

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 658.512.2:621.9.06

Н.Н. Гущинский, Б.М. Розин

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУППЫ ДЕТАЛЕЙ
НА МНОГОПОЗИЦИОННОМ ПОВОРОТНОМ СТОЛЕ
АГРЕГАТНОГО СТАНКА**

Рассматривается задача минимизации массы агрегатного станка с многопозиционным поворотным столом за счет размещения каждой детали группы на столе при их групповой последовательно-параллельной обработке. Предлагаются математическая модель и эвристический алгоритм «роя частиц» для решения данной задачи. Приводятся результаты численных экспериментов по решению предложенным методом задач этого типа.

Введение

В условиях современного производства агрегатные станки (АС) все чаще используются для серийного выпуска группы деталей. Проектирование компоновочных схем современных АС, компонованных по блочно-модульному принципу при заданных структуре и параметрах группового технологического процесса (ГТП) обработки группы деталей, заключается в определении состава, типоразмеров основных силовых и корпусных узлов, а также параметров их взаимного расположения. Жесткие требования к срокам выпуска новой продукции, диктуемые рынком, стимулируют широкое применение средств автоматизации проектирования станочного оборудования. Решению задач автоматизации выбора компоновок различных типов станков, в том числе АС, посвящен ряд публикаций [1–7].

В работах [4–6] описана разработанная в ОИПИ НАН Беларуси подсистема «Компоновка» программного комплекса «Агрегат», предназначенная для автоматизации построения компоновок АС при серийной обработке однородных партий деталей, формируемых по блочно-модульному принципу нескольких компоновочных схем с приспособлением для установки деталей на многопозиционных поворотных столах, однопозиционных стационарных и двухпозиционных передвижных столах. Формирование компоновки при помощи этой подсистемы осуществляется в автоматизированном режиме с учетом информации о структуре и параметрах ГТП, положении обрабатываемой детали на виртуальном приспособлении АС выбранного типа, а также данных об основных параметрах приспособления и инструментальной наладки. Для полученного варианта компоновки АС определяются его цена, масса, высота и занимаемая площадь.

Кроме структуры и параметров ГТП, существенное влияние на формируемую компоновку АС оказывает расположение обрабатываемых деталей на позициях обработки АС. Типоразмеры ряда унифицированных узлов и сборочных единиц АС (например, многшпиндельных коробок, силовых и крестовых столов, на которых размещаются эти коробки и силовые бабки) либо размеры оригинальных узлов (центральных и боковых станин, стоек и подставок), как правило, существенно зависят от размещения на приспособлении обрабатываемых деталей [6, 7].

Для построения рационального варианта компоновки АС в ручном режиме пользователю необходимо устанавливать на загрузочной позиции стола 3D-модели группы деталей и проводить расчеты многократно. При этом не гарантируется построение даже допустимой компоновки. На поиск же оптимальной (по выбранному критерию оптимальности) компоновки может потребоваться значительное время. В работе [7] для задачи синтеза оптимальной компоновки АС с поворотным столом для обработки однородной партии деталей был предложен метод «роя частиц». В качестве критерия оптимальности использовалась минимальная масса АС.

В настоящей работе этот метод распространен на более сложную задачу оптимизации компоновочной схемы АС с поворотным столом для обработки группы различных деталей.

1. Постановка задачи

Рассматривается задача оптимизации компоновки АС с поворотным столом для обработки группы деталей нескольких наименований посредством выбора расположения этих деталей на приспособлении АС. Особенности данной задачи по сравнению с аналогичной задачей оптимизации размещения одной детали на загрузочной позиции АС для процессов обработки однородных партий деталей следующие (см. [7]): необходимость формирования для каждой рабочей позиции силовых сборочных единиц, выполняющих обработку нескольких деталей группы различными блоками инструментов; координация размещения различных деталей на позиции с учетом обработки некоторых конструктивных элементов (отверстий, поверхностей) различных деталей одним инструментом.

Исходными данными для формирования варианта компоновки АС в подсистеме «Компоновка» наряду с параметрами ГТП являются параметры размещения с использованием графической системы на загрузочной позиции виртуального приспособления 3D-моделей каждой из деталей группы, а также начальные значения длины базы инструментов силовых узлов и длины съема инструментов, задаваемые проектантом в режиме диалога.

Формирование варианта компоновки АС, выполняющего заданный технологический процесс обработки группы деталей, осуществляется по следующей схеме:

- размещение 3D-моделей группы деталей на виртуальном приспособлении с одновременным определением соответствующих габаритных размеров приспособления (планшайбы поворотного стола) и центральной станины;
- задание начальных значений длин баз инструментов силовых узлов и длины съема инструментов;
- формирование вариантов компоновки выполняющих обработку боковых приставок;
- построение графической 3D-модели станка для выбранного варианта компоновки;
- размещение дополнительного оборудования АС;
- расчет характеристик АС;
- документирование результатов компоновки.

Далее ограничимся рассмотрением АС с приспособлением на многопозиционном поворотном делительном столе с вертикальной осью вращения и числом боковых приставок до пяти, предназначенного для обработки группы деталей n различных наименований (рис. 1).

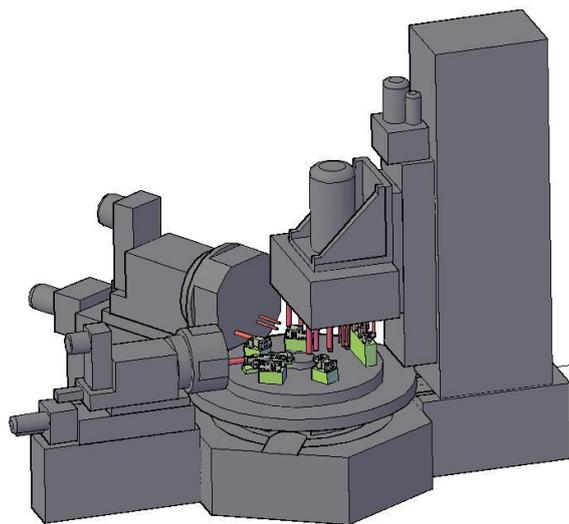


Рис. 1. АС с поворотным столом для параллельной обработки группы деталей

Следует отметить, что аналогичные задачи возникают и для АС других типов: стационарных станков, станков с приспособлением на передвижном столе и др. Из перечисленных типов АС рассматриваемый здесь тип станка представляется наиболее сложным по структуре

ограничений задачи, что делает его наиболее подходящим для исследования задачи оптимизации его компоновки.

Рассматриваемый АС с приспособлением на поворотном столе состоит из центральной станины с поворотным столом для размещения и закрепления обрабатываемых деталей и боковых приставок, осуществляющих их обработку. Для таких АС предусмотрено использование одногранных (четырехгранных с одной обработанной гранью, предназначенной для установки приставки), четырехгранных, шестигранных или восьмигранных типовых средних станин под поворотный стол. Наибольшее число боковых приставок для таких средних станин не превышает пяти.

Среди боковых приставок могут быть вертикальные и (или) горизонтальные приставки с соответственно вертикально либо горизонтально ориентированными силовыми или крестовыми столами и установленными на них силовыми бабками и многошпиндельными коробками. Предполагается, что обработка деталей группы может осуществляться в направлении осей Oz , Oy и Ox системы координат АС. В первом случае выполняется либо обработка отверстий детали в горизонтальной плоскости вертикально ориентированными стержневыми инструментами, либо фрезерование боковой плоскости фрезерной бабкой, установленными на вертикальном силовом столе. Во втором случае осуществляется либо фрезерование горизонтальной поверхности, либо сверление, растачивание, зенкерование и т. п. отверстий сбоку (соответствующими силовыми узлами, установленными на горизонтальном силовом столе). Для оси Ox выполняется фрезерование боковой поверхности фрезерной бабкой, установленной на поперечно ориентированном горизонтальном силовом столе.

Существует два типа боковых приставок. Первый тип составляют горизонтальные либо вертикальные приставки, предназначенные для обработки деталей группы (сбоку либо сверху) на одной позиции поворотного стола, второй – вертикальные приставки, предназначенные для вертикальной параллельной обработки сверху деталей группы на нескольких позициях стола. Заданы число позиций поворотного стола (вообще говоря, не совпадающее с числом граней центральной станины) и количество приставок каждого типа. Для приставок первого типа, выполняющих обработку деталей на соответствующих позициях, заданы номера граней средней станины для их размещения. Для АС этого типа расположение обрабатываемых деталей в плоскости стола существенно влияет на типоразмеры выбираемых узлов, в особенности узлов боковых приставок второго типа.

Боковые приставки второго типа (для параллельной обработки на нескольких позициях сверху) могут быть размещены на любой из предусмотренных для этого граней центральной станины АС, не занятых приставками первого типа.

В процессе поиска варианта компоновки в режиме диалога пользователем задается толщина литья каждой шпиндельной коробки, необходимая для определения ее типоразмеров для установки на соответствующем силовом столе. Основные же компоновочные параметры виртуального приспособления для размещения деталей на плоскости поворотного стола (диаметр планшайбы поворотного стола, диаметр приспособления, значения длины базы инструментов) АС определяются автоматически.

