

Система поддержки принятия решений синтеза моделей базирования партий заготовок некруглых деталей на фрезерных обрабатывающих центрах

Н. В. Беляков¹,
Н. Н. Попок²,
Ю. Е. Махаринский¹,
М. А. Якушев¹,
А. П. Станкевич¹

¹Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск, Республика Беларусь
²Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. В современном машиностроении широкое распространение получили детали, не относящиеся к телам вращения, такие как корпуса, станины, коробки, стойки и т. п., для механической обработки которых используются обрабатывающие центры (ОЦ). В статье, на основе анализа методов ориентации заготовок в рабочей зоне фрезерных ОЦ, предложен подход к формированию системы координат детали WCS (Work Coordinate System), а также определению состава установочных и установочно-зажимных элементов приспособлений для обеспечения точности расположения конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей в серийном машиностроительном производстве, позволяющий формализовать процедуры проектного базирования. Использование теории алгоритмов, автоматизации проектирования и информационных технологий позволило реализовать эти процедуры в виде системы поддержки принятия решений. Применение системы позволяет сократить сроки формирования и оформления технологических процессов изготовления деталей, повысить качество проектных решений по выбору (разработке) станочных приспособлений, что способствует повышению производительности труда технологов-машиностроителей и снижению количества ошибок на этапе внедрения технологии. Разработки могут использоваться: в технологических бюро машиностроительных предприятий для проектирования операций изготовления деталей на фрезерных обрабатывающих центрах; в IT-компаниях для совершенствования CAPP/CAM/CAFD-систем; в учебном процессе для подготовки специалистов в области технологии машиностроения.

Ключевые слова: фрезерный обрабатывающий центр, базирование, некруглые детали, система координат, ноль детали, WCS, алгоритм, станочное приспособление.

Decision Support System for Synthesizing Models for Basing Batches of Non-Circular Parts on Multi-Purpose Milling Machining Centers

Nikolay V. Belyakov¹,
Nikolay N. Popok²,
Yuri E. Makharinsky¹,
Maxim A. Yakushev¹,
Alexander P. Stankevich¹

¹Educational institution "Vitebsk State Technological University", Vitebsk, Republic of Belarus
²Educational institution "Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk", Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract. In modern mechanical engineering, parts that are not related to bodies of rotation, such as housings, frames, boxes, racks, etc., are widely used, and machining centers (OTS) are used for their mechanical processing. Based on the analysis of the methods of orientation of workpieces in the working area of milling centers, the article proposes an approach to the formation of the WCS (Work Coordinate System) part coordinate system, as

well as determining the composition of the mounting and clamping elements of devices to ensure the accuracy of the structural elements of the original non-circular parts in serial machine-building production, allowing to formalize the procedures of design basing. The use of algorithm theory, design automation, and information technology has made it possible to implement these procedures as a decision support system. The use of the system makes it possible to reduce the time required for the formation and design of technological processes for manufacturing parts, improve the quality of design solutions for the selection (development) of machine tools, which makes it possible to increase the productivity of machine engineers and reduce the number of errors at the stage of technology implementation. The developments can be used: in the technological bureaus of machine-building enterprises to design the manufacturing operations of parts at milling processing centers; in IT companies to improve CAPP/CAM/CAFD systems; in the educational process to train specialists in the field of mechanical engineering technology.

Keywords: milling machining center, basing, non-circular parts, coordinate system, zero parts, WCS, algorithm, machine tool.

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении широкое распространение получили такие детали, как корпуса, станины, коробки, стойки, основания, кронштейны, рычаги и т. п., для механической обработки которых все более широкое применение находят фрезерные обрабатывающие центры (ОЦ). Характерной особенностью таких деталей является разнообразие состава конструктивных элементов, а также высокие требования к точности их расположения (перпендикулярность, параллельность, наклон, соосность, симметричность, пересечение осей). Чаще всего указанные детали являются нетиповыми в отличие, например, от деталей типа тела вращения, для которых возможно построение комплексных типовых деталей и соответствующих технологических процессов с детальной проработкой операций и порядка их выполнения.

Большое влияние на обеспечение точности расположения при обработке на металлорежущих станках оказывает базирование заготовок [1]. В описании операции типовых комплексных технологических процессов изготовления деталей типа «тела вращения» несложно предусмотреть модели базирования заготовок. Для формирования операций механической обработки заготовок оригинальных некруглых (не относящихся к телам вращения) деталей требуется каждый раз синтезировать новые модели базирования. Поэтому трудоемкость проектирования операций механической обработки заготовок указанных деталей на порядок выше трудоемкости проектирования технологий изготовления деталей других классов.

Сократить трудоемкость проектирования в десятки раз и повысить качество проектных работ позволяет их автоматизация. Однако, анализ информационных источников опыта работы технологических бюро машиностроительных предприятий, специализирующихся на серийном выпуске некруглых деталей, показывает, что процедуры синтеза вари-

антов базирования партий заготовок для обеспечения точности расположения элементов конструкции оригинальных некруглых деталей сложной формы на фрезерных обрабатывающих центрах являются недостаточно алгоритмизированными, и как следствие, отсутствуют автоматические средства их проведения [1–5]. Направлением решения задачи создания полностью автоматической системы синтеза станочных приспособлений (CAFD-систем (computer-aided fixture design)) является создание системы поддержки принятия проектных решений (СППР) синтеза моделей базирования.

Поэтому целью работы является разработка СППР синтеза моделей базирования партий заготовок для обеспечения точности расположения конструктивных элементов оригинальных деталей сложной формы в субтрактивном машиностроительном производстве на фрезерных обрабатывающих центрах.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ методов базирования заготовок на ОЦ;
- разработать алгоритмическое обеспечение СППР;
- разработать программное обеспечение СППР.

Для исследования и решения, поставленных в работе задач, использовались методы теории базирования, системно-структурного анализа и моделирования, а также автоматизации проектирования. Проводился анализ литературных источников, электронных изданий, опыта работы технологических бюро машиностроительных предприятий.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Анализ каталогов станочного оборудования, а также опыта работы машиностроительных предприятий показывает, что ведущим производителем фрезерных обрабатывающих центров (ОЦ) в Ре-

спублике Беларусь является ОАО «СтакоГомель». В Российской Федерации лидерами в производстве обрабатывающих центров являются ООО «Липецкое станкостроительное предприятие», ООО «Ульяновский станкостроительный завод»¹. Лидерами в производстве обрабатывающих центров в дальнейшем зарубежье являются такие компании как: Haas Automation, Hurco (США), Okuma, Mazak (Yamazaki Mazak), Makino (Япония), DMG Mori (Япония и Германия), Gildemeister, Trumpf (Германия), Bystronic (Швейцария), ANCA (Австралия/Германия), DMTG, Beijing Jingdiao Group, SMTCL, Jier Machine-Tool Group, Borui CNC, QCMTT, Ningbo Haitian, Tuofa Technology, Yijin Hardware (КНР)².

