażu ze wskazaniem wyników

## ВЫВОДЫ

Усовершенствован и реализован в виде нового программного обеспечения метод формирования математических моделей бинарных отношений ограничений подвижности элементов сборочных изделий, позволяющий автоматизировать процесс синтеза последовательностей сборки.

Сам метод, а также элементы его программной реализации могут быть использованы самостоятельно или в качестве одной из составляющих 3D CAD/CAPP на этапе конструкторской (для оценки технологичности конструкции изделия) и технологической подготовки механосборочного производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сімута Р.Р. Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – К., 2003. – 174 с.
2. 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.
3. 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
4. Пасічник В.А. Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва: дис... д-ра техн. наук : 05.02.08 / НТУУ «КПІ». - К., 2009.
5. Dini G., Failli F., Lazzerini B., Marcelloni F. Generation of optimized assembly sequences using genetic algorithms // Annals of CIRP. – 1999. – Vol. 48, №1. – P. 227-235.
6. Fujimoto H., Fares Sebaaly M., Mrad F. A concurrent approach for assembly design and planning // International Journal of Science and Technology. – 1999. – Vol. 10, №2. – P. 19-33.
7. Laperrière L., ElMaraghy H. GAPP: A generative assembly process planner // Journal of Manufacturing Systems. – 1996. – Vol. 15, №4. – P. 282-293.
8. 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.
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.

#### INCREASED PRODUCTIVITY OF MATHEMATICAL MODELS DEVELOPMENT OF ASSEMBLY ELEMENTS MOBILITY

**Abstract.** This article presented a new solution to the problem of forming a mathematical model of an automated assembly in the form of binary relations of movement restrictions on 3D models created in CATIA. Shown that the use of new software lets you analyze an large assembly, is practically in polynomial time.

**Rafał KLUZ**Politechnika Rzeszowska  
Rzeszów**OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNO-TECHNOLOGICZNYCH MODUŁOWEGO STANOWISKA MONTAŻOWEGO****THE OPTIMIZATION OF THE CONSTRUCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MODULE ASSEMBLY STAND**

Intensywny rozwój budowy maszyn, oraz stale zwiększające się wymagania rynku doprowadziły do powstania i rozwoju elastycznych systemów montażowych, które można zdefiniować jako: komputerowo zintegrowane systemy produkcyjne, zbudowane z robotów oraz urządzeń peryferyjnych, w których podstawowymi operacjami technologicznymi są operacje montażowe [2, 5].

Budowa zrobotyzowanych systemów montażowych w oparciu o komponenty automatyzacji pozwala na łatwe dostosowanie produkcji do zmieniających się wymagań rynkowych w aspektach małej liczebności serii połączonej z wysoką jakością produkcji. Postęp w zakresie uniwersalności technologicznej współczesnych maszyn i urządzeń technologicznych pociąga za sobą rosnące wymagania wobec urządzeń składających się na podsystemy transportu i manipulacji. Modułowy sposób budowy tych urządzeń na wiele zalet, gdyż charakteryzuje się [2]:

- krótkim czasem projektowania robotów i urządzeń, których poszczególne funkcje realizują poszczególne moduły,
- skróceniem czasu przeznaczonego na testowanie i wdrażanie urządzenia do produkcji
- szybkim i łatwym montażem i demontażem oraz szybkim usuwaniem skutków awarii,
- ponownym wykorzystaniem sprawnych modułów do budowy innych urządzeń.

Jednym z ważniejszych zadań podczas projektowania zrobotyzowanego stanowiska jest wybór odpowiedniego układu kinematycznego robota oraz określenie jego dokładności oraz oprzyrządowania. Zadanie to nabiera obecnie dużego znaczenia, gdyż na rynku pojawiły się wyspecjalizowane firmy (np. Bosch Rexroth GmbH, Fastems), które dostarczają elementy modułowe do montażu zautomatyzowanych urządzeń wytwórczych, warsztatowych i pomocniczych. Najczęściej systemy modułów pozwalają na zestawienie kilku układów, rozwiązujących określone zadanie [5]. Z punktu widzenia wydajności, dokładności oraz jakości wykonywania prac i pracochłonności zainstalowania układy te jednak nie są równoważne, dlatego w niniejszej pracy przedstawiono algorytm umożliwiający porównanie i wybór optymalnej struktury kinematycznej robota do realizacji zadanej operacji montażu. Zaproponowano również metodykę wyznaczania parametrów łańcucha wymiarowego operacji montażowej, dającą możliwość konfiguracji stanowiska montażowego bez zbędnego zwiększania jego kosztów.

**ALGORYTM WYBORU UKŁADU KINEMATYCZNEGO ROBOTA MODUŁOWEGO**

Algorytm umożliwia porównanie układów na podstawie parametrów, które mają największy wpływ na koszty eksploatacji stanowiska, a mianowicie: objętości przestrzeni roboczej, dokładności pozycjonowania, szybkości pracy, parametrów energetycznych, pola powierzchni zajmowanego przez skonfigurowany system, wygody obsługi oraz złożoności konstrukcji (rys. 1)

Każdemu z analizowanych parametrów należy przypisać współczynnik wagowy, uwzględniający jego wpływ na wybór ostatecznej konfiguracji robota. Wskaźnikom, które mają największy wpływ na przebieg realizacji procesu należy przypisać wartość 1, natomiast pozostałym wartości z przedziału od 0 do 1, w zależności od konkretnych warunków produkcyjnych realizacji procesu.

Na etapie 1 (rys. 1) przedstawionego algorytmu ze zbioru układów możliwych do zrealizowania wybiera się kilka najbardziej odpowiednich do wykonania danej operacji. W kolejnym kroku (etap 2) dla wybranych układów dokonywana jest analiza objętości przestrzeni roboczej. W celu porównania różnych konfiguracji należy przyjąć następujące parametry:

- liniowe przemieszczenie pary kinematycznej  $S$ ,
- katowe przemieszczenie pary kinematycznej  $\pi/2$ ,
- długość ogniw  $l$ ,
- długość zatwierdzenia  $l/3$ .