При формировании варианта компоновки учитываются характерные для рассматриваемого типа АС технологические, конструктивные и эргономические ограничения. Эти ограничения можно разделить на три группы: компоновочные, конструктивно-технологические и ограничения на размещение зажимного приспособления детали на загрузочной позиции.

Компоновочные ограничения распространяются на взаимное расположение узлов каждой приставки и узлов различных приставок между собой и связаны с обеспечением реализуемости компоновочной схемы.

К конструктивно-технологическим относятся, в частности, ограничения на минимальные межшпиндельные расстояния каждой многошпиндельной коробки (расстояния между осями пары шпинделей в плоскости, ортогональной их осям), на размещение осей шпинделей относительно границ габаритных размеров литья шпиндельной коробки и относительно направляющих кондукторной плиты [7], на параметры инструментов (например, диаметр фрезы) при обработке одним инструментом семейства элементов (фрезеруемых поверхностей) различных деталей, а также на расположение этих элементов.

Третья группа включает ограничения невыхода виртуального зажимного приспособления детали за границы сектора позиции поворотного стола. Более подробно ограничения первой и второй группы описаны в работах [4, 7].

Перечислим более детально конструктивные ограничения, учитываемые при выборе габаритов шпиндельной коробки:

- межшпиндельное расстояние должно превышать минимально допустимое, зависящее от параметров (усилий, угловых скоростей) выполняемых соответствующими инструментами технологических переходов;

- расстояния от оси шпинделя до краев литья коробки и до направляющих втулок комплектов деталей для крепления штанг кондукторных плит должны превышать заданные табличные значения [7];

- значения параметров (высоты и ширины) коробки выбираются из ряда пар типовых величин, соответствующих ее возможным типоразмерам.

Замечание. Следует обратить внимание на существенное различие влияния ограничений на минимальное межшпиндельное расстояние для шпинделей шпиндельной коробки, выполняющих обработку одной детали, и для шпинделей, обрабатывающих различные детали на одной либо различных позициях. Для первого случая нарушение такого ограничения хотя бы для одной пары шпинделей коробки приводит к ее нереализуемости (для заданной структуры технологического процесса), поскольку межшпиндельное расстояние определяется расположением осей отверстий на плоскости детали и параметрами соответствующих технологических переходов. Для второго случая межшпиндельные расстояния могут быть увеличены за счет изменения взаимного расположения деталей на столе.

Снижение массы станка достигается за счет уменьшения масс составляющих его узлов или, что эквивалентно, уменьшения их типоразмеров, существенно зависящих от расположения на станке каждой из деталей группы. При этом, основываясь на опыте разработки соответствующего семейства металлообрабатывающих АС, предполагается, что изменение типоразмеров узлов в заданном диапазоне не приводит к снижению точности и надежности обработки. Размещение на загрузочной позиции АС каждой детали группы при заданной ее ориентации однозначно определяется координатами начала связанной с деталью локальной системы координат (ЛСК) в системе координат АС, начало которой совмещено с центром поворотного стола.

Рассматриваемая в настоящей работе задача сводится к нахождению допустимых значений координат начал ЛСК каждой обрабатываемой детали группы на загрузочной позиции поворотного стола с вертикальной осью вращения, а также выбору граней средней станины для установки боковых приставок второго типа и длин баз инструментов силовых узлов, определяющих вариант компоновки АС с минимальной массой.

Предлагаемый ниже подход может быть использован также для разработки методов решения аналогичных задач для других типов АС.

2. Математическая модель

Предполагается, что начало трехмерной системы координат АС (правой декартовой) совмещено с центром поворотного стола, ее ось Oz является нормалью к плоскости поворотного стола, а ось Oy направлена вдоль биссектрисы внешнего угла сектора загрузочной позиции. Предполагается также, что расположение ЛСК каждой детали на загрузочной позиции АС отличается от расположения системы координат АС только координатами ее начала. Обработка деталей группы может осуществляться на каждой из позиций станка соответствующей боковой приставкой посредством многошпиндельной коробки либо набором силовых бабок, установленных на вертикальном либо горизонтальном силовом столе.

Введем необходимые в дальнейшем обозначения:

$x_{лск}^i, y_{лск}^i, z_{лск}^i$ – координаты начала ЛСК i -й детали, расположенной на загрузочной позиции, в системе координат АС;

$N_{поз}$ – число позиций АС, включая загрузочную;

$N_{гр}$ – число граней средней станины;

N_1, N_2 – числа боковых приставок первого и второго типа соответственно;

$\aleph = \{n_1, n_2, \dots, n_{N_1}\}$ – номера граней, занятых приставками первого типа;

$Q = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_\theta\}$ – номера свободных граней средней станины для размещения боковых приставок второго типа, $\theta = N_{cp} - N_1$, $\theta \geq N_2$;

q_r – номер грани средней станины для размещения r -й боковой приставки второго типа, $q_r \in Q$;

\bar{Q} – множество значений вектора $q = (q_1, q_2, \dots, q_{N_2})$, взаимно-однозначно сопоставляющего номерам $r \in \{1, 2, \dots, N_2\}$ боковых приставок второго типа номера $q_r \in Q$ свободных граней средней станины;

$N_{конт}^i$ – число точек излома кусочно-линейной ломаной, описывающей контур i -й детали (либо ее зажимное приспособление);

$\Delta_{xi}^l, \Delta_{yi}^l$ – координаты l -й точки контура i -й детали в плоскости Oxy ЛСК детали, $l = 1, 2, \dots, N_{конт}^i$;

$(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ – вектор координат начал ЛСК всех деталей в системе координат АС, где $X_{лск} = (x_{лск}^1, x_{лск}^2, \dots, x_{лск}^n)$, $Y_{лск} = (y_{лск}^1, y_{лск}^2, \dots, y_{лск}^n)$, $Z_{лск} = (z_{лск}^1, z_{лск}^2, \dots, z_{лск}^n)$ – векторы координат начал ЛСК всех деталей по осям Ox, Oy, Oz системы координат АС соответственно;

b_k – длина базы инструментов силового узла k -й боковой приставки, $k = 1, 2, \dots, N_1 + N_2$;

$[\underline{b}_k, \bar{b}_k]$ – интервал возможных значений длины базы инструментов k -й боковой приставки, $k = 1, 2, \dots, N_1 + N_2$;

$m_{np}^k(b_k, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}))$ – масса k -й боковой приставки первого типа, $k = 1, 2, \dots, N_1$;

$m_{np}^r(q_r, b_r, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}))$ – масса r -й боковой приставки второго типа, $r = 1, 2, \dots, N_2$;

$m_{cp}(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ – масса средней станины АС;

$m_{пов}(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ – масса поворотного стола АС.

В рассматриваемой задаче управляемыми переменными являются вектор $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ координат начал ЛСК деталей в системе координат АС, вектор $q = (q_1, q_2, \dots, q_{N_2})$ номеров q_r , $r = 1, \dots, N_2$, граней центральной станины для установки соответствующих вертикальных боковых приставок второго типа (для параллельной обработки сверху) и вектор $b = (b_1, b_2, \dots, b_{N_1 + N_2})$ длин баз инструментов боковых приставок.

Далее описываются наиболее существенные ограничения, которым в реальных проектных ситуациях должны удовлетворять векторы $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ координат ЛСК деталей при их размещении, а также векторы q и b .

Характерной особенностью ГТП является обработка одним и тем же инструментом элементов различных деталей группы. В этом случае размещение деталей группы должно координироваться в системе координат станка. Такая координация может быть определена посредством задания начальных положений $(x_{лск}^i(0), y_{лск}^i(0), z_{лск}^i(0))$ ЛСК деталей $i = 1, 2, \dots, n$ в системе координат АС, удовлетворяющих условиям этой координации. Тогда координация отдельных деталей группы в связи с обработкой некоторых их элементов одним инструментом может быть задана системой равенств:

$$x_{лск}^i - x_{лск}^j = x_{лск}^i(0) - x_{лск}^j(0), (i, j) \in I_x; \quad (1)$$

$$y_{лск}^i - y_{лск}^j = y_{лск}^i(0) - y_{лск}^j(0), (i, j) \in I_y; \quad (2)$$

$$z_{лск}^i - z_{лск}^j = z_{лск}^i(0) - z_{лск}^j(0), (i, j) \in I_z, \quad (3)$$

где I_x, I_y и I_z – множества пар номеров деталей i и j , которые должны быть скоординированы по x, y и z соответственно.

В частности, для операции фрезерования координаты y центров фрезеруемых боковых поверхностей и координаты z центров этих поверхностей при фрезеровании горизонтальных

поверхностей должны совпадать. Кроме того, размеры фрезеруемых поверхностей также должны быть скоординированы.