Все многообразие современных фрезерных обрабатывающих центров с ЧПУ сводится к двум принципиальным видам: с горизонтальным HMC (Horizontal machining center) или вертикальным VMC (vertical machining center) шпинделем. ОЦ отличаются широким разнообразием компоновочных решений, регламентированных ГОСТ Р ИСО 10791-1-2009. Важнейшее значение для вопросов базирования имеет то, что вне зависимости от компоновки ОЦ применяется единая система обозначений координат MCS (Machine Coordinate System (ноль станка)) [6–7].

Анализ *методов базирования заготовок* некрутых деталей показывает, что их установка в рабочей зоне фрезерных ОЦ для всех компоновочных решений осуществляется:

- непосредственно на поверхность стола станка с использованием универсальных опор и упоров;
- на поверхности установочных и (или) установочно-зажимных элементов станочных приспособлений.

По степени специализации все станочные приспособления для фрезерных ОЦ можно классифицировать на специальные и переналаживаемые. Переналаживаемые приспособления для фрезерных ОЦ, в свою очередь, можно разделить на универсальные безналадочные; универсальные наладочные; специализированные наладочные; универсально-сборные; сборно-разборные³.

Наиболее широкое применение для базирования заготовок на фрезерных ОЦ находят универсальные безналадочные приспособления: тиски машинные

(станочные, глобусные, горизонтальные, угловые, самоцентрирующиеся, ручные, многофункциональные, вертикальные, магнитные); столы поворотные, магнитные столы и плиты; вакуумные столы (решетчатые, столы VAC-MAT, перфорированные, желобковые, пористые); стойки и т. п.

Универсально-наладочные и специализированные наладочные приспособления состоят из универсальной базовой части и сменных наладок. Наладки могут быть универсальными и специальными (под определенную задачу). Наиболее широкое применение такие приспособления нашли для групповой обработки заготовок.

Система универсально-сборных приспособлений состоит из десятков тысяч стандартных деталей (корпусы, установочные, крепежные и т. д.) регламентированных ГОСТ 31.111.41-93. Ориентация и фиксация деталей осуществляется системой Т-образных пазов. Универсально-сборные приспособления находят применение для опытного освоения новых деталей в мелкосерийном и серийном производстве. Лидерами в производстве универсально-сборных приспособлений являются: Южно-уральский завод универсально-сборочных приспособлений и технологической оснастки и завод специальной взаимозаменяемой технологической оснастки⁴.

Сборно-разборные приспособления также как и универсально-сборные состоят из типовых стандартных деталей, однако конструктивно их взаимная ориентация и фиксация предусматривает систему координатных отверстий и пальцев. Ведущими зарубежными производителями являются компании AMF и KIPP (Германия), AMROK (США), IMAO (Япония), Liave Industrial (Тайвань)⁵ и др.

Для обеспечения точности расположения конструктивных элементов одной из важнейших задач при проектировании моделей базирования заготовок на фрезерных ОЦ с ЧПУ является определение положения системы рабочих координат WCS (Work Coordinate System (ноль детали)) относительно системы координат станка MCS [8–10].

Проведенный анализ информационных источников показывает, что определение ориентации WCS относительно MCS может осуществляться двумя методами:

- виртуальным базированием (базированием с

¹<https://stankogomel.by/>, <https://lssp.ru/catalog/>, <https://ulsz.ru/>

²<https://www.haas.co.uk/>, <http://mazak.ru/>, <https://www.okuma.eu/ru/>, <https://en.dmgmori.com/>, <https://dmtg-stanki.ru/>, <https://www.smtcl-en.com/>, <https://en.jingdiao.com/>

³Изнаилов, Б. М. Установочно-зажимная технологическая оснастка в машиностроении : учебное пособие / Б. М. Изнаилов, А. Н. Васин, О. П. Решетникова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 244 с.

⁴<http://uspto.ru> <http://svto.info/>

⁵<https://www.amf.de>, <https://www.kippcom.ru>, <https://www.ame.com/tombstones-fixtures>, <https://www.imao.biz>, <http://www.leave.com.tw/>

использованием систем измерений);

- базированием относительно простых движений подач (направляющих).

Ориентация WCS относительно системы координат станка при виртуальном базировании осуществляется на основе OMV-технологии (от англ. on-machine verification). Процесс происходит с помощью выполнения замеров положения заготовки непосредственно на станке с помощью систем щупов и датчиков (в перспективе индуктивных, лазерных, интерферометрических и триангуляционных измерительных систем). Далее при специальном управлении станком, обеспечивающем перемещения за счет сложных движений подач, возможно производить обработку конструктивных элементов вне зависимости от их ориентации относительно направляющих станка [10–12].

Метод виртуального базирования находит применение в единичном и мелкосерийном производстве. В случае использования этого способа для обработки партий заготовок в серийном производстве:

- значительно увеличивается вспомогательное время, связанное с процедурой измерения, и как следствие снижается производительность;
- повышаются требования к квалификации операторов;
- снижаются качество обработанных поверхностей, а также точность формы и расположения конструктивных элементов вследствие необходимости совмещения подач;
- повышается себестоимость изготовления заготовок за счет необходимости использования дополнительно оснастки и программного обеспечения.

Если оси WCS не являются параллельными (перпендикулярными) по отношению к осям MCS, то при обработке с использованием простых движений подач (вдоль направляющих) на точность линейных и угловых размеров, а также допусков расположения поверхностей существенное влияние будут оказывать углы поворота осей указанных систем координат друг относительно друга. Установлено, что ориентация осей WCS относительно простых движений подач и координат станка MCS при базировании партий заготовок может осуществляться двумя способами:

- выверкой положения установочных элементов относительно простых движений подач (при базировании заготовки непосредственно на стол станка или в приспособлении). При этом используются эталонные плоскопараллельные концевые меры и угольники, а также средства измерения (как правило, индикаторы);
- за счет использования системы базирующих (установочных) элементов станочных приспособлений, соответствующих посадочным местам станков

или спутников и обеспечивающих их точное положение на столе или спутнике (при базировании заготовки в приспособлении и (или) спутнике).

При использовании системы базирующих (установочных) элементов станочных приспособлений или спутников при их проектировании формируется установочная система координат, положение которой, в свою очередь, задается относительно системы координат приспособления. Система координат приспособления привязывается к системе координат стола станка и MCS. На рисунке 1 показаны варианты расположения установочной системы координат (индекс *y*), систем координат стола (индекс *cm*) и приспособления (индекс *np*), а также WCS и MCS.