Przyjęte umowne wartości parametrów umożliwiają oszacowanie objętości przestrzeni roboczej oraz wyznaczenie objętości względnej  $V_y$ , będącej stosunkiem objętości do liczby par kinematycznych układu. Wybór przeprowadzany na etapie 3 przedstawionego algorytmu polega na wyborze struktur mających największą jednostkową objętość i pracujących w różnych układach współrzędnych (cylindrycznym, sferycznym, kartezjańskim, katowym) (rys 2).

Na etapie 4 następuje porównanie układów z punktu widzenia błędu generowanego na stanowisku montażowym  $\delta$ . W ogólnym przypadku błąd ten jest sumą błędu statycznego (wynikającego z obciążenia konstrukcji nośnej robota masą przenoszonej części) oraz błędu kinematycznego wynikającego z błędów ustawienia zaprogramowanych wartości współrzędnych konfiguracyjnych robota [3, 4].

$$\delta = \left[ 4 \left( (\mu_{\eta x1} - \mu_{\xi x1}) \pm 3 \left( \sigma_{\eta x1}^2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \right)^2 + 4 \left( (\mu_{\eta x2} - \mu_{\xi x2}) \pm 3 \left( \sigma_{\eta x2}^2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial h}{\partial q_i} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

gdzie:  $\mu_{\xi x1}$ ,  $\mu_{\eta x1}$ ,  $\mu_{\xi x2}$ ,  $\mu_{\eta x2}$  – odpowiednio wartości oczekiwane (błędy systematyczne) zmiennej losowej błędu położenia osi części bazowanej w chwytaku robota i zastosowanym urządzeniu bazującym względem osi układu współrzędnych  $OX_1X_2$ :  $\sigma_{\eta x1}^2$ ,  $\mu_{\eta x1}^2$  – wartości wariancji dwuwymiarowej zmiennej losowej błędu położenia osi części ustalonej w urządzeniu bazującym,  $\sigma_{q_i}^2$  – wariancja zmiennej losowej błędu ustawienia  $i$  – tej współrzędnej uogólnionej robota montażowego

W celu określenia maksymalnego czasu cyklu montażu, należy przyjąć, że prędkość na poszczególnych współrzędnych uogólnionych jest wartością stałą. Dokonane założenie umożliwia oszacowanie czasu potrzebnego na realizację procesu (etap 5) za pomocą zależności [1]:

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\dot{S}_i} + \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i l_{mi}}{\dot{S}_i} \quad (2)$$

gdzie:  $S_i$  – całkowite liniowe przemieszczenie w cyklu,  $\varphi_i$  – sumaryczne katowe przemieszczenie,  $\dot{S}_i$  – liniowa prędkość przemieszczenia,  $l_{mi}$  – maksymalna odległość chwytaka od osi obrotu.

Na etapie 6 następuje ocena wybranych układów ze względu na straty energetyczne, powstające w czasie wykonywania przemieszczenia w cyklu na podstawie zależności [1]:

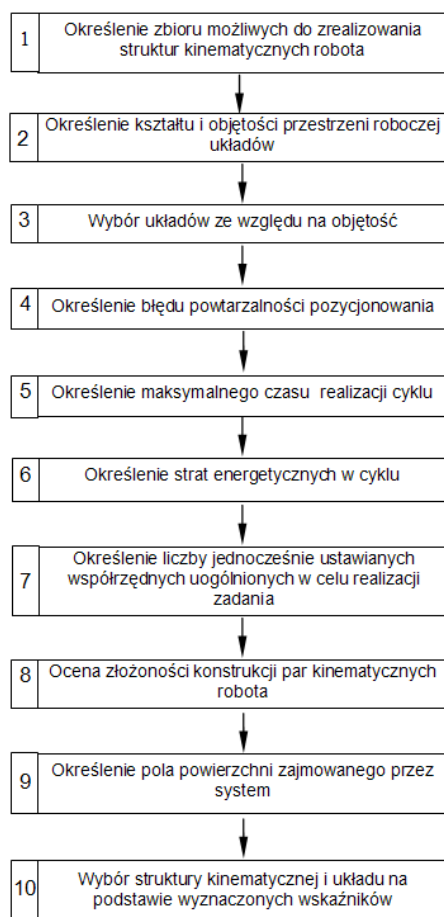
$$E_s = \sum_{i=1}^n S_i F_{i0} + \sum_{i=1}^n \varphi_i l_{mi} F_{i0} \quad (3)$$

Na etapie 7 analizowany jest proces technologiczny pod kątem ilości punktów w przestrzeni roboczej niezbędnych do prawidłowej realizacji procesu, wymagających wysokiej dokładności ustawienia chwytaka robota. Następnie określana jest ilość jednocześnie pracujących par kinematycznych niezbędnych do realizacji zadania. W dalszej kolejności na etapie 8 porównywana jest złożoność konstrukcji par kinematycznych łączących ogniw robota. W tym celu wprowadzono współczynnik określający stopień złożoności  $K_p$  konstrukcji, opierający się na porównaniu własności i budowy obrotowych i postępowych par kinematycznych.

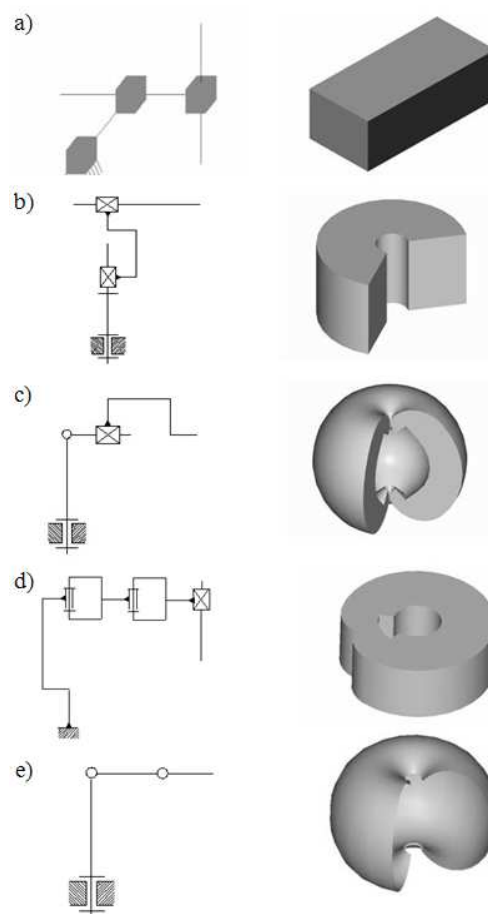
Ogólnie współczynnik złożoności całej konstrukcji jest sumą współczynników wszystkich par obrotowych i postępowych w niej występujących [7]:

$$K_p = \sum_{i=1}^n K_{ppi} + \sum_{i=1}^m K_{poi} \quad (4)$$

gdzie:  $K_{pp}$  – stopień złożoności par postępowych,  $K_{po}$  – stopień złożoności par obrotowych.