Пусть P – семейство множеств $P_j = \{p_1, p_2, \dots, p_{k_j}\}, j = 1, 2, \dots, |P|$, переходов фрезерования, выполняемых одной и той же фрезой с диаметром d_j . Каждый переход $p_l, l=1, \dots, k_j$, характеризуется набором $(i(p_l), x(p_l), y(p_l), z(p_l), \lambda(p_l), w(p_l))$, где $i(p_l)$ – номер детали, содержащей элемент, обрабатываемый в рамках перехода p_l ; $x(p_l), y(p_l), z(p_l)$ – координаты центра обрабатываемого элемента в ЛСК детали; $\lambda(p_l)$ – длина фрезерования и $w(p_l)$ – ширина фрезерования. Рассматриваются случаи, когда возможна обработка фрезерованием горизонтальных поверхностей горизонтальным столом, а также аналогичная обработка боковых поверхностей вертикальным или горизонтальным столом. В первых двух случаях диаметр фрезы не может быть меньше максимальной разницы координат x обрабатываемых элементов различных деталей, а в третьем случае – максимальной разницы координат z . Это может быть обеспечено при выполнении следующих соотношений:

$$\max\{x_{лск}^{i(p_l)} + x(p_l) + w(p_l) / 2 | l=1, \dots, k_j\} - \min\{x_{лск}^{i(p_l)} + x(p_l) - w(p_l) / 2 | l=1, \dots, k_j\} \leq d_j, \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P^x;$$

$$\max\{z_{лск}^{i(p_l)} + z(p_l) + w(p_l) / 2 | l=1, \dots, k_j\} - \min\{z_{лск}^{i(p_l)} + z(p_l) - w(p_l) / 2 | l=1, \dots, k_j\} \leq d_j, \quad (5)$$

$$j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P^z,$$

где P^x – подсемейство из P , соответствующее первым двум случаям обработки, а P^z – третьему случаю. При этом предполагается, что необходимая длина фрезерования $\lambda(p_l)$ будет обеспечиваться за счет быстрого подвода соответствующих силовых узлов.

Размещение деталей (зажимных приспособлений) в пределах сектора загрузочной позиции обеспечивается следующими соотношениями:

$$y_{лск}^i + \Delta_{yi}^l - (x_{лск}^i + \Delta_{xi}^l) \cdot \operatorname{tg}(\pi / N_{поз}) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, N_{конт}^i, i = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$y_{лск}^i + \Delta_{yi}^l + (x_{лск}^i + \Delta_{xi}^l) \cdot \operatorname{tg}(\pi / N_{поз}) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, N_{конт}^i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Система ограничений для выбора совокупности узлов боковой приставки первого либо второго типа соответственно может быть задана следующим образом:

$$\Omega_k(b_k, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) \leq 0, \quad k = 1, \dots, N_1; \quad (8)$$

$$\Omega_r(q_r, b_r, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) \leq 0, \quad r = 1, \dots, N_2, \quad (9)$$

где Ω_k, Ω_r – вектор-функции и правые части неравенств также являются векторами соответствующей левой части размерности с нулевыми компонентами.

В состав ограничений (8), (9) входят (при фиксированной структуре, параметрах ГТП и параметрах приспособления) ограничения на выбор из базы данных узлов АС (силовых бабок, шпиндельных коробок, угольников, силовых и крестовых столов, стоек, подставок, боковых станин). Эти ограничения связаны с необходимостью обеспечения при выборе силового узла требуемых в процессе обработки усилия, мощности привода, крутящего момента, величины рабочего хода, длины съема инструментов, минимальных межцентровых расстояний пар шпинделей и др. [4]. Пример системы таких ограничений для выбора многошпиндельной коробки боковой приставки второго типа приведен в работе [7].

Если множество реализаций (допустимых компоновок) боковой приставки k первого типа либо приставки r второго типа, описываемое каким-либо ограничением (8) либо (9), пусто, то полагается $m_{np}^k(b_k, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) = \infty$ либо $m_{np}^r(q_r, b_r, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) = \infty$ соответственно.

Кроме описанных выше ограничений на выбор узлов и сборочных единиц боковых приставок по отдельности, компоновка АС должна удовлетворять ряду ограничений, задаваемых алгоритмически и связанных с взаимодействием узлов различных приставок между собой

и с приспособлением [4]. В частности, к таким ограничениям относится запрет на взаимное пересечение 3D-моделей узлов и сборочных единиц соседних боковых приставок в их положении в конце обработки. В дальнейшем для сокращения изложения описываемое этими ограничениями множество допустимых значений вектора координат $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ начал ЛСК деталей группы на загрузочной позиции приспособления для фиксированного вектора $q = (q_1, q_2, \dots, q_{N_2})$ номеров граней вертикальных боковых приставок второго типа и вектора $b = (b_1, b_2, \dots, b_{N_1+N_2})$ длин баз инструментов будем обозначать $G(q, b)$:

$$(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}) \in G(q, b). \quad (10)$$

Номера q_r граней средней станины для вертикальных боковых приставок $r = 1, 2, \dots, N_2$ второго типа выбираются из множества номеров свободных граней:

$$q \in \bar{Q}. \quad (11)$$

Компоненты b_k вектора b баз инструментов боковых приставок должны принимать значения из заданных диапазонов:

$$b \in \mathbf{B} = \prod_{k=1}^{N_1+N_2} [b_k, \bar{b}_k]. \quad (12)$$

Масса $F(q, b, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}))$ АС представляет собой сумму масс средней станины $m_{ср}(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$, поворотного стола $m_{нов}(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$, боковых приставок первого типа $m_{пр}^k(b_k, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}))$, $k = 1, 2, \dots, N_1$, боковых приставок второго типа $m_{пр}^r(q_r, b_r, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}))$, $r = 1, 2, \dots, N_2$, и вспомогательного оборудования. Поскольку состав вспомогательного оборудования не зависит от векторов $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$, q , b , его масса в дальнейшем без ограничения общности не учитывается.

Таким образом, задача заключается в выборе векторов $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$, q и b , удовлетворяющих ограничениям (1)–(12) и минимизирующих массу АС:

$$F(q, b, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) = \sum_{k=1}^{N_1} m_{пр}^k(b_k, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) + \sum_{r=1}^{N_2} m_{пр}^r(q_r, b_r, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) + m_{ср}(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}) + m_{нов}(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}) \rightarrow \min. \quad (13)$$

Если система ограничений (1)–(12) несовместна, то полагается $F(q, b, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})) = \infty$.

3. Метод решения

Система ограничений задачи (1)–(12) на допустимые значения векторов $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ непрерывных переменных координат начал ЛСК группы обрабатываемых деталей и b значений баз инструментов, а также целочисленных переменных q_r номеров граней для размещения приставок второго типа $r = 1, \dots, N_2$ состоит из линейных либо сводящихся к линейным ограничений (1)–(3), (4)–(7), (12), условий целочисленности переменных (11) и заданных алгоритмически ограничений (8)–(10). Значения целевой функции $F(q, b, (X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск}))$ вычисляются алгоритмически. Можно показать, что даже только ограничения на межшпиндельные расстояния при выборе шпиндельной коробки боковой приставки второго типа порождают невыпуклую область допустимых положений деталей [7]. Таким образом, в общем случае задача (1)–(13) является сложной многоэкстремальной задачей.

Для таких задач наиболее подходящими методами решения традиционно являются эвристики и метаэвристики [8], а также методы зондирования области поиска с использованием ЛП-последовательностей (ЛП) и случайного поиска (СП) [9, 10]. Среди метаэвристик перспективными представляются метод «роя частиц» (PSO – Particle Swarm Optimization Algorithm), генетические алгоритмы, алгоритм имитации отжига, нейронные сети.

В работе для исследования был выбран PSO – эвристический метод численной оптимизации, не требующий специальных свойств оптимизируемой функции. Этот метод нашел применение в большом количестве областей [11], в частности он хорошо зарекомендовал себя при

решении задач, аналогичных исследуемой в настоящей работе [7, 12, 13]. PSO оптимизирует целевую функцию, поддерживая популяцию возможных решений, называемых частицами, и перемещая эти частицы в области поиска решений согласно итеративно вычисляемой простой формуле. Перемещения частиц учитывают наилучшее найденное в этой области положение, которое изменяется от итерации к итерации при нахождении частицами более выгодных положений. Ниже приведен алгоритм решения рассматриваемой задачи, основанный на методе PSO.