Для реализации положения системы координат приспособления относительно системы координат стола могут применяться такие варианты ориентации приспособления, как:

- с помощью цилиндрического пальца по отверстию и пальца (или шпонки) по продольному пазу (если на столе станка имеются центральное отверстие и продольные пазы) (рис. 1 а);
- по угольнику в координатный угол (при наличии на столе станка продольных пазов) (рис. 1 б);
- с помощью установочных шпонок или пальцев (при наличии на столе станка продольных пазов и центрального поперечного паза);
- с помощью системы Zero Point (для различных столов).

При ориентации приспособления с помощью установочных шпонок или пальцев в том случае, если на столе станка имеются только продольные пазы, формирование оси системы координат приспособления по оси перпендикулярной этому пазу может осуществляться за счет использования упора на столе станка.

Логичным развитием решений в области сокращения вспомогательного времени при обработке партий заготовок деталей стали системы нулевой точки (Zero Point). Суть системы Zero Point заключается в том, что к системе координат станочного приспособления привязывается система координат, заданная относительно стола станка. Начало этой системы координат и называется «нулевая точка». Особую эффективность такие системы показывают для многоменклатурного мелко- и среднесерийного производства (High-Mix Low-Volume), когда становится возможным вне станка произвести установку заготовки и привязать ее систему координат к системе координат станка [13,14].

Установлено, что важнейшее значение при базировании партий заготовок имеет положение WCS относительно опорной (установочной) системы координат (привязанной к установочным элементам). При этом желательно совместить опорную

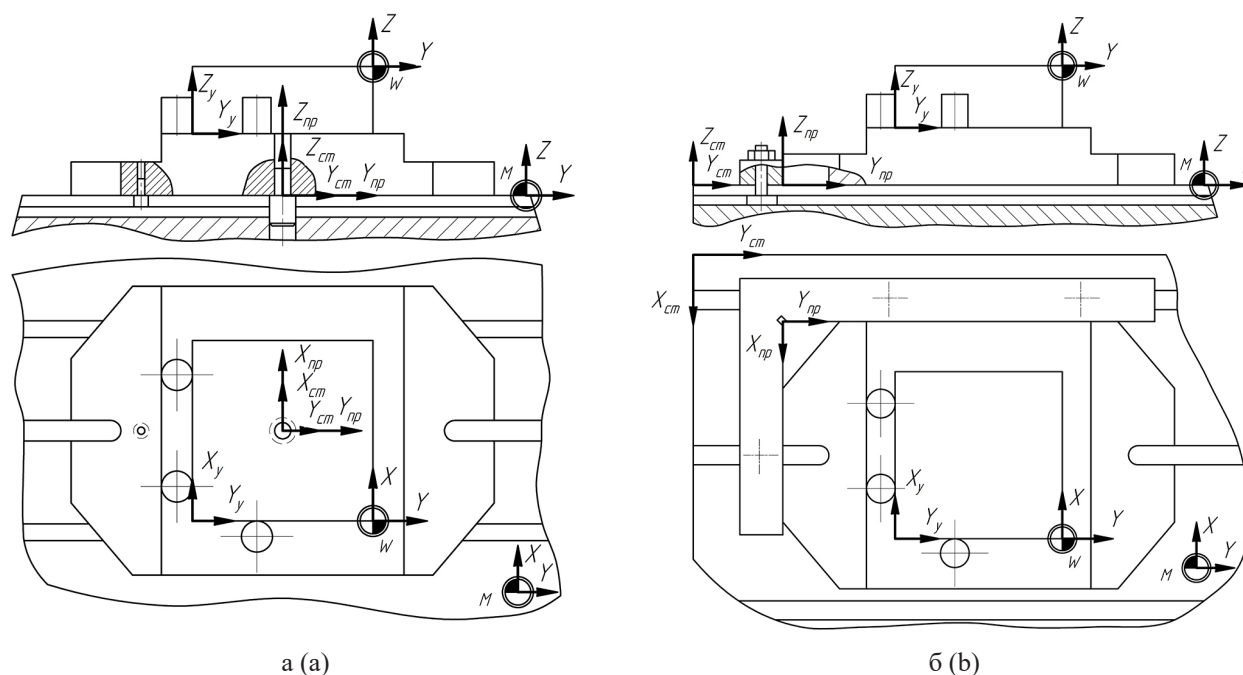


Рисунок 1 – Ориентация приспособления на столе станка:
а – по центральному отверстию и продольному пазу с помощью цилиндрических пальцев;
б – по боковым плоскостям корпуса с помощью угольника

Figure 1 – Orientation of the fixture on the machine table:
a – along the central hole and longitudinal groove using cylindrical pins;
b – along the side surfaces of the housing using a square

систему координат с WCS, чтобы не создавать условия для возникновения погрешности схемы установки – меры несовпадения опорной системы координат и WCS. Причиной возникновения погрешности схемы установки являются погрешности размеров объекта производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому.

Например, на операции обработки отверстия выполняются размеры A_2 , B_2 и C_2 (рис. 2), для чего с использованием команды G54 сформирована нулевая точка детали (размещена система координат WCS). При программировании и последующей обработке режущие кромки инструмента устанавливаются относительно нулевой точки на расстояния, соответствующие размерам настройки A_n , B_n и C_n . При выполнении размеров A_2 и B_2 оси Y_y и Z_y опорной системы координат не совпадают с осями Y и Z WCS. Следовательно, имеются условия для возникновения погрешности схемы установки по этим размерам. До рассматриваемой операции в направлении осей Y и Z ранее были выполнены размеры A_1 и B_1 с допусками TA_1 и TB_1 . Поскольку размеры настройки A_n и B_n остаются постоянными для

всей обрабатываемой партии деталей и другие погрешности в данной задаче не учитываются, то A_2 и B_2 могут изменяться только в зависимости от размера A_1 и B_1 в пределах допусков TA_1 и TB_1 .

Поскольку в направлении оси X ось X_y опорной система координат совпадает с соответствующей осью WCS, условий для возникновения погрешности схемы установки нет. Допуск на размер C_1 никак не влияет на размер C_2 .

Следовательно:

$$\Delta c_y(A_2) = TA_1, \Delta c_y(B_2) = TB_1, \Delta c_y(C_2) = 0,$$

где Δc_y – погрешности схемы установки по соответствующим размерам.

Формирование WCS, а также ее ориентация относительно установочной системы координат должно осуществляться на этапе проектного базирования. При проектном базировании необходимо минимизировать погрешность схемы установки, как меры несовпадения установочной системы координат и системы координат заготовки детали.

Однако, проведенный анализ не выявил формализованных методик формирования WCS. В ин-

формационных источниках лишь приводятся общие рекомендации, заключающиеся в необходимости использовать в качестве ноля детали верхних доступных для инструмента поверхностей, поверхностей

сопрягаемых с неподвижными поверхностями приспособлений или пересекающихся опорных поверхностей [8–10].