Rys. 1. Algorytm wyboru układu kinematycznego robota w procesach



Rys. 2. Struktura kinematyczna robotów: a) kartezyjska, b) cylindryczna, c) sferyczna, d) scara, e) kątowa

Na etapie 9 ocenie podlega powierzchnia zajmowana przez układ, wraz z niezbędnymi środkami pomocniczymi. Ostatecznie w bloku 10 następuje wybór kinematycznej struktury robota, najbardziej odpowiedniej do realizacji procesu montażu cylindrycznych połączeń części maszyn. Wybór następuje w oparciu o wartość współczynnika porównania  $Kp_{ij}$  układu  $i$  oraz układu  $j$ :

$$K_{P_{ij}} = \prod_k K_k \cdot \frac{P_{ki}}{P_{kj}} = K_1 \cdot \frac{P_{11}}{P_{12}} \cdot K_2 \cdot \frac{P_{21}}{P_{22}} \dots K_6 \cdot \frac{P_{61}}{P_{62}} \quad (5)$$

gdzie  $K_k$  - współczynnik znaczenia  $k$  - tego parametru oceny.  $P_{1i}$ ,  $P_{2i}$ ,  $P_{3i}$  - pierwszy, drugi,  $k$  - ty parametr  $i$  - tego robota,  $P_{1j}$ ,  $P_{2j}$ ,  $P_{3j}$  - pierwszy, drugi,  $k$  - ty parametr  $j$  - tego robota.

Za pomocą współczynnika  $K_{P_{ij}}$  porównywane są wszystkie analizowane układy, spośród których wybierany jest najodpowiedniejszy względem analizowanych kryteriów do realizacji zadanej operacji, w myśl zasady: jeżeli  $K_{P_{ij}} > 1$  odpowiedniejszą strukturę ma  $i$  - ty robot.

### OKREŚLENIE DOKŁADNOŚCI MODUŁÓW STANOWISKA MONTAŻOWEGO

Wybrany na podstawie przedstawionego algorytmu układ kinematyczny robota zapewnia minimalną liczbę stopni swobody, konieczną do zrealizowania zadanej operacji montażu, przy spełnieniu stawianych mu wymagań technicznych. Jednakże w celu minimalizacji nakładów na wykonanie, zainstalowanie i nastawienie robota montażowego wykonującego zadaną operację, przy jednoczesnym zapewnieniu niezawodności jej wykonywania, błąd powtarzalności pozycjonowania i orientacji jego końcówki roboczej powinien być maksymalnie zbliżony do wielkości dopuszczalnych przemieszczeń liniowych i kątowych łączonych elementów w przestrzeni, w granicach których możliwy jest jeszcze ich montaż [6].

Przeprowadzone badania wykazały [3] iż największy wpływ na proces montażu mają kinematyczne błędy ustawienia za pomocą zastosowanych napędów zaprogramowanych wartości współrzędnych uogólnionych, oraz błędy statyczne pochodzące od ciężaru przenoszonej części. W przypadku, gdy robot przeznaczony jest do konkretnej operacji technologicznej montażu maszyn, znany jest zakres obciążeń w czasie pracy robota, w związku z czym istnieje możliwość skonfigurowania najbardziej adekwatnej jego konstrukcji na bazie ujednoliconych modułów. Potwierdza to przeprowadzona analiza wpływu błędów robota na montowalność cylindrycznych połączeń części maszyn. Dla dwóch różnych punktów w przestrzeni roboczej robota antropomorficznego Mitsubishi RV-M2 przeprowadzono symulację, polegającą na badaniu wpływu błędów ustawienia poszczególnych współrzędnych uogólnionych na wielkość luzu kojarzonych części (rys. 3).

Przeprowadzona analiza wykazała zróżnicowany wpływ tych błędów na możliwość poprawnej realizacji połączenia, z założonym (0.9998) prawdopodobieństwem (uzależnionym dodatkowo od wyboru punktu w przestrzeni roboczej zrobotyzowanego stanowiska montażowego) (rys. 3), dlatego w przedstawionym zadaniu wybór optymalnych parametrów stanowiska montażowego rozpatrzono w zależności od błędów realizacji  $k$  - tym napędem ruchu obrotowego  $\sigma_{\phi k}$ , oraz błędów realizacji  $j$  - tym napędem ruchu wzdłużno - postępowego  $\sigma_{sj}$ .

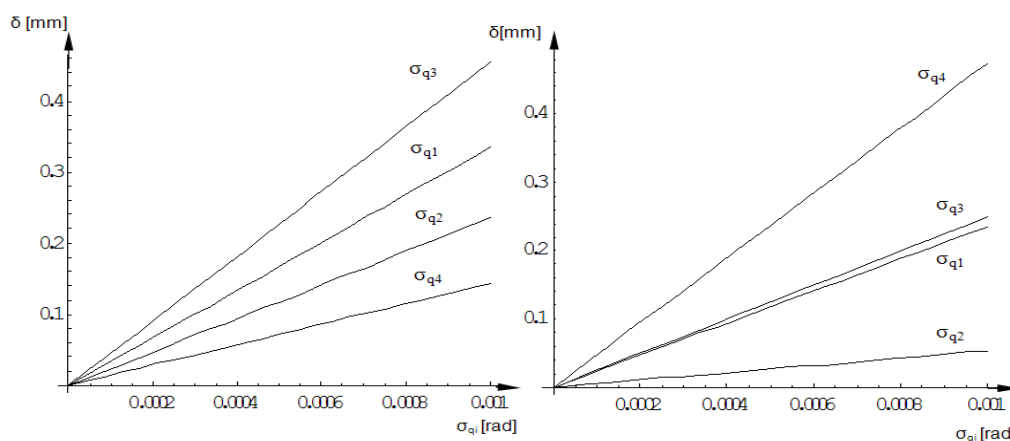
Rozwiązanie przedstawionego zagadnienia polega na poszukiwaniu minimum funkcji celu (6), zapewniającej maksymalne zbliżenie błędu generowanego przez robota do tolerancji na względne przemieszczenie osi łączonych części:

$$f(X) = |\delta - T_\delta| \rightarrow \min \quad (6)$$

$$f(X) = \left| T_\delta - \sqrt{(\mu_{\xi_{x1}} \pm 3\sigma_{\xi_{x1}})^2 + (\mu_{\xi_{x2}} \pm 3\sigma_{\xi_{x2}})^2} \right| \quad (7)$$

$$X = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n] \in Z_M = \{ \sum : \psi_i(X) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \} \quad (8)$$

gdzie:  $T_\delta$  - tolerancja względnego przesunięcia osi łączonych elementów,  $\mu_{\xi_{x1}}$ ,  $\mu_{\xi_{x2}}$  - wartość oczekiwana kinematycznego błędu położenia osi montowanych elementów odpowiednio na osi  $X_1$  i  $X_2$ ,  $\sigma_{\xi_{x1}}$ ,  $\sigma_{\xi_{x2}}$  - odchylenie standardowe błędu odległości między osiami montowanych elementów,  $\psi$  - układ warunków ograniczających nałożonych przez konstruktora - skrajne wartości błędów poszczególnych modułów



Rys. 3. Wpływ błędów ustawienia współrzędnych konfiguracyjnych robota o strukturze kątowej na wartość błędu całkowitego  $\delta$  dla dwóch punktów w jego przestrzeni

Do rozwiązania przedstawionego zagadnienia wykorzystano metodę sekwencyjnego programowania kwadratowego (SQP). W celu porównania uzyskanych wyników, przyjęto następujące dane:  $\sigma_{\eta x1} = 0.02\text{mm}$ ,  $\sigma_{\eta x2} = 0.015\text{mm}$ ,  $\mu_{\eta x1} = 0$ ,  $\mu_{\eta x2} = 0$ ,  $\text{cov}_{\eta}(x_1, x_2) = 0$  (parametry błędów ustawienia części bazowej), oraz luz cylindrycznej jednostki montażowej równy  $0.194\text{mm}$ . W wyniku rozwiązania przedstawionego zadania uzyskano następujące dopuszczalne wartości odchyłeń standardowych błędów ustawienia poszczególnych wartości współrzędnych konfiguracyjnych robota:  $\sigma_{q1} = 0.00003688\text{ rad}$ ,  $\sigma_{q2} = 0.0001593\text{ rad}$ ,  $\sigma_{q3} = 0.00003603\text{ rad}$ ,  $\sigma_{q4} = 0.00003230\text{ rad}$ , przy wartości funkcji celu (6.26) równej  $3.7928 \cdot 10^{-11}$ . W celu określenia wpływu wyboru punktu w przestrzeni roboczej robota na postać rozwiązania, przedstawione zagadnienie rozwiązano dla trzech różnych zbiorów zmiennych uogólnionych, oraz dla wartości luzu połączenia równego odpowiednio:  $0.194\text{mm}$  i  $0.28\text{mm}$ , uzyskując w każdym przypadku różne wartości dopuszczalnych błędów generowanych przez robot (odchyłeń standardowych  $\sigma_{qi}$ ), oraz różny rozkład wartości tych błędów, między poszczególnymi przekładniami. Uzyskane rozwiązania dla poszczególnych punktów w przestrzeni roboczej wraz z uzyskanymi wartościami funkcji celu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości odchyłeń standardowych błędów regulacji poszczególnych współrzędnych uogólnionych dla trzech różnych punktów w przestrzeni robota uzyskane w wyniku optymalizacji

Wartości współrzędnych uogólnionych [rad]	$\delta = 0.194\text{mm}$		$\delta = 0.28\text{mm}$	
	Rozwiązanie [rad]	Wartość funkcji celu	Rozwiązanie [rad]	Wartość funkcji celu
$q_1 = 0.5236$ $q_2 = 0.8727$ $q_3 = 1.3963$ $q_4 = 1.0472$	$\sigma_{q1} = 0.00002646$ $\sigma_{q2} = 0.00014006$ $\sigma_{q3} = 0.00003101$ $\sigma_{q4} = 0.00006335$	$2.2458 \cdot 10^{-11}$	$\sigma_{q1} = 0.00005421$ $\sigma_{q2} = 0.00021635$ $\sigma_{q3} = 0.00006458$ $\sigma_{q4} = 0.00011649$	$2.8154 \cdot 10^{-11}$
$q_1 = 1.0472$ $q_2 = 1.0472$ $q_3 = 1.2217$ $q_4 = 1.3963$	$\sigma_{q1} = 0.00002123$ $\sigma_{q2} = 0.00003343$ $\sigma_{q3} = 0.00001290$ $\sigma_{q4} = 0.00001176$	$3.35863 \cdot 10^{-11}$	$\sigma_{q1} = 0.00007192$ $\sigma_{q2} = 0.00030347$ $\sigma_{q3} = 0.00005189$ $\sigma_{q4} = 0.00049026$	$3.17097 \cdot 10^{-11}$