Введем следующие обозначения:

m – число частиц роя в популяции;

$F(q^\gamma, b^\gamma, (X_{лск}^\gamma, Y_{лск}^\gamma, Z_{лск}^\gamma))$ – значение целевой функции (масса АС) для γ -й частицы, $\gamma = 1, 2, \dots, m$, при размещении $q^\gamma \in \bar{Q}$ боковых приставок второго типа на гранях Q и фиксированном векторе $b^\gamma \in \mathbf{B}$ длин баз инструментов;

$\bar{p}^\gamma = (\bar{X}^\gamma, \bar{Y}^\gamma, \bar{Z}^\gamma)$ – положение γ -й частицы, в котором целевая функция принимает наименьшее значение среди всех ее значений для γ -й частицы, рассмотренных к моменту текущей итерации алгоритма, $\gamma = 1, 2, \dots, m$;

$\tilde{q}^\gamma = (\tilde{q}^{\gamma 1}, \tilde{q}^{\gamma 2}, \dots, \tilde{q}^{\gamma N_2})$ – номера граней, на которых достигается наименьшее значение целевой функции в точке \bar{p}^γ ;

$\tilde{b}^\gamma = (\tilde{b}^{\gamma 1}, \tilde{b}^{\gamma 2}, \dots, \tilde{b}^{\gamma N_1+N_2})$ – длины баз инструментов, на которых достигается наименьшее значение целевой функции в точке \bar{p}^γ ;

$g = (\hat{X}^{\gamma*}, \hat{Y}^{\gamma*}, \hat{Z}^{\gamma*})$ – положение частицы роя γ^* , в котором целевая функция принимает наименьшее значение среди всех ее значений для всех частиц $\gamma \in \{1, 2, \dots, m\}$, рассмотренных к моменту текущей итерации алгоритма;

$q^g = (q^1, q^2, \dots, q^{N_2})$ – номера граней, на которых достигается наименьшее значение целевой функции для точки g ;

$b^g = (b^1, b^2, \dots, b^{N_1+N_2})$ – длины баз инструментов, на которых достигается наименьшее значение целевой функции для точки g ;

R_x – множество «свободных» координат x частицы, $R_x = \{i \in \{1, 2, \dots, n\} | (i, j) \notin I_x\}$;

R_y – множество «свободных» координат y частицы, $R_y = \{i \in \{1, 2, \dots, n\} | (i, j) \notin I_y\}$;

R_z – множество «свободных» координат z частицы, $R_z = \{i \in \{1, 2, \dots, n\} | (i, j) \notin I_z\}$;

$v^\gamma = ((v_{x_i}^\gamma | i_x \in R_x), (v_{y_j}^\gamma | i_y \in R_y), (v_{z_k}^\gamma | i_z \in R_z))$ – вектор смещения γ -й частицы (ее скорость), $\gamma = 1, 2, \dots, m$;

ω – коэффициент, учитывающий влияние на вектор смещения его значения на предыдущем шаге (инерция);

ϕ_p – коэффициент влияния лучшего положения отдельно взятой частицы γ на ее вектор смещения (не зависит от индекса γ);

ϕ_g – коэффициент влияния наилучшего найденного положения g среди всех частиц роя на вектор смещения каждой из них;

r_p, r_g – вспомогательные коэффициенты, рассматриваемые как равномерно распределенные на интервале $[0, 1]$ случайные величины;

$\bar{\eta}$ – предельное число итераций алгоритма;

T_{CPU} – процессорное время работы алгоритма, с;

\bar{T}_{CPU} – максимально допустимое время работы алгоритма, с;

$[x_{\min}^i, x_{\max}^i]$ – отрезки возможных значений $X_{лск}^\gamma, i = 1, 2, \dots, n, \gamma = 1, 2, \dots, m$;

$[y_{\min}^i, y_{\max}^i]$ – отрезки возможных значений $Y_{лск}^\gamma, i = 1, 2, \dots, n, \gamma = 1, 2, \dots, m$;

$[z_{\min}^i, z_{\max}^i]$ – отрезки возможных значений $Z_{лск}^\gamma, i = 1, 2, \dots, n, \gamma = 1, 2, \dots, m$.

Прямое произведение отрезков $[x_{\min}^i, x_{\max}^i] \times [y_{\min}^i, y_{\max}^i]$ должно включать все возможные значения координат начал ЛСК, для которых координаты $x_i^y + \Delta_{xi}^l, y_i^y + \Delta_{yi}^l$ всех точек контура i -й детали содержатся внутри сектора загрузочной позиции поворотного стола, $i = 1, 2, \dots, n$, $l = 1, 2, \dots, N_{\text{конт}}$. Отрезки $[z_{\min}^i, z_{\max}^i]$ определяются пределами допустимой высоты приспособления для детали.

Сокращение размеров отрезков $[x_{\min}^i, x_{\max}^i], [y_{\min}^i, y_{\max}^i]$, определяющих пространство поиска, позволяет повысить эффективность алгоритма решения задачи. Определение этих отрезков зависит от числа $N_{\text{поз}}$ позиций поворотного стола АС, координат $\Delta_{xi}^l, \Delta_{yi}^l$ точек контура i -й детали в ЛСК детали, $l = 1, 2, \dots, N_{\text{конт}}$, и расположения начала координат ЛСК. Возможные подходы к такому сокращению предложены в [7].

Описываемый ниже алгоритм является модификацией алгоритма PSO [7] для размещения одной детали на поворотном столе АС, предназначенного для обработки однородных партий деталей.

Алгоритм PSO

Итерация $\eta = 0$

1. Генерируются m точек $p^{\gamma(0)} = (X^{\gamma(0)}, Y^{\gamma(0)}, Z^{\gamma(0)})$, $\gamma = 1, \dots, m$, начал ЛСК деталей, координаты $x_{ix}^y, y_{iy}^y, z_{iz}^z$ которых равномерно распределены на заданных отрезках $[x_{\min}^{ix}, x_{\max}^{ix}]$, $i_x \in R_x, [y_{\min}^{iy}, y_{\max}^{iy}]$, $i_y \in R_y, [z_{\min}^{iz}, z_{\max}^{iz}]$, $i_z \in R_z$, и $x_{лск}^{ix} = x_{лск}^{j_x} + x_{лск}^{ix}(0) - x_{лск}^{j_x}(0)$, $(i_x, j_x) \in I_x$, $y_{лск}^{iy} = y_{лск}^{j_y} + y_{лск}^{iy}(0) - y_{лск}^{j_y}(0)$, $(i_y, j_y) \in I_y$, $z_{лск}^{iz} = z_{лск}^{j_z} + z_{лск}^{iz}(0) - z_{лск}^{j_z}(0)$, $(i_z, j_z) \in I_z$, соответственно.

2. За положение \bar{p}^γ частицы γ принимается его начальное значение:

$$\bar{p}^\gamma = (\bar{X}^\gamma, \bar{Y}^\gamma, \bar{Z}^\gamma) = (X^{\gamma(0)}, Y^{\gamma(0)}, Z^{\gamma(0)}), \gamma = 1, \dots, m.$$

3. Определяется начальное значение $v^{\gamma(0)} = ((v_{xi_x}^{\gamma(0)} | i_x \in R_x), (v_{yi_y}^{\gamma(0)} | i_y \in R_y), (v_{zi_z}^{\gamma(0)} | i_z \in R_z))$ вектора скорости частицы γ посредством выбора случайных равномерно распределенных чисел из $[-(x_{\max}^{ix} - x_{\min}^{ix}), (x_{\max}^{ix} - x_{\min}^{ix})]$, $[-(y_{\max}^{iy} - y_{\min}^{iy}), (y_{\max}^{iy} - y_{\min}^{iy})]$, $[-(z_{\max}^{iz} - z_{\min}^{iz}), (z_{\max}^{iz} - z_{\min}^{iz})]$, $\gamma = 1, 2, \dots, m$, соответственно.

4. Если частица \bar{p}^γ допустима хотя бы для одной пары $q \in \bar{Q}, b \in \mathbf{B}$, то вычисляется значение целевой функции $F(\tilde{q}, \tilde{b}, \bar{p}^\gamma) = \min\{F(q, b, (X^{\gamma(0)}, Y^{\gamma(0)}, Z^{\gamma(0)})) | q \in \bar{Q}, b \in \mathbf{B}\}$, иначе полагается $F(\tilde{q}, \tilde{b}, \bar{p}^\gamma) = \infty$, $\gamma = 1, \dots, m$.

5. Среди всех значений $F(\tilde{q}, \tilde{b}, \bar{p}^\gamma)$ находится наименьшее и определяются соответствующая точка $g = (\hat{X}^g, \hat{Y}^g, \hat{Z}^g)$ и соответствующие ей векторы q^g и b^g :

$$F(q^g, b^g, g) = \min\{F(\tilde{q}, \tilde{b}, \bar{p}^{\gamma(0)}) | \gamma = 1, 2, \dots, m\};$$

$$(q^g, b^g, g) = \arg\{F(q^g, b^g, g)\}.$$

$\eta = 1$.

Итерация η

1. Для каждой частицы $\gamma = 1, 2, \dots, m$:

1.1. Генерируются случайные числа r_p и r_g из интервала $[0, 1]$.