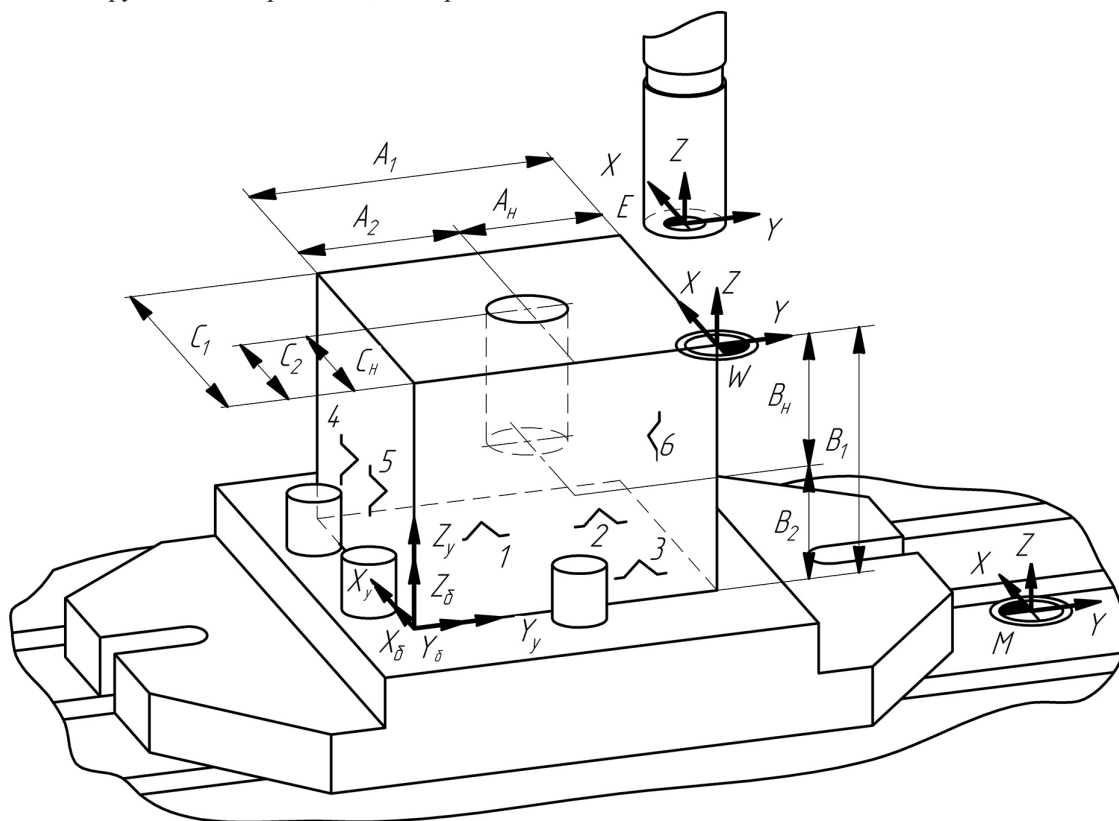


Рисунок 2 – Влияние размещения WCS на обеспечение точности линейных размеров

Figure 2 – Effect of WCS placement on linear dimensional accuracy

При решении задачи автоматизированного формирования WCS, а также определения состава установочных и установочно-зажимных элементов приспособлений для обеспечения точности расположения конструктивных элементов оригинальных деталей в субтрактивном машиностроительном производстве на фрезерных ОЦ предлагается использовать положения автоматизированного проектного базирования [1].

В основе разработанного алгоритмического обеспечения СППР лежит следующая последовательность вспомогательных алгоритмов:

- 1) построения модели структуры геометрических связей модулей функциональных поверхностей заготовок на операции обработки;
- 2) определения базовых поверхностей;
- 3) идентификации состава баз ориентации;
- 4) определения приоритета в обеспечении допусков;

5) привязки геометрических связей к элементам состава баз (задается WCS или базовая система координат $X_\delta Y_\delta Z_\delta$) (рис. 2);

6) определение состава установочных и (или) установочно-зажимных элементов модели базирования (определяется система координат $X_y Y_y Z_y$) (рис. 2).

Реализация вспомогательного алгоритма (подалгоритма) 1 предусматривает корректное задание линейных размеров и допусков расположения на геометрической модели детали. Работа подалгоритма основана на выборе компоновочной схемы фрезерного обрабатывающего центра, а также формировании массивов данных о выдерживаемых на операции размерах и допусках расположения на основе принципа единства конструкторских и технологических баз (рис. 3).

Оперирование размерными параметрами осуществляется с помощью неориентированных графов типа дерева линейных размерных связей (обозначен-

с помощью матрицы смежности $R_{(x,y,z)}^{cm} = \|r_{i,j}\|_{m \times m}$,

$$r_{i,j} = \begin{cases} v_k, & \text{если вершина } \bar{n}_i \text{ соединена с вершиной } \bar{n}_j \text{ ребром;} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $v_k = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)$ – ребро, соединяющее вершины $\bar{n}_i$ и $\bar{n}_j$ (в матрицу записывается $A(T)$ – соответствующий линейный размер и допуск; m – число вершин).

Под видом поверхности понимается: плоскость (явная или симметрии); ось и плоскость, связанная с осью (в частности к плоскости симметрии); плоскость, проходящая через оси двух отверстий (в частности плоскости симметрии).