## WNIOSKI

Przedstawiona metodyka wyznaczania parametrów konstrukcyjno – technologicznych parametrów robota montażowego można wykorzystać w praktyce przemysłowej. Na podstawie przedstawionego algorytmu projektant zrobotyzowanego stanowiska montażowego może wybrać optymalną strukturę kinematyczną robota dla realizowanej operacji montażu oraz określić wymagania dokładnościowe urządzeń wchodzących w skład łańcucha kinematycznego operacji montażowej. Przeprowadzona optymalizacja parametrów technologicznych robota, wykazała, iż istnieje możliwość zastosowania do realizacji procesu montażu cylindrycznej jednostki montażowej o luzie 0.194mm mniej dokładnej konstrukcji robota, bez obniżania niezawodności stanowiska. Otrzymane wyniki odbiegają, bowiem od rzeczywistych błędów generowanych w przegubach robota, zarówno pod względem wartości tych błędów, jak i stosunku wartości przypadających na poszczególne przekładnie. Największym błędem obciążona jest przekładnia odpowiadająca współrzędnej uogólnionej  $q_3$ , pozostałe zaś przekładnie generują w przybliżeniu taką samą wartość błędu  $\sigma_{q_3} > \sigma_{q_1} \approx \sigma_{q_2} \approx \sigma_{q_4}$  ( $0.0000436 > 0.0000349 = 0.0000349 = 0.0000349$  rad), podczas gdy zmiana stosunku wartości tych błędów umożliwia zwiększenie ich wartości o 5.68% dla współrzędnej uogólnionej  $q_1$ , 356.65% dla  $q_2$ , kosztem zmniejszenia błędów o – 17.35% dla współrzędnej  $q_3$  i – 7.42% dla  $q_4$ .

## LITERATURA

1. Frołow K.W., Worobiew E.I., *Mechnika promysłennych robotow*. Tom 3, Wysszaia szkoła, Moskwa 1995.
2. Honczarenko J., Berliński A., *Zastosowanie komponentów mechatronicznych w budowie zrobotyzowanych systemów produkcyjnych*, *Technologia I Automatykacja Montaży*, nr 3, 2006 .
3. Kluz R., *Marking the optimum configuration of robotized assembly stand*, *Archives of Mechanical Technology and Automation* vol. 29, No 2 (2009) 113-122.
4. Kluz R., *Montowalność czopowo – tulejowych połączeń realizowanych przez roboty montażowe*, *Technologia i Automatykacja Montaży*, 2007, nr 2, s. 17–20
5. Rout B. K., Mittal R.K., *Tolerance design of robot parameters using Taguchi method*, *Mechanical System and Signal Processing* 20, 2006, s. 1832-1852
6. Singh P. K., Jain S.C., Jain P.K.: *Advanced optimal tolerance design of mechanical assemblies with interrelated dimension chains and process precision limits*. *Computers in Industry* Volume: 56, Issue: 2, February, 2005, 179-194.

## THE OPTIMIZATION OF THE CONSTRUCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MODULE ASSEMBLY STAND

**Abstract.** *The article presents the methodology of the choice of the kinematic module industrial robot systems used in casting processes. The methodology makes possible of the accomplishment choice of the robot optimum configuration from point of view of the key process parameters, i.e. the volume of working space, the positioning accuracy, the working speed, energetics parameters, the surface area occupied by configured system, the service comforts and the construction complexity. Besides this method was used to elaborate the optimization model the assuring selection of parameters of dimension chain assembly operation, meringues superfluous enlarging the accuracy of applied instrumentation of stand, and in relationship from this also his costs.*

**Olaf CISZAK**Politechnika Poznańska  
Poznań**KOMPUTEROWO WSPOMAGANE MODELOWANIE I SYMULACJA ZROBOTYZOWANYCH  
STANOWISK PRODUKCYJNYCH****COMPUTER AIDED MODELING AND SIMULATION OF ROBOTIC CELLS**

Praca dotyczy komputerowego wspomagania programowania i symulacji pracy zrobotyzowanych stanowisk produkcyjnych realizowanych za pomocą współczesnych programów należących do grupy CAM (*ang. Computer Aided Manufacturing*). W pracy przedstawiono opracowany wirtualny model i wyniki badań symulacyjnych przykładowego zrobotyzowanego stanowiska do obróbki wstępnej części a w końcowej części wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań.

**WSTĘP**

Automatyzacja i robotyzacja wkracza do coraz większej liczby sektorów gospodarki, nie tylko do przemysłu maszynowego, spożywczego, ale i innych obszarów życia społecznego. Obecnie uważa się [4], że rozwój robotyki będzie polegał na rozszerzeniu zastosowań robotów do nowych obszarów pozaprzemysłowych, głównie w usługach i medycynie. Rosnące koszty pracy, wzrost konkurencyjności oraz ciągle poszukiwania redukcji kosztów inwestycyjnych, wzrostu elastyczności produkcji przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej powtarzalnej jakości końcowej wyrobów to podstawowe czynniki rozwoju automatyzacji i robotyzacji, która obejmuje już nie tylko pojedyncze stanowiska ale i całe linie produkcyjne. Według raportu z badań dotyczącego polskiego rynku robotów przemysłowych opublikowanego w [1] można, zauważyć powrót trendu wzrostowego popularności i zainteresowania wdrożeniem do praktyki przemysłowej rozwiązań z robotami przemysłowymi. Dotychczasowe podejście inwestorów ulega zmianie na rzecz rozwiązań z robotami przemysłowymi widząc w tego typu rozwiązaniach korzyści długookresowe.

Obecnie szacuje się, że w przypadku programowania obrabiarek sterowanych numerycznie, ponad 70% zadań opracowywanych jest za pomocą specjalistycznego oprogramowania CAM. Dla robotów przemysłowych te statystyki są znacznie gorsze, ponieważ tylko około 1-2% z nich jest programowanych w trybie *off-line*, czyli poza stanowiskiem produkcyjnym wyposażonym w robota przemysłowego z zastosowaniem nowoczesnych programów wspomagających te działania [5]. Powszechnie uważa się, że programowanie robotów jest znacznie trudniejsze niż maszyn obrabiarek CNC, ponieważ oprócz trajektorii ruchu należy także zaprogramować orientację narzędzia, którym manipuluje robot. Rozwój metod programowania trwa od momentu powstania pierwszych robotów aż po dzień dzisiejszy i powiązane jest bezpośrednio z rozwojem systemów sterowania i szeroko rozumianej elektroniki, języków programowania i komputerów. Znane metody opracowywania programów sterujących można podzielić na *off-* lub *on-line*, czyli potocznie na stanowisku lub w środowisku wirtualnym tj. poza stanowiskiem produkcyjnym bez przerywania jego pracy.