1.2. Вычисляется новая скорость $v^{\gamma(\eta)} = ((v_{xi_x}^{\gamma(\eta)} | i_x \in R_x), (v_{yi_y}^{\gamma(\eta)} | i_y \in R_y), (v_{zi_z}^{\gamma(\eta)} | i_z \in R_z))$

частицы γ по формулам

$$v_{xi_x}^{\gamma(\eta)} = \omega \cdot v_{xi_x}^{\gamma(\eta-1)} + \varphi_p \cdot r_p \cdot (\bar{x}_{ix}^\gamma - x_{ix}^\gamma) + \varphi_g \cdot r_g \cdot (\hat{x}_{ix}^\gamma - x_{ix}^\gamma);$$

$$v_{yi_y}^{\gamma(\eta)} = \omega \cdot v_{yi_y}^{\gamma(\eta-1)} + \varphi_p \cdot r_p \cdot (\bar{y}_{iy}^\gamma - y_{iy}^\gamma) + \varphi_g \cdot r_g \cdot (\hat{y}_{iy}^\gamma - y_{iy}^\gamma);$$

$$v_{zi_z}^{\gamma(\eta)} = \omega \cdot v_{zi_z}^{\gamma(\eta-1)} + \varphi_p \cdot r_p \cdot (\bar{z}_{iz}^\gamma - z_{iz}^\gamma) + \varphi_g \cdot r_g \cdot (\hat{z}_{iz}^\gamma - z_{iz}^\gamma).$$

1.3. Определяется новое положение $p^{\gamma(\eta)} = (X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})$ частицы γ переносом ее из положения $p^{\gamma(\eta-1)}$ на итерации $\eta-1$ на вектор $u^{\gamma(\eta)}$:

$$x_{i_x}^{\gamma(\eta)} = x_{i_x}^{\gamma(\eta-1)} + u_{i_x}^{\gamma(\eta)}, \quad i_x \in R_x;$$

$$y_{i_y}^{\gamma(\eta)} = y_{i_y}^{\gamma(\eta-1)} + u_{i_y}^{\gamma(\eta)}, \quad i_y \in R_y;$$

$$z_{i_z}^{\gamma(\eta)} = z_{i_z}^{\gamma(\eta-1)} + u_{i_z}^{\gamma(\eta)}, \quad i_z \in R_z;$$

$$x_{i_x}^{\gamma(\eta)} = x_{j_x}^{\gamma(\eta)} + x_{лск}^{i_x} (0) - x_{лск}^{j_x} (0), \quad (i_x, j_x) \in I_x;$$

$$y_{i_y}^{\gamma(\eta)} = y_{j_y}^{\gamma(\eta)} + y_{лск}^{i_y} (0) - y_{лск}^{j_y} (0), \quad (i_y, j_y) \in I_y;$$

$$z_{i_z}^{\gamma(\eta)} = z_{j_z}^{\gamma(\eta)} + z_{лск}^{i_z} (0) - z_{лск}^{j_z} (0), \quad (i_z, j_z) \in I_z.$$

1.4. Если точка $(X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})$ допустима хотя бы для одной пары q, b , то вычисляется значение $F(q^{\gamma(\eta)}, b^{\gamma(\eta)}, (X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})) = \min\{F(q, b, (X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})) \mid q \in \bar{Q}, b \in \mathbf{B}\}$, иначе полагается $F(q^{\gamma(\eta)}, b^{\gamma(\eta)}, (X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})) = \infty$.

1.5. Если $F(q^{\gamma(\eta)}, b^{\gamma(\eta)}, (X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})) < F(\tilde{q}^{\gamma}, \tilde{b}^{\gamma}, \tilde{p}^{\gamma})$, то полагается $\tilde{p}^{\gamma} = (X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})$, $\tilde{q}^{\gamma} = q^{\gamma(\eta)}$, $\tilde{b}^{\gamma} = b^{\gamma(\eta)}$ и $F(\tilde{q}^{\gamma}, \tilde{b}^{\gamma}, \tilde{p}^{\gamma}) = F(q^{\gamma(\eta)}, b^{\gamma(\eta)}, (X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)}))$.

1.6. Если $F(\tilde{q}^{\gamma}, \tilde{b}^{\gamma}, \tilde{p}^{\gamma}) < F(q^g, b^g, g)$, то полагается $g = \tilde{p}^{\gamma}$, $q^g = \tilde{q}^{\gamma}$, $b^g = \tilde{b}^{\gamma}$ и $F(q^g, b^g, g) = F(\tilde{q}^{\gamma}, \tilde{b}^{\gamma}, \tilde{p}^{\gamma})$.

2. Если выполняется любое из условий $\eta = \bar{\eta}$ либо $T_{CPU} \geq \bar{T}_{CPU}$, то переход к п. 3. Иначе полагается $\eta = \eta + 1$ и переход к п. 1.

3. Если $F(q^g, b^g, g) < \infty$, то (q^g, b^g, g) – решение задачи. В противном случае решение задачи не найдено.

Таким образом, итерации повторяются до тех пор, пока не выполнится хотя бы одно из условий остановки работы алгоритма: либо выполнится заданное количество итераций, либо истечет максимально допустимое время работы алгоритма.

В процессе работы алгоритма целесообразно проверять допустимость ограничений задачи последовательно, что повышает его эффективность за счет исключения лишних проверок заведомо недопустимых точек.

Также для повышения эффективности алгоритма недопустимые точки следует разделить на два типа: строго недопустимые, для которых не существует компоновочной схемы АС, и условно недопустимые, которые могут быть трансформированы в допустимые. Относительно условно недопустимых точек используются следующие способы их трансформации в допустимые:

1. Пусть для сгенерированного вектора $(X^{\gamma(\eta)}, Y^{\gamma(\eta)}, Z^{\gamma(\eta)})$ не выполняются ограничения (4)–(7).

Обозначим через dx^i , dy^i и dz^i искомые отклонения от значений $x_{лск}^i$, $y_{лск}^i$ и $z_{лск}^i$ соответственно. Отклонения, обеспечивающие их минимальную общую сумму при выполнении ограничений (4)–(7), могут быть получены в результате решения следующей задачи:

$$\sum_{i=1}^n |dx^i| + \sum_{i=1}^n |dy^i| + \sum_{i=1}^n |dz^i| \rightarrow \min; \quad (14)$$

$$y_{лск}^i + \Delta_{yi}^l + dy^i - (x_{лск}^i + \Delta_{xi}^l + dx^i) \cdot \text{tg}(\pi / N_{ноз}) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, N_{конт}^i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (15)$$

$$y_{лск}^i + \Delta_{yi}^l + dy^i + (x_{лск}^i + \Delta_{xi}^l + dx^i) \cdot \text{tg}(\pi / N_{ноз}) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, N_{конт}^i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (16)$$

$$dx^i - dx^j = 0, (i, j) \in I_x; \quad (17)$$

$$dy^i - dy^j = 0, (i, j) \in I_y; \quad (18)$$

$$dz^i - dz^j = 0, (i, j) \in I_z; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \max\{dx^{i(p_l)} + x_{лск}^{i(p_l)} + x(p_l) + w(p_l) / 2 \mid l=1, \dots, k_j\} - \\ & - \min\{dx^{i(p_l)} + x_{лск}^{i(p_l)} + x(p_l) - w(p_l) / 2 \mid l=1, \dots, k_j\} \leq d_j, j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P^x; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \max\{dz^{i(p_l)} + z_{лск}^{i(p_l)} + z(p_l) + w(p_l) / 2 \mid l=1, \dots, k_j\} - \\ & - \min\{dz^{i(p_l)} + z_{лск}^{i(p_l)} + z(p_l) - w(p_l) / 2 \mid l=1, \dots, k_j\} \leq d_j, j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P^z. \end{aligned} \quad (21)$$

Задача (14)–(21) может быть преобразована в задачу линейного программирования путем введения дополнительных переменных $\delta x^i, \delta y^i, \delta z^i$, замены целевой функции (14) функцией

$$\sum_{i=1}^n \delta x^i + \sum_{i=1}^n \delta y^i + \sum_{i=1}^n \delta z^i \rightarrow \min, \quad (22)$$

введения дополнительных ограничений

$$\delta x^i - dx^i \geq 0, \quad \delta x^i + dx^i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (23)$$

$$\delta y^i - dy^i \geq 0, \quad \delta y^i + dy^i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (24)$$

$$\delta z^i - dz^i \geq 0, \quad \delta z^i + dz^i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (25)$$