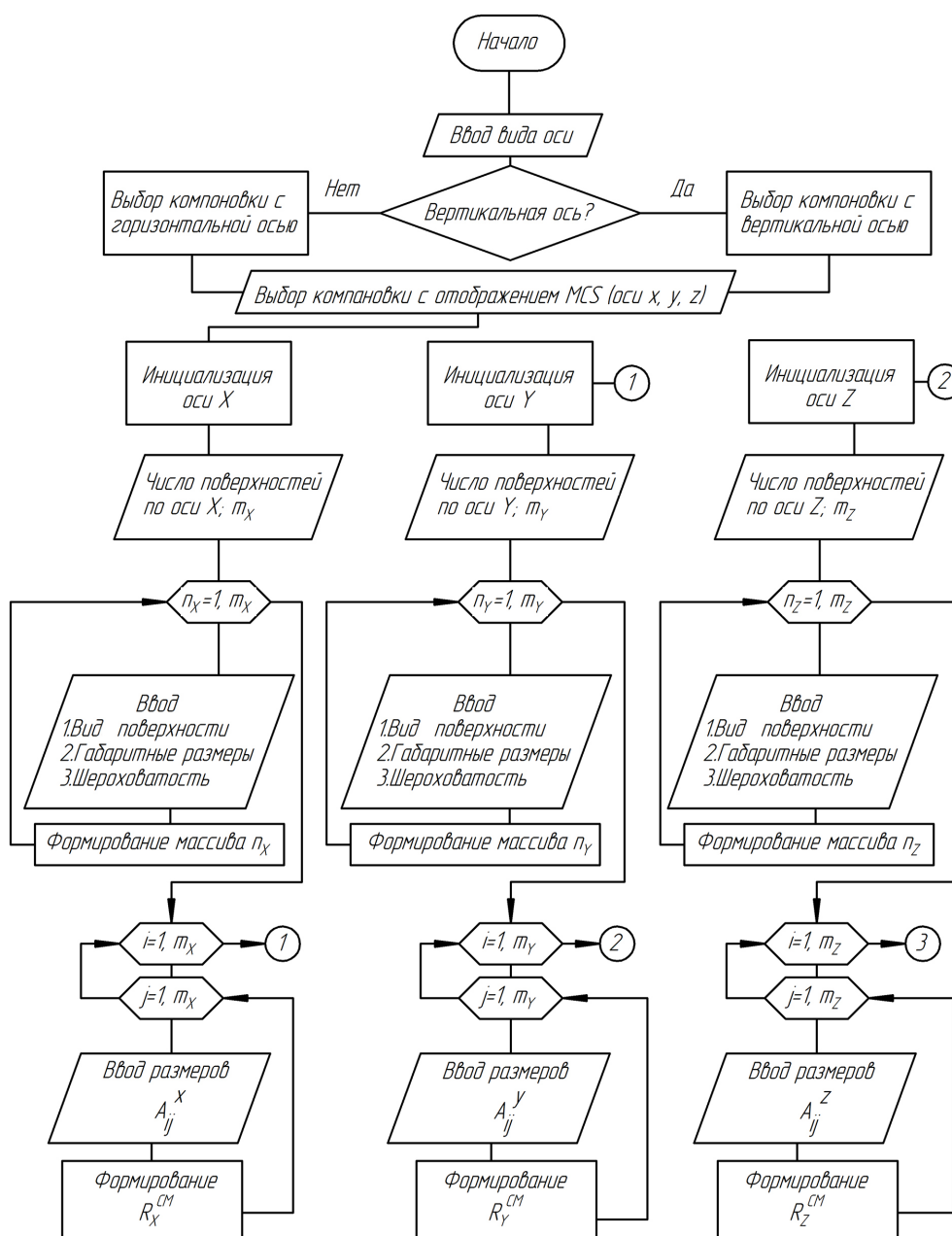


Рисунок 3 – Блок-схема подалгоритма построения модели структуры геометрических связей модулей функциональных поверхностей заготовок на операции обработки

Figure 3 – Block diagram of the sub-algorithm for constructing a model of the structure of geometric relationships of the modules of functional surfaces of workpieces during processing operations

Оперирование угловыми параметрами осуществляется с помощью графов допусков расположения U . Графы формируются согласно принципам однозначности и корректности задания ориентации элементов конструкции относительно того или иного состава баз ориентации и представляются матрицей инцидентности. Матрица представляет собой прямоугольную таблицу $U = \|u_{i,j}\|_{m \times l}$, элементы которой образуются по правилу:

$$u_{i,j} = \begin{cases} y_l, & \text{если ребро } y_l \text{ выходит из вершины } \bar{n}_m; \\ -y_l, & \text{если ребро } y_l \text{ входит в вершину } \bar{n}_m; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

где $y_l = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_j \rangle$ дуга графа, соединяющая вершину i с вершиной j (в матрицу записывается T – соответствующий допуск углового расположения); m – число вершин; l – число рёбер.

Подалгоритм 2 предполагает выполнение последовательности процедур совместного анализа указанных выше массивов данных для формирования возможных составов баз ориентации (рис. 4).

Подалгоритм 3 включает в себя анализ поверхностей согласно сформированным перечням для определения принадлежности состава к одному из четырех их видов.