Stosując współczesne programy komputerowe do programowania robotów przemysłowych można uzyskać szybkie i dokładne generowanie programów sterujących, testować różne warianty organizacyjne stanowiska i scenariusze pracy przy zachowaniu możliwości łatwego i szybkiego wprowadzania poprawek z zachowaniem bezpieczeństwa testowania (np. wykrywanie kolizji) programu dzięki symulacji w środowisku wirtualnym.

## PROGRAMY WSPOMAGAJĄCE PROGRAMOWANIE ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH

Obecnie standardem jest oferta producentów robotów przemysłowych w zakresie specjalistycznych rozwiązań programowych, w tym dedykowanych do określonych aplikacji (np. spawania, malowania, paletyzacji, cięcia itd.) oprogramowania do komputerowego wspomagania programowania ich zadań (tab. 1).

Oprócz rozwiązań dedykowanych i specjalistycznych oferowanych przez producentów robotów na rynku jest wiele innych programów przeznaczonych do wspomagania programowania i symulacji ich pracy. Należą do nich: MASTERCAM, RobotMaster, Delmia Igrip, RobCAD, Robot 3D, Cosimir, Robot Works i inne.

Do podstawowych i niezaprzeczalnych zalet wszystkich wymienionych wyżej programów należy zaliczyć:

- opracowywanie (pisanie) programów w trybie *off-line*,
- symulację trajektorii ruchu (pracy) robota,
- weryfikację przestrzeni roboczej pracy robota,
- sprawdzenie występowania ewentualnych kolizji z otoczeniem,
- oszacowanie czasu trwania cykli,
- możliwość transmisji gotowych programów do układu sterowania robota i odwrotnie,
- biblioteki modeli robotów, przenośników, pozycjonerów i innych elementów wyposażenia techniczno-technologicznego wraz z możliwością importu z innych programów CAD,
- monitorowanie i symulację wejść i wyjść cyfrowych.

Podstawową zaletą zastosowania w praktyce przemysłowej programów do wspomagania programowania i symulacji jest eliminacja do minimum czasu przestoju stanowiska lub linii produkcyjnej, ponieważ im jest on krótszy, tym mniejszy jest jego negatywny wpływ na opłacalność produkcji. Przy okazji redukcji może ulec czas dostarczenia do odbiorcy zamówionego wyrobu.

*Tabela 1. Przykładowe programy wspomagające programowanie i symulacje pracy robotów przemysłowych (oferta producentów robotów przemysłowych)*

Producent robotów przemysłowych	Nazwa programu (pakietu)
Fanuc Robotics Inc.	<b>Roboguide</b> (HandlingPRO, WeldPRO, PAintPRO, PalletPRO)
Kawasaki Robotics Inc.	<b>PC-ROSET</b> (Material Handling, ArcWelding, Panting)
Panasonic-Matsushita Welding Systems Co. Ltd.	<b>DTPS 3D, G2 PC Tools 3D</b> (ARC Welding)
Kuka Roboter GmbH	<b>Kuka Sim Pro</b> (Arc.Tech, Bend.Tech, Conveyor.Tech, Glue.Tech, Laser.Tech, CAMRob, PalletPro, Plast.Tech, Se-am.Tech, ServoGun, TourchSense)
Motoman Robotics - Yaskawa Corp.	<b>MotoSim</b> (MotoCAL VEG, MotoPallet EG, MotoSize, Points Importer EG)
ABB Robotics Ltd.	<b>ABB RobotStudio</b> (Arc Welding, Die Casting, Plastic, Press Automation, Assembly, Packing, Spot Welding)
DENSO Robotics	<b>WINCAPS III</b>
Stäubli Robotics	<b>Stäubli Robotics Suite</b>
Reis Robotics GmbH	<b>ProSim</b>
Mitsubishi Robotics Corp.	<b>Melfa Works</b>

W warunkach przemysłowych bywa i tak, że wytwarzanie jednego rodzaju wyrobu musi być rozpoczęta jak najszybciej po ukończeniu produkcji innego, wskutek czego nie ma praktycznie czasu na przeprogramowanie robotów w trybie *on-line*. Konieczne jest, zatem zastosowanie programów do modelowania i symulacji pracy robotów przemysłowych, które pozwolą zmniejszyć i przyspieszyć tą operację.

### MODELOWANIE I SYMULACJA PRACY ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO W ŚRODOWISKU WIRTUALNYM

Praca w wirtualnym środowisku wymaga systematycznego postępowania tak aby uzyskać założone cele. Najczęściej takie postępowanie sprowadza się do realizacji następujących kroków [2, 3]:

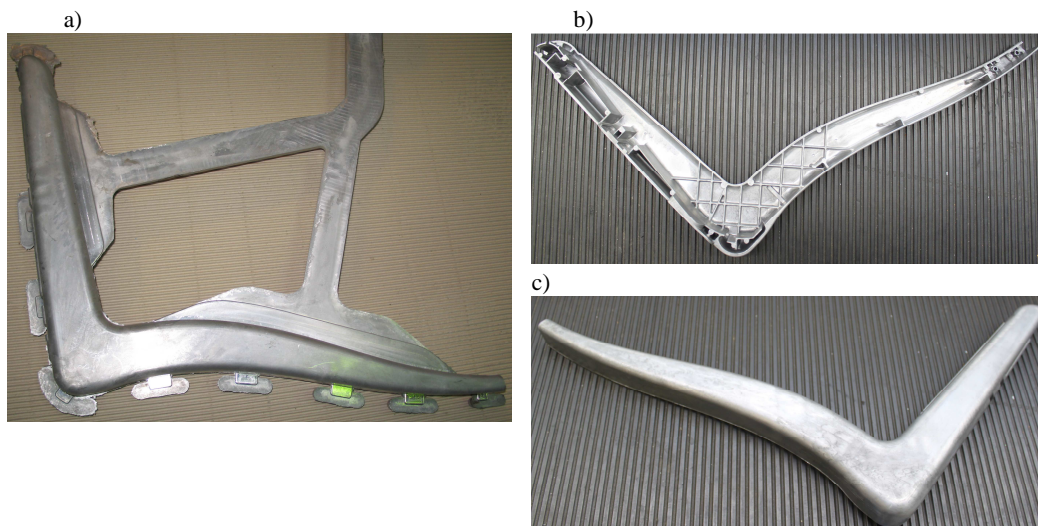
1. definicja projektu (aplikacji),
2. wybór modelu wirtualnego robota (z dostępnej biblioteki),
3. wybór rodzaju oprogramowania, w które wyposażony ma być układ sterowania (np. handling, welding, painting itd.),
4. wybór rodziny i typu robota dla którego będzie pisany program,
5. wybór wersji oprogramowania, w które wyposażony jest US RP (ten punkt jest istotny w przypadku późniejszego transferu programu do rzeczywistego US RP),
6. konfiguracja zewnętrznych osi (np. tory jezdne, pozycjonery),
7. konfiguracja opcji robota (np. język)
8. modelowanie wirtualnego środowiska stanowiska (*ang. layout*) - wybór i rozmieszczenie elementów i innego wyposażenia techniczno-technologicznego oraz bezpieczeństwa zrobotyzowanego stanowiska (z biblioteki elementów gotowych lub import z innego systemu CAD),
9. określenie i konfiguracja powiązań pomiędzy poszczególnymi elementami stanowiska,
10. pisanie programu – najczęściej za pomocą wirtualnego panelu programowania (*ang. teach pendant*) w pełni zgodnego z rzeczywistym.
11. testowanie i symulacja,
12. analiza i weryfikacja otrzymanych wyników.

### PRZYKŁAD MODELOWANIA I SYMULACJI ZROBOTYZOWANEGO STANOWISKA DO OBRÓBKİ CZĘŚCI

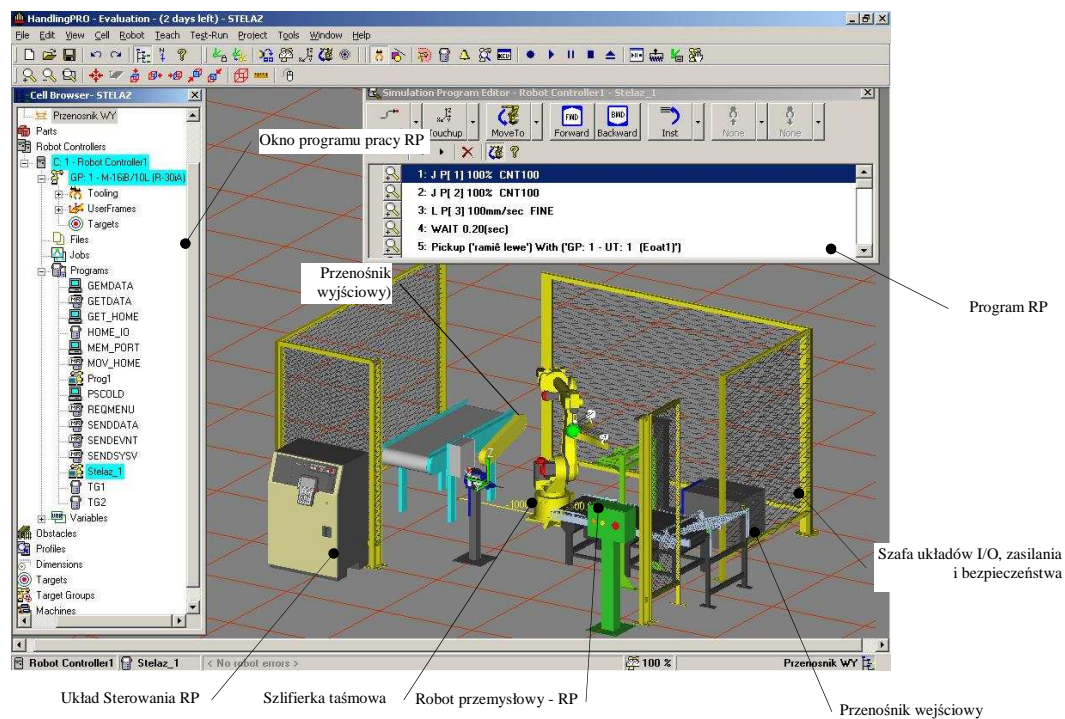
Proces obróbki wstępnej (np. gratowanie, szlifowanie, polerowanie) dla wybranego typu części wykonywany jest najczęściej przez pracownika ręcznie i wymaga skomplikowanych oraz skoordynowanych ruchów jego kończyn górnych. W projektowanym wirtualnym stanowisku planuje się zastosowanie robota przemysłowego, którego zadaniem będzie przejęcie od pracownika (jego wyeliminowanie) zadań trzymania i manipulowania obrabianą częścią podczas operacji obróbki. Dla tego typu zadań mogą być zastosowane współczesne roboty przemysłowe o liczbie ruchliwości równej 6 (tzw. roboty 6-cio osiowe), które spełniają wymagania pod względem ruchliwości, dokładności, powtarzalności i uzyskiwanych prędkości ruchów.

Poprawne zaprojektowanie zrobotyzowanego stanowiska do obróbki części w celu uzyskania oczekiwanych efektów ekonomicznych i wydajnościowych, wymaga przeprowadzenia badań symulacyjnych z uwzględnieniem zakładanych parametrów (np. czasu trwania operacji, ruchów roboczych i jałowych - szybkich ruchów przestawczych manipulatora) oraz uwzględnienia możliwych zakłóceń np. awarii, przestojów i przerw w trakcie realizacji procesu.