а также замены ограничений (20), (21) соответственно следующими ограничениями:

$$\begin{aligned} & dx^{i(p_{k'})} + x_{лск}^{i(p_{k'})} + x(p_{k'}) + \lambda(p_{k'}) / 2 - x_{лск}^{i(p_{k''})} - x(p_{k''}) - dx^{i(p_{k''})} + \lambda(p_{k''}) / 2 \leq d_j, \\ & p_{k'}, p_{k''} \in P_j, k', k'' \in \{1, 2, \dots, k_j\}, k' < k'', (k', k'') \notin I_x, j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & dx^{i(p_{k''})} + x_{лск}^{i(p_{k''})} + x(p_{k''}) + \lambda(p_{k''}) / 2 - x_{лск}^{i(p_{k'})} - x(p_{k'}) - dx^{i(p_{k'})} + \lambda(p_{k'}) / 2 \leq d_j, \\ & p_{k'}, p_{k''} \in P_j, k', k'' \in \{1, 2, \dots, k_j\}, k' > k'', (k', k'') \notin I_x, j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P^x; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & dz^{i(p_{k'})} + z_{лск}^{i(p_{k'})} + z(p_{k'}) + \lambda(p_{k'}) / 2 - z_{лск}^{i(p_{k''})} - z(p_{k''}) - dz^{i(p_{k''})} + \lambda(p_{k''}) / 2 \leq d_j, \\ & p_{k'}, p_{k''} \in P_j, k', k'' \in \{1, 2, \dots, k_j\}, k' < k'', (k', k'') \notin I_z, j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P^z; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} & dz^{i(p_{k''})} + z_{лск}^{i(p_{k''})} + z(p_{k''}) + \lambda(p_{k''}) / 2 - z_{лск}^{i(p_{k'})} - z(p_{k'}) - dz^{i(p_{k'})} + \lambda(p_{k'}) / 2 \leq d_j, \\ & p_{k'}, p_{k''} \in P_j, k', k'' \in \{1, 2, \dots, k_j\}, k' > k'', (k', k'') \notin I_z, j = 1, 2, \dots, |P|, P_j \in P^z. \end{aligned} \quad (29)$$

Решая преобразованную задачу (22)–(29), можно получить из недопустимой относительно ограничений (4)–(7) точки $(x_{лск}^i, y_{лск}^i, z_{лск}^i)$, $i = 1, \dots, n$, допустимую $(x_{лск}^i + dx^i, y_{лск}^i + dy^i, z_{лск}^i + dz^i)$, $i = 1, \dots, n$.

Если задача (22)–(29) не имеет решения, то не имеет решения и исходная задача (1)–(13).

Следует отметить, что ограничения (26)–(29) для $(k', k'') \in I_x$ и $(k', k'') \in I_z$ выполняются тогда и только тогда, когда они выполняются для начальных положений $(x_{лск}^i(0), y_{лск}^i(0), z_{лск}^i(0))$, $i = 1, 2, \dots, n$. Таким образом, эти ограничения могут быть проверены заранее до решения задачи (1)–(13).

2. Пусть для фиксированных векторов $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$, q и b пересекаются две шпindelные коробки на соседних горизонтальных силовых столах, расположенных на гранях r и $r+1$ центральной станины (рис. 2), в их положении в конце обработки (не выполняется усло-

вие (12)). Это нарушение может быть устранено либо за счет изменения циклограммы станка, если это позволяет цикловое время (требуемая производительность), либо за счет увеличения длин баз b_r , b_{r+1} инструментов силовых узлов соответствующих боковых приставок. В первой ситуации пересечение будет устранено посредством разведения коробок по времени нахождения в конечном положении каждой из коробок. В другой ситуации увеличение базы инструментов (если оно допустимо) может привести к увеличению конструктивных параметров узлов соответствующей приставки (например, хода силового стола), что, как правило, приводит к увеличению его типоразмера и, соответственно, массы. Но при этом вектор $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$ может стать допустимым.

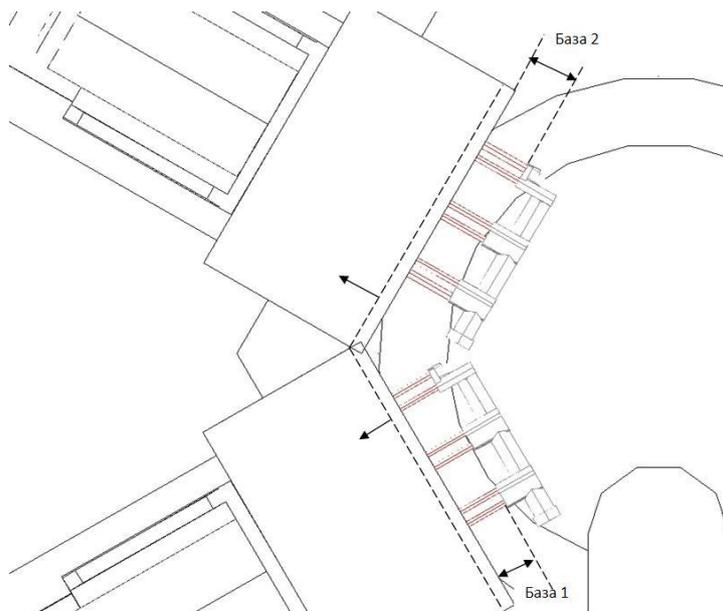


Рис. 2. Пересечение шпиндельных коробок соседних боковых приставок в проекции «в плане» при их положении в конце обработки. Штриховыми линиями указаны размеры требуемого увеличения величин базы инструментов для устранения пересечения

Замечание. Наличие пересечения шпинделей соседних многошпиндельных коробок указывает на недопустимость вектора $(X_{лск}, Y_{лск}, Z_{лск})$, поскольку оно может быть устранено только изменением положения деталей.

В следующем разделе приведены результаты вычислительных экспериментов по решению реальных проектных задач при различных значениях управляющих параметров.

4. Результаты численных экспериментов

Описанный в разд. 3 алгоритм PSO реализован на языке C++. Эксперименты проводились на ПК с ОС Windows 7 на базе процессора Intel Core с частотой 1,86 ГГц и оперативной памятью 4 Гб. Характеристики 61 решаемой задачи представлены в табл. 1, где $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{|P|}\}$, $\{\}$ – пустое множество.

Таблица 1

Характеристики задач

Задача	n	$N_{зр.}$	N_1	N_2	\aleph	Q	$ I_x $	$ I_y $	$ I_z $	$ P $	K	P_x	P_z
1	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
2	10	4	2	0	{1,3}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
3	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
4	10	6	4	0	{1,2,3,4}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
5	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}

Продолжение табл. 1

Задача	n	N_{ep}	N_1	N_2	\aleph	\mathcal{Q}	$ I_x $	$ I_y $	$ I_z $	$ P $	K	P_x	P_z
6	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
7	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
8	10	6	3	0	{1,2,3}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
9	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
10	10	4	2	0	{1,2}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
11	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
12	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
13	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
14	10	4	2	0	{1,2}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
15	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
16	10	6	3	0	{1,2,3}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
17	6	4	3	0	{1,2,3}	{}	2	5	2	1	{5}	{}	{1}
18	6	6	4	0	{1,2,3,4}	{}	0	0	0	0	{}	{}	{}
19	6	6	3	0	{1,3,4}	{}	2	5	2	1	{5}	{}	{1}
20	6	6	4	0	{1,3,4,5}	{}	0	0	0	0	{}	{}	{}
21	4	4	2	1	{1,2}	{3}	2	2	2	0	{}	{}	{}
22	6	8	3	0	{2,4,5}	{}	2	5	2	1	{5}	{}	{1}
23	6	8	4	0	{2,4,5,6}	{}	0	0	0	0	{}	{}	{}
24	6	4	2	1	{1,2}	{3}	2	2	2	0	{}	{}	{}
25	5	6	4	0	{1,2,3,4}	{}	3	4	3	1	{5}	{1}	{}
26	5	4	3	0	{1,2,3}	{}	3	4	3	1	{4}	{1}	{}
27	5	4	2	0	{1,2}	{}	1	1	1	0	{}	{}	{}
28	5	4	3	0	{1,2,3}	{}	3	3	3	0	{}	{}	{}
29	5	6	4	0	{1,2,3,4}	{}	3	4	3	1	{5}	{1}	{}
30	5	4	3	0	{1,2,3}	{}	3	4	3	1	{4}	{1}	{}
31	5	4	2	0	{1,2}	{}	1	1	1	0	{}	{}	{}
32	5	4	3	0	{1,2,3}	{}	3	3	3	0	{}	{}	{}
33	5	4	3	0	{1,2,3}	{}	3	4	3	1	{4}	{}	{1}
34	5	4	2	0	{1,2}	{}	1	1	1	0	{}	{}	{}
35	5	4	3	0	{1,2,3}	{}	3	3	3	0	{}	{}	{}
36	10	6	5	0	{1,2,3,4,5}	{}	6	8	7	1	{9}	{1}	{}
37	10	4	2	0	{1,3}	{}	4	3	3	0	{}	{}	{}
38	5	6	3	0	{1,2,3}	{}	3	3	3	0	{}	{}	{}
39	5	6	2	0	{1,2}	{}	1	1	1	0	{}	{}	{}
40	5	6	4	0	{1,2,3,4}	{}	3	4	3	1	{5}	{1}	{}
41	5	6	3	0	{1,2,3}	{}	3	4	3	1	{4}	{1}	{}
42	5	6	4	0	{1,2,3,4}	{}	3	4	3	1	{5}	{1}	{}
43	5	6	3	0	{1,2,3}	{}	3	4	3	1	{4}	{1}	{}
44	5	6	2	0	{1,2}	{}	1	1	1	0	{}	{}	{}
45	5	6	3	0	{1,2,3}	{}	3	3	3	0	{}	{}	{}
46	5	6	4	0	{1,2,3,4}	{}	3	4	3	1	{5}	{1}	{}
47	5	6	3	0	{1,2,3}	{}	3	4	3	1	{4}	{1}	{}
48	5	6	2	0	{1,2}	{}	1	1	1	0	{}	{}	{}
49	5	6	3	0	{1,2,3}	{}	3	3	3	0	{}	{}	{}
50	6	6	2	1	{1,2}	{3,4,5}	2	2	2	0	{}	{}	{}
51	6	6	2	1	{1,2}	{3,4,5}	1	1	1	0	{}	{}	{}
52	6	6	2	1	{1,2}	{3,4,5}	2	2	2	0	{}	{}	{}
53	6	6	2	1	{1,2}	{3,4,5}	2	2	2	0	{}	{}	{}
54	6	6	2	1	{4,5}	{1,2,3}	2	2	2	0	{}	{}	{}
55	6	6	2	1	{4,5}	{1,2,3}	1	1	1	0	{}	{}	{}