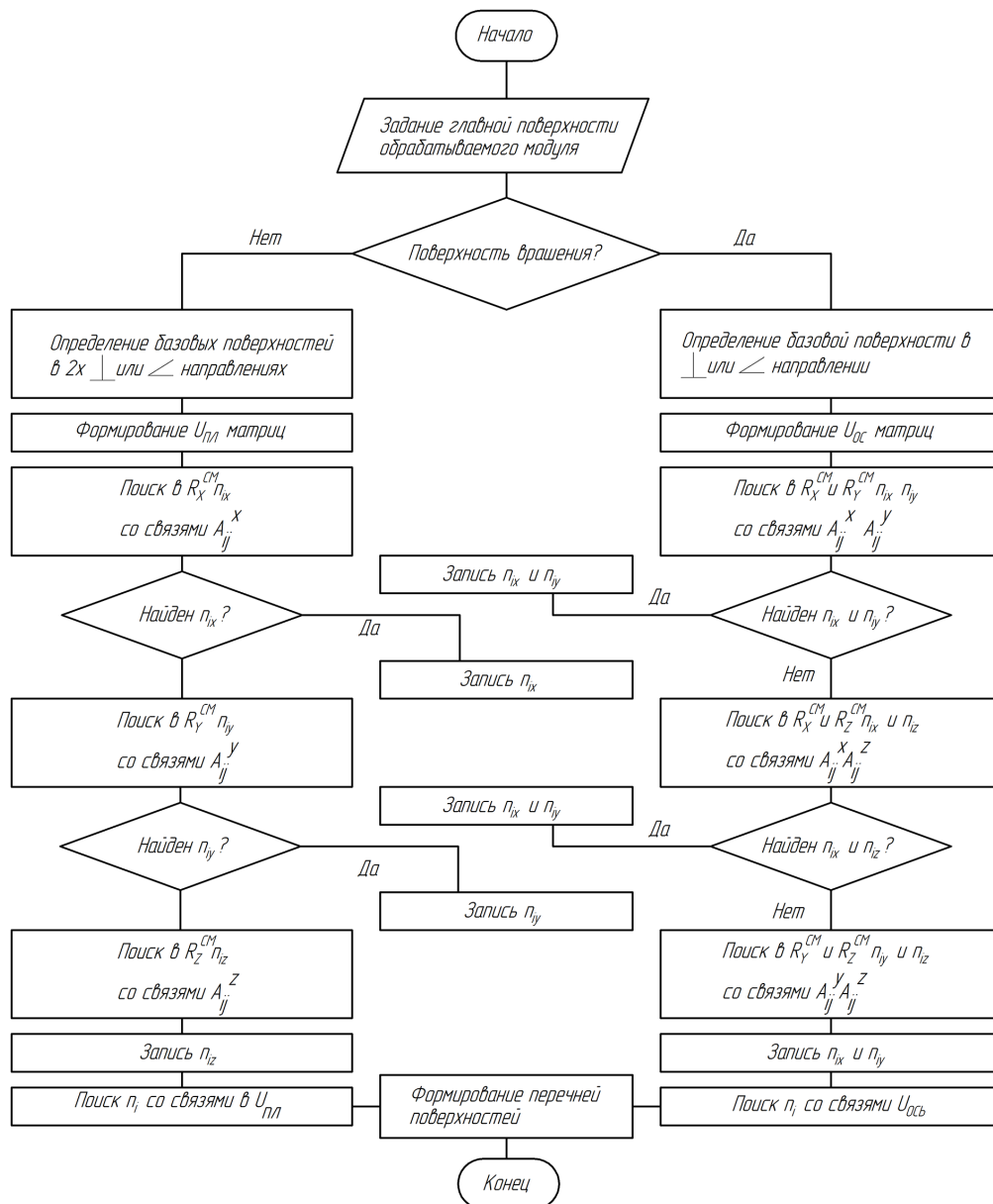


Рисунок 4 – Блок-схема подалгоритма определения базовых поверхностей

Figure 4 – Block diagram of the sub-algorithm for determining base surfaces

Для реализации подалгоритма 4 разработана формализованная методика ранжирования численных значений допусков размеров и расположения по компонентам состава баз. При реализации методики осуществляется приведение допусков к од-

ной базовой длине, определение значений удельных допусков и определение главной (главных) базы в зависимости от их значений. Численные значения неуказанных допусков определяются по ГОСТ 25069 (рис. 5).

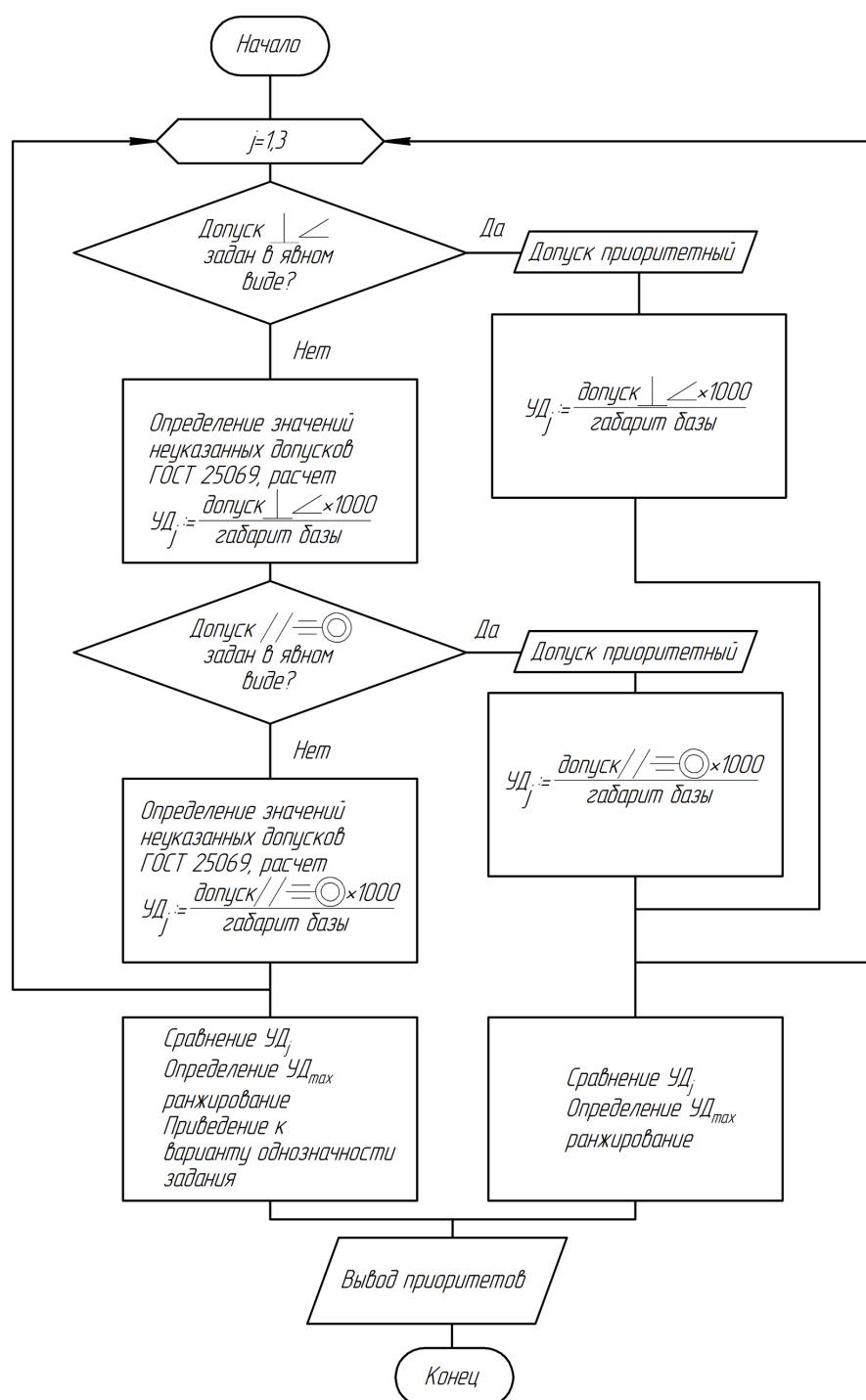


Рисунок 5 – Блок-схема подалгоритма определения приоритета в обеспечении допусков

Figure 5 – Block diagram of the sub-algorithm for determining the priority in ensuring tolerances

Суть привязки геометрических связей к элементам состава баз (подалгоритм 5) заключается в использовании массива производственных моделей, со-

ответствующих вариантам однозначного задания расположения обрабатываемых функциональных поверхностей относительно главной базы (рис. 6).