Modelowanie i symulację pracy wydzielonego organizacyjnie stanowiska do obróbki części (rys. 1) wykonano z zastosowaniem oprogramowania wspomagającego programowanie robotów w trybie offline RoboGuide v 6.4 firmy Fanuc Ltd [3]. Głównym celem modelowania i symulacji pracy stanowiska jest analiza porównawcza opracowanych modeli symulacyjnych z aktualnie realizowanym procesem obróbki. Zaprojektowany wirtualny model zrobotyzowanego stanowiska do obróbki części przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Półfabrykat stelaża siedzenia pasażerskiego: a) po operacji odlewania ciśnieniowego, b-c) po odcięciu układu wlewowego i wypływek przeznaczony do obróbki

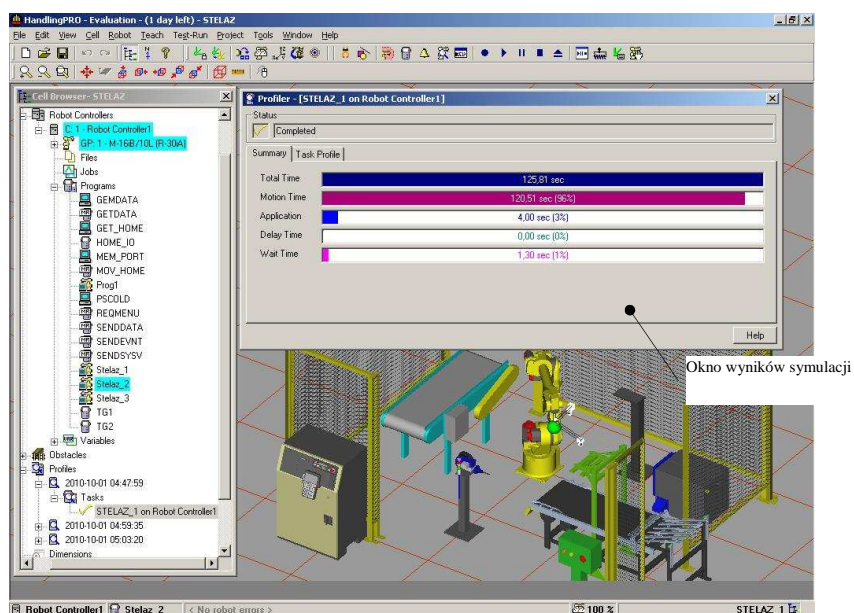


Rys. 2. Model zrobotyzowanego stanowiska do obróbki części opracowany w programie RoboGuide v6.4 firmy FANUC Ltd.

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych przyjęto następujące założenia:

- stanowisko wyposażone jest w 6-cio osiowego robota przemysłowego FANUC M16iB/10L o udźwigu 10 kg i dokładności pozycjonowania  $\pm 0,1$  mm z układem sterowania R30iA,
- prędkości ruchów dla punktu TCP narzędzia:
  - roboczych: 3,5 m/min (2 % prędkości maksymalnej)
  - jałowych: 15 m/min (8 % prędkości maksymalnej),
  - przestawczych: 100 % prędkości maksymalnej,
- części do i po obróbce są transportowane za pomocą przenośników taśmowych.

Wyniki z przeprowadzonych symulacji (rys. 3) według wybranego wariantu konfiguracyjnego dla kilku możliwych scenariuszy (programów pracy robota) procesu obróbki wstępnej części przedstawiono zbiorczo w tabeli 2. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że zastosowanie robota przemysłowego, niezależnie od scenariusza przebiegu procesu obróbki wstępnej dla jednego cyklu pracy stanowiska wynosi średnio około 2 min a dla stanowiska testowego (rys. 4) ok. 2,2 min. Uzyskane wyniki z badań symulacyjnych i testowych potwierdzają możliwość zastosowania robota przemysłowego, który będzie bardziej wydajny niż pracownik wykonujący operacje obróbki ręcznie trwającej średnio w przedziale od 3 – 4 minut w zależności od zdolności manualnych i predyspozycji.



Rys. 3. Okno programu RoboGuide po wykonaniu symulacji dla 1 cyklu pracy stanowiska

Tabela 2. Wyniki symulacji procesu obróbki wstępnej części (wartości średnie dla 10-ciu powtórzeń symulacji)

Numer scenariusza (programu robota)	Całkowity czas cyklu pracy stanowiska [s]
1	160,34
2	125,81
3	127,54
4	126,67
5	128,37



Rys. 4. Zrobotyzowane stanowisko do badań testowych w Laboratorium Podstaw Robotyzacji ZPT IMt PP

## PODSUMOWANIE

Przedmiotem opisywanych badań było uzyskanie odpowiedzi dotyczącej celowości zastosowania komputerowego wspomagania programowania robotów przemysłowych. Jak wynika z przeprowadzonych wstępnych badań symulacyjnych i testowych zastosowanie programowania w środowisku wirtualnym w znaczny sposób skraca czas przygotowania programu pracy robota i wydatnie wpływa na podniesienie efektywności produkcji, co powinno przynieść oczekiwane efekty ekonomiczne i jakościowe oraz przyczynić się do podniesienia jakości końcowej wyrobu, a na etapie projektowania pozwoli wybrać najkorzystniejszy wariant organizacyjny i konfiguracyjny. Ponadto należy stwierdzić, że zastosowanie programów do komputerowego wspomagania programowania i symulacji pracy robotów i stanowisk zrobotyzowanych w znaczny sposób ułatwiają podjęcie decyzji o planowanej inwestycji.

## LITERATURA

1. Cieniak I., Roboty w ruch. Polski rynek robotów przemysłowych. Raport. Control Engineering Polska, 1-2.2010, s. 24-33
2. Dokumentacja programu Roboguide firmy Fanuc Robotics Co., Ltd., Japan, 2007.
3. Podręcznik Programowania - Roboguide. Fanuc Robotics Co., Ltd., Japan, 2007.
4. Wyręczyć człowieka. Nowy Przemysł - Specjalista, nr 1, 2005, s. 3-6.
5. Zalewski A. Nowa jakość w programowaniu robotów przemysłowych. Biuletyn Automatyki, nr 3 (65), Kraków, 2010, s. 10-11.
6. Zdanowicz R., Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania. WPŚ, Gliwice 2002.

## COMPUTER AIDED MODELING AND SIMULATION OF ROBOTIC CELLS

**Abstract.** *The paper presents the issue of modeling and simulation of the computer aided programming and simulation of robotic cells using today's CAM (Computer Aided Manufacturing) programs. The developed virtual model and the experimental results of simulation the robotic pretreatment cell are presented. The final part of the paper presents the results and conclusions from conducted tests and analyses.*