Окончание табл. 1

Задача	n	N_{zp}	N_1	N_2	\aleph	Q	$ I_x $	$ I_y $	$ I_z $	$ P $	K	P_x	P_z
56	6	6	2	1	{3,4}	{1,2,5}	2	2	2	0	{}	{}	{}
57	6	6	2	1	{3,4}	{1,2,5}	2	2	2	0	{}	{}	{}
58	6	4	2	1	{1,3}	{2}	2	2	2	0	{}	{}	{}
39	6	4	2	1	{1,3}	{2}	1	1	1	0	{}	{}	{}
60	6	4	2	1	{1,2}	{3}	2	2	2	0	{}	{}	{}
61	6	4	2	1	{1,2}	{3}	2	2	2	0	{}	{}	{}

Задачи с одинаковыми параметрами соответствуют различным вариантам технологического процесса.

Эксперименты проводились при различных значениях управляющих параметров. В табл. 2 приведены результаты для $m = 10$, $\bar{\eta} = 50$, $\bar{T}_{CPU} = 600$ с. В этой таблице F_0 – значение целевой функции (масса станка в кг) для начальных положений $(x_{лск}^i(0), y_{лск}^i(0), z_{лск}^i(0))$ ЛСК деталей $i = 1, 2, \dots, n$; F_1^* – найденное значение целевой функции для $\omega = 0,729$, $\varphi_p = 1,49445$, $\varphi_g = 1,49445$ [14]; F_2^* – для $\omega = 0,729$, $\varphi_p = 2,05$, $\varphi_g = 2,05$ [15]; F_3^* – для $\omega = 0,5$, $\varphi_p = 1,5$, $\varphi_g = 3,5$ [7]; F_4^* – для $\omega = 0,5$, $\varphi_p = 4$, $\varphi_g = 1,5$ [7] с корректировкой сгенерированных координат (решение задачи (22)–(29)) и выбором вектора b . Значения F_5^* соответствуют выбору вектора b без корректировки сгенерированных координат, а F_6^* – корректировке сгенерированных координат без выбора вектора b для $\omega = 0,729$, $\varphi_p = 1,49445$, $\varphi_g = 1,49445$. Значения $F_{сп}^*$ и $F_{лп}^*$ соответствуют значениям, полученным при использовании алгоритмов случайного поиска и ЛП-последовательностей для 500 положений деталей с корректировкой сгенерированных координат и выбором вектора b .

Жирным шрифтом выделены наилучшие значения массы станка.

Таблица 2

Результаты решения задач

Задача	F^0	F_1^*	F_2^*	F_3^*	F_4^*	F_5^*	F_6^*	$F_{сп}^*$	$F_{лп}^*$
1	–	17155,9	17001,7	17155,9	17097,6	17249,6	17155,9	17272,6	17230,4
2	–	7813,41	7813,41	7813,41	7813,41	–	7813,41	7813,41	7813,41
3	20479,2	17428,4	17447,7	17357,2	18921	18824,5	17305,8	17852,6	17854,9
4	–	10756,2	–	–	–	–	–	13594,6	14291,7
5	–	17375	17347,5	17374,9	17376,8	17561,5	17356,8	17870,1	19010,5
6	–	12535,3	12312,8	12935,8	13793,5	–	13840,6	13793,5	13793,5
7	–	18761,8	18707,9	18638,4	18652,5	19398,9	18761,8	19101,9	18892,9
8	–	12305,9	–	–	–	–	–	15024,4	13367,8
9	16769,3	16251,4	16245,5	16280,5	16257,5	16622,7	16251,4	16448,6	16454
10	–	9486,13	9556,1	9556,1	9556,1	–	9486,13	9556,1	9556,1
11	–	18842,7	19196,9	18968,8	18958,8	18925,7	18842,7	19574,5	19746,9
12	–	12563,1	12494,1	12491	–	–	–	15171,4	15353,6
13	16769,3	16251,4	16245,5	16280,5	16257,5	16622,7	16251,4	16448,6	16454
14	–	9676,54	11505,9	11110,8	–	–	–	12116,1	14200,6
15	–	18757	18703,2	18633,6	18647,7	19394,1	18757	19097,1	18888,1
16	–	12444,7	12444,7	12444,7	12444,7	–	–	12444,7	12444,7
17	–	6213,37	6634,92	6696,24	6154,19	8992,34	6213,37	7038,45	6938,07
18	–	12037,7	13069,9	–	13325,2	–	–	11428,1	10814,6
19	–	8150,34	6758,94	6679,19	7221,25	8202,53	8150,34	7525,12	6891,17
20	–	12042,7	13069,9	–	13325,2	–	–	11433,1	10819,6
21	–	11762,9	10664,6	10921,3	11767,5	17988,2	12785	19993,3	–

Продолжение табл. 2

Задача	F^0	F_1^*	F_2^*	F_3^*	F_4^*	F_5^*	F_6^*	$F_{\text{СП}}^*$	$F_{\text{ЛП}}^*$
22	–	9954,67	8730,99	10280,5	8651,45	–	9954,67	8825,38	8748,23
23	–	11664,9	–	–	–	–	–	15217,8	12560,7
24	–	19255,3	19323,1	20451	–	–	18900,2	21160,9	21555,1
25	16130,4	14310,9	14442,8	14444	14492,8	14379	14363	14621,1	14692,6
26	13173	12287	12287,1	12287,2	12288,1	12288	12287	12302,2	12291
27	7750,3	7078,17	7025,73	6407,38	7078,17	7094,02	7078,17	7447,09	7389,73
28	9813,63	7594,72	7594,72	7594,72	7636,1	7594,72	7594,72	7762,55	8210,5
29	16130,4	14396,1	14469	14444	14492,8	14379	14363	14621,1	14692,6
30	13173	12287	12287,1	12287,2	12288,1	12288	12287	12302,2	12291
31	7750,3	6402,95	7122,51	6423,97	7201,15	7094,02	7078,17	7447,09	7389,73
32	7737,98	7594,72	7594,72	7594,72	7594,72	7631,88	7594,72	7737,98	7737,98
33	7211,67	6992,09	6992,09	6992,09	6992,09	6992,09	6992,09	7039	7107,53
34	8193,46	6549,11	7142,44	7380,92	8143,71	7488,34	7365,95	7578,39	7521,03
35	7689,26	7662,5	7655,06	7662,38	7655,06	7661,16	7655,06	7689,3	7689,3
36	–	17372	17211,3	17211,4	17212,1	17561,5	17368,1	17670,9	17607,5
37	7872,1	7865,04	7872,1	7872,1	7872,1	7872,1	7872,1	7872,1	7872,1
38	–	7840,27	7840,27	7840,27	7840,27	8157,4	7770,68	7840,27	7840,27
39	7248,96	7191,15	7196,57	7196,57	7196,57	7196,57	7248,96	7196,57	7196,57
40	–	14392,5	14449,3	14469,3	14508,1	14400,9	14360,7	14655,1	14510,7
41	–	11012,5	11012,5	11012,8	11012,6	11013	11012,5	11026,9	11034,5
42	–	14490,3	14441,8	14386,9	14975,5	14799,5	14360,7	14655,1	14510,7
43	14394,7	14264,1	14264,5	14264,3	14264,7	14264,8	14264,1	14286,9	14303,4
44	–	11147,6	11149,5	11147,6	7117,61	–	–	7899,29	8000,18
45	–	7773,19	7773,19	7773,2	7773,18	7773,86	7812,91	7834,44	7849,04
46	17565,9	14430,7	14454,5	14444	14492,8	15779,5	14363	14621,1	14692,6
47	14442,4	12913,4	12913	12936,1	12919,2	12911,8	12913,4	12951,7	12966,8
48	–	7005,72	7011,18	7019,88	7005,72	–	7008,97	7063,8	7063,8
49	–	7742,46	7742,47	7742,46	7742,45	7746,9	7746,9	7805,76	7820,59
50	20183,8	20183,8	20183,8						
51	19907,6	19907,6	19738,1	19451,1	18460	19907,6	19907,6	19907,6	19907,6
52	16845,8	16845,8	16845,8	16394,9	16845,8	16845,8	16845,8	16845,8	16845,8
53	15207,6	13729,9	13792,1	15063,8	15207,6	15207,6	15207,6	15207,6	15207,6
54	20183,8	20183,8	20183,8						
55	19907,6	19035,4	19457,9	18927,3	18459,9	19907,6	19907,6	19573	19907,6
56	16608,1	16608,1	16533,5	16143,3	16608,1	16608,1	16608,1	16608,1	16514,5
57	15207,5	13671,3	13792,1	15063,8	15207,6	15207,6	13719,8	15207,6	15207,6
58	17605,3	17605,3	17605,3						
59	18888,2	18888,2	18888,2						
60	17196,8	17196,8	17196,8						
61	15597,6	14070,1	15597,6	15597,6	15597,6	–	15597,6	15597,6	15597,6