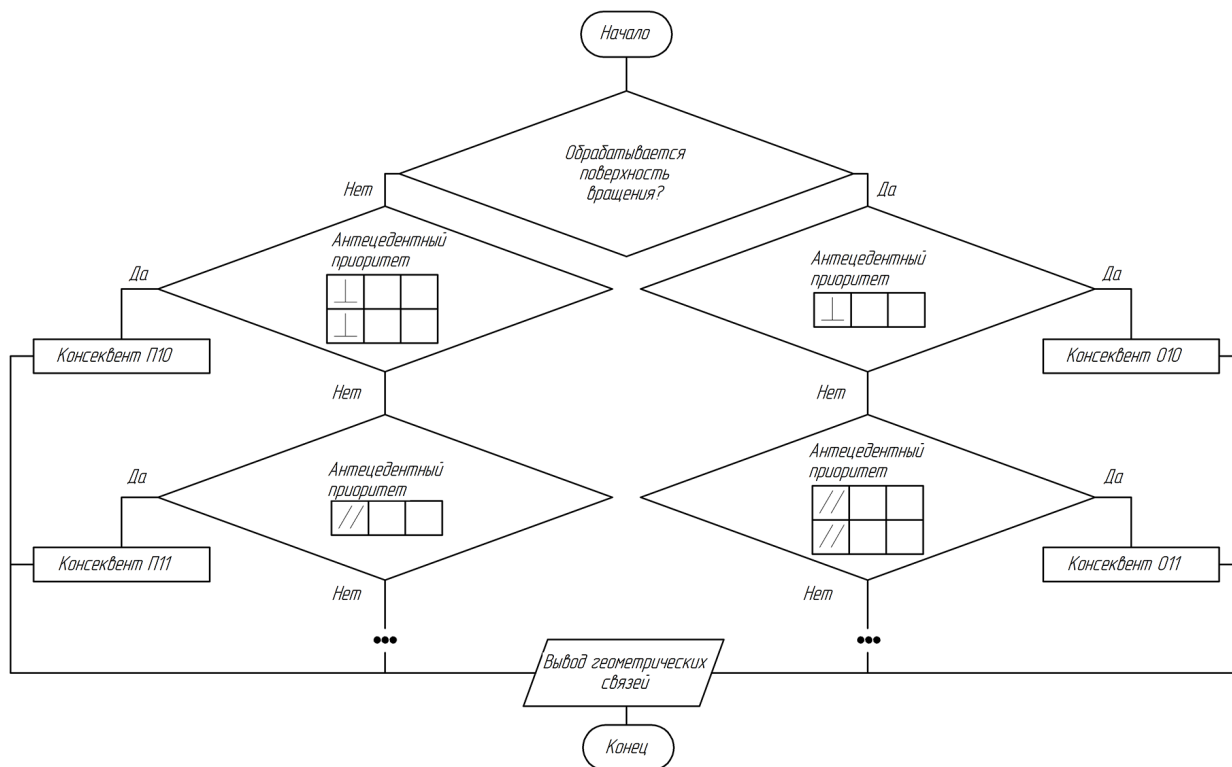


Рисунок 6 – Блок-схема подалгоритма привязки геометрических связей к элементам состава баз

Figure 6 – Block diagram of the sub-algorithm for linking geometric relationships to elements of the base composition

Структура массива полностью соответствует структуре схемы вариантов корректного задания допусков расположения относительно составов баз. Каждому антеcedенту в виде варианта задания приоритетного допуска ставится в соответствие консеквент в виде рекомендаций по определению геометрических связей, накладываемых базой. Так, например, антеcedенту О10 (приоритетным является допуск перпендикулярности оси относительно плоскости и при этом допуск линейного размера относительно другой меньше допуска линейного размера относительно третьей) соответствует консеквент: первая плоскость назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, вторая плоскость – двойной однонаправленной (направляющей), третья плоскость – одиночной (опорной).

Подалгоритм 6 содержит метод типовых технических решений, при реализации которого элементы геометрических связей составов баз заменяются соответствующими установочными и (или) установочно-зажимными элементами модели базиро-

вания. Замену указанных элементов предлагается осуществлять с помощью разработанных массивов соответствия и сокращения вариантов технических решений.

Программное обеспечение системы разработано с использованием стандартных элементов и математических функций языков Python и C++. Интерфейс программного обеспечения представляет собой систему взаимосвязанных диалоговых окон и вкладок для ввода исходных данных, а также вывода результатов.

В начале работы системы для реализации подалгоритма 1 пользователю предлагается последовательность диалоговых окон для определения вида ОЦ (с горизонтальным расположением шпинделя НМС или ОЦ с вертикальным расположением шпинделя VMC), его компоновки и определения системы координат MCS. Для реализации принципа единства конструкторских и технологических баз далее предусматривается введение информации о геометрической модели заготовки на операции в

виде задания поверхностей и их размерных связей по осям MCS, а также допусков расположения согласно их простановки на чертеже. Для этого реализуется концепция отображения поверхностей трехмерной модели в виде стандартных примитивов и дальнейшего обозначения поверхностей по соответствующим осям с помощью их нумерации. Исходное диалоговое окно для введения сведений о геометрической модели заготовки детали пред-

усматривает создания примитива (прямой многогранник, призма, цилиндр, фигура по векторам) с выводом запрашиваемых сведений. В результате примитивы отображаются в соответствующих плоскостях MCS для дальнейшего ввода номеров поверхностей и задание размерных связей и допусков расположения. Некоторые окна для ввода исходной информации приведены на рисунке 7.