В табл. 3 приводятся результаты сравнительного анализа эффективности протестированных алгоритмов. Здесь NSOL – число решенных задач; NOPT – число решенных задач с наилучшим значением массы; NOPT1 – число решенных задач с абсолютно наилучшим значением массы; АО – среднее отклонение массы полученного решения от наилучшего, %; MNO – минимальное отклонение массы полученного решения от наилучшего, %; MXO – максимальное отклонение массы полученного решения от наилучшего, %; AOTB – среднее отклонение массы полученного решения от наилучшего без учета максимального отклонения, %; MNO1 – минимальное (большее нуля) отклонение массы полученного решения от наилучшего, %; MXO1 – второе большее отклонение массы полученного решения от наилучшего, %.

Таблица 3

Сравнение результатов решения задач

METH	NSOL	NOPT	NOPT1	AO	MNO	MXO	AOTB	MNO1	MXO1
PSO1	61	29	12	2,72	0,00	56,62	1,82	0,16	22,03
PSO2	58	19	7	3,41	0,00	56,65	2,48	0,37	20,85
PSO3	56	17	7	3,11	0,00	56,62	2,14	0,16	18,83
PSO4	55	18	7	3,35	0,00	24,35	2,96	0,17	23,21
PSO5	46	8	1	5,96	0,00	68,67	4,56	0,11	46,12
PSO6	52	23	7	2,93	0,00	22,03	2,55	0,35	19,88
СП	61	7	0	7,07	0,00	87,47	5,73	0,12	30,46
ЛП	60	9	2	5,45	0,00	46,75	4,75	0,20	32,87

Только два алгоритма смогли решить все задачи: PSO с параметрами $\omega = 0,729$, $\varphi_p = 1,49445$, $\varphi_g = 1,49445$ (PSO1) и СП. При этом СП ни разу не получил решение, лучшее по сравнению с другими алгоритмами, а для PSO1 число таких задач составило 12. Кроме того, для PSO1 получено наибольшее число наилучших решений и минимальное среднее отклонение значения массы АС по сравнению с другими алгоритмами.

Для пяти задач (50, 54, 58, 59, 60) ни один из алгоритмов не смог улучшить значение целевой функции, полученное для исходных положений деталей.

В табл. 4 приводятся результаты попарного сравнения PSO1 с другими алгоритмами. Характеристики NSOL, NOPT, NOPT1, AO, MXO, AOTB, MNO1 и MXO1 вычислены для сравниваемых алгоритмов. Первое значение в ячейке соответствует характеристике PSO1, а второе – характеристике алгоритма из столбца METH.

Таблица 4

Сравнение PSO1 с другими алгоритмами

METH	NSOL	NOPT	NOPT1	AO	MXO	AOTB	MNO1	MXO1
PSO2	61/58	43/32	29/18	0,86/1,43	20,59/18,91	0,53/1,12	0,16/0,11	14,02/11,24
PSO3	61/56	46/29	32/15	0,86/1,49	22,03/14,82	0,51/1,24	0,41/0,18	10,47/12,70
PSO4	61/55	48/26	35/13	1,62/2,15	56,62/24,35	0,71/1,74	0,34/0,43	15,06/12,47
PSO5	61/46	58/12	49/3	0,00/4,36	0,12/52,92	0,00/3,28	0,12/0,22	0,02/44,73
PSO6	61/52	51/37	24/10	0,09/1,36	1,88/12,47	0,06/1,14	0,10/0,35	0,90/10,86
СП	61/61	56/15	46/5	1,19/5,51	41,12/69,97	0,53/4,43	5,33/0,12	12,80/30,46
ЛП	61/60	55/16	45/6	1,55/4,51	39,34/46,75	0,92/3,79	0,53/0,14	18,27/32,87

Результаты экспериментов показали, что лучшим алгоритмом в среднем является PSO1. Его можно рекомендовать использовать в случае ограниченного времени для поиска варианта компоновки АС. Если же ресурс времени достаточный, то целесообразно применять наряду с PSO1 и другие варианты метода PSO (PSO2 – PSO6).

Заключение

В работе исследована задача оптимизации массы АС с поворотным столом для многоинструментальной обработки группы различных деталей за счет их размещения на загрузочной позиции станка, выбора граней расположения боковых приставок и величин баз инструментов. Выбор грани для размещения боковой приставки, предназначенной для обработки деталей сверху параллельно на нескольких позициях стола, осуществляется полным перебором граней, не занятых горизонтальными приставками. Для оптимизации размещения деталей группы предложен эвристический алгоритм «роя частиц» и подобраны наилучшие параметры этого алгоритма для ряда тестовых примеров. Проведено экспериментальное сравнение предложенного метода с известными методами СП и ЛП-последовательностей, показавшее его превосходство в среднем по значению целевой функции.

В дальнейшем предполагается расширить постановку задачи на случай возможных различных ориентаций ЛСК деталей относительно системы координат АС, а также учесть возможность обработки деталей боковыми приставками вдоль произвольной оси, а не только параллельно осям системы координат АС.

Список литературы

1. Гебель, Х. Компонировка агрегатных станков и автоматических линий / Х. Гебель. – М. : Машгиз, 1959. – 189 с.
2. Хомяков, В.С. Автоматизированное проектирование компоновок металлообрабатывающих станков / В.С. Хомяков, И.И. Давыдов // Станки и инструмент. – 1990. – № 5. – С. 4–7.
3. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М. : Машиностроение, 1987. – 232 с.
4. Комплекс алгоритмов и программных средств формирования компоновок агрегатных металлорежущих станков / Г.М. Левин [и др.] – Минск, 2005. – 50 с. – (Препринт / Нац. академия наук Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики НАН Беларуси ; № 4).
5. Автоматизация проектирования агрегатных металлорежущих станков : учеб. пособие / Г.М. Левин [и др.] ; Витебский гос. технол. ун-т. – Витебск, 2008. – 122 с.
6. Розин, Б.М. К синтезу компоновок агрегатных станков для групповой обработки / Б.М. Розин, В.Е. Зданович // Информатика. – 2014. – № 4(44). – С. 100–116.
7. Гущинский, Н.Н. Оптимизация размещения детали на многопозиционном поворотном столе агрегатного станка / Н.Н. Гущинский, В.Е. Зданович, Б.М. Розин // Информатика. – 2015. – № 4. – С. 57–72.
8. Скобцов, Ю.А. Метаэвристики / Ю.А. Скобцов, Е.Е. Федоров – Донецк : Ноулидж, 2013. – 426 с.
9. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах : учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 2005. – 544 с.
10. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М. : Дрофа, 2006. – 175 с.
11. Poli, R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation / R. Poli // J. of Artificial Evolution and Applications. – 2008. – Vol. 2008. – 57 p.
12. Shahrajabian, H. Multi-constrained optimization in ball-end machining of carbon fiber-reinforced epoxy composites by PSO / H. Shahrajabian, M. Farahnakian // Cogent Engineering. – 2015. – Vol. 2, iss. 1. – 14 p.
13. Wei, L. A particle swarm optimization approach to a multi-objective reconfigurable machine tool design problem / L. Wei, L. Ming // Proc. of the 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vancouver, BC, Canada, 16–21 July 2006 / IEEE Press. – Vancouver, 2006. – P. 2222–2229.
14. Clerc, M. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space / M. Clerc, J. Kennedy // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6. – P. 58–73.
15. Pedersen, M.E.H. Simplifying particle swarm optimization / M.E.H. Pedersen, A.J. Chipperfield // Applied Soft Computing. – 2010. – Vol. 10, no. 2. – P. 618–628.

Поступила 06.01.2017

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск, ул. Сурганова, 6
e-mail: gyshin@newman.bas-net.by,
rozin@newman.bas-net.by*

N.N. Guschinsky, B.M. Rozin

**OPTIMIZING THE PLACEMENT OF A BATCH OF WORK-PIECES
AT A MULTI-POSITION ROTARY TABLE OF TRANSFER MACHINE**

The problem of minimizing the mass of rotary transfer machine by placing a batch of work-pieces at the rotary table is considered. To solve this problem the mathematical model and heuristic PSO algorithm are proposed. The results of numerical experiments for series of real problems are reported. The experiments revealed that the PSO algorithm on average is more effective for the solution of the problem compared to methods of random search and LP-search.