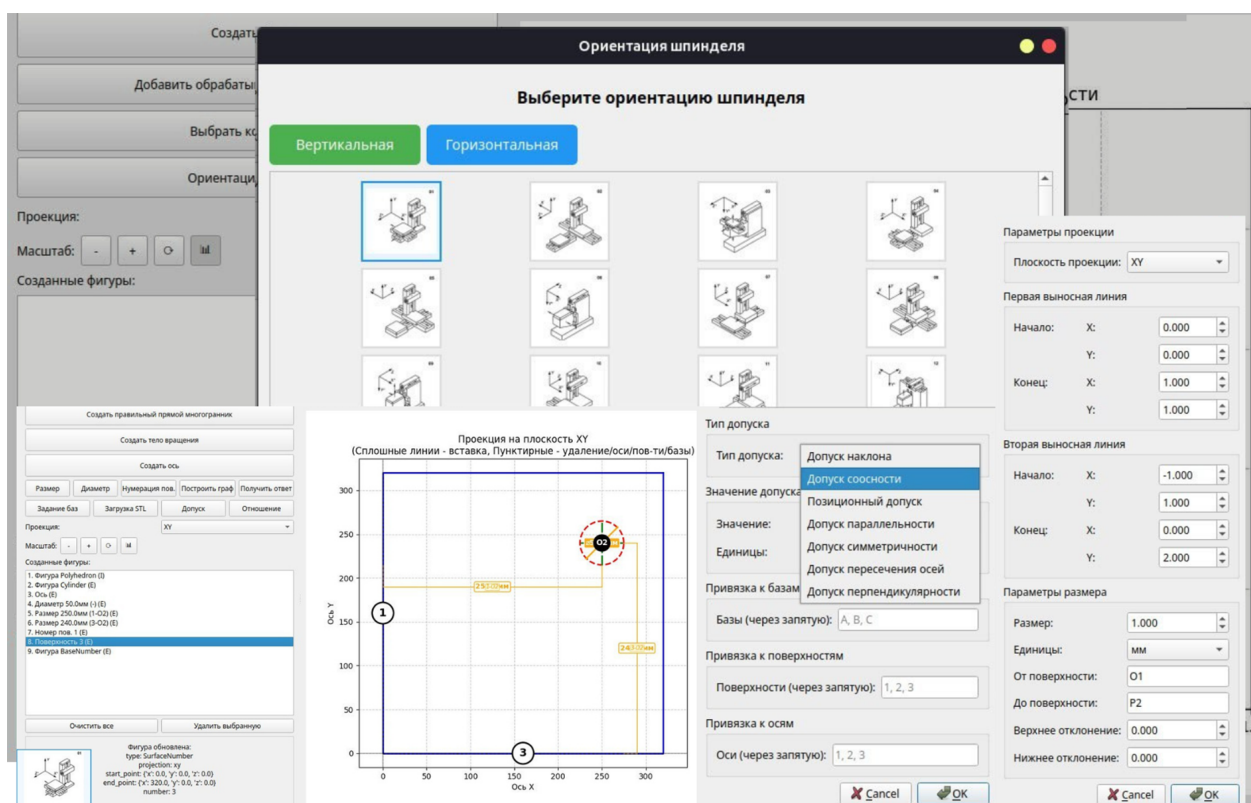


Рисунок 7 – Интерфейсы выбора компоновки ОЦ, системы координат MCS, создания геометрической модели с размерами и допусками расположения

Figure 7 – Interfaces for selecting the layout of the OC, the MCS coordinate system, creating a geometric model with dimensions and location tolerances

На рисунке 8 показан пример реализации подалгоритмов 5 и 6 в виде указания на поверхностях геометрической модели заготовки условных значков, интерпретирующих геометрические связи на поверхностях составов баз ориентации и рекомендуемых условных обозначений установочных элементов на поверхностях составов баз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа методов ориентации заготовок в рабочей зоне обрабатывающих центров предложен

подход к формированию системы координат детали WCS, а также определению состава установочных и установочно-зажимных элементов приспособлений для обеспечения точности расположения конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей в серийном машиностроительном производстве, позволяющий формализовать процедуры проектного базирования. Использование теории алгоритмов, автоматизации проектирования и информационных технологий позволило реализовать эти процедуры в виде системы поддержки принятия решений.

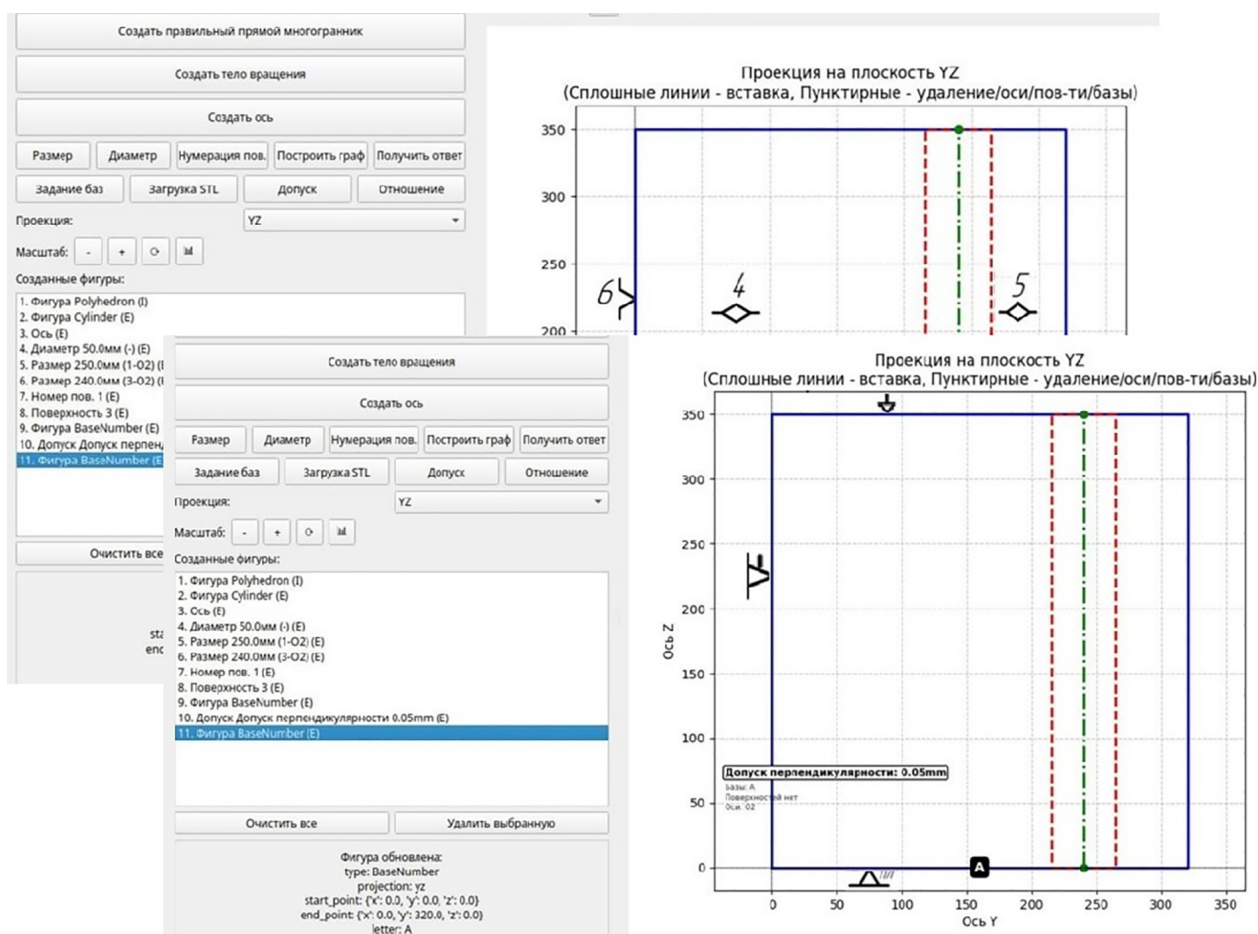


Рисунок 8 – Интерфейсы вывода информации о геометрических связях на поверхностях баз и состав установочных элементов

Figure 8 – Interfaces for outputting information about geometric relationships on base surfaces and the composition of installation elements

Использование системы в учебном процессе показало ее эффективность для сокращения сроков разработки и оформления технологических процессов изготовления деталей, повышения качества проектных решений по выбору (разработке) станочных приспособлений, что дает возможность повышения производительности труда технологов и снижения количества ошибок на этапе внедрения технологии.

Разработки могут использоваться:

- в технологических отделах машинострои-

тельных предприятий для проектирования операций изготовления деталей на фрезерных обрабатывающих центрах;

- в конструкторских бюро для проектирования станочных приспособлений;
- в организациях, специализирующихся на разработке и совершенствовании CAPP/CAM/CAFD-систем;
- в учебном процессе для подготовки специалистов в области машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков, Н. В. Основы автоматизированного проектного базирования в субтрактивном и аддитивном машиностроительных производствах : монография / Н. В. Беляков, Н. Н. Попок ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2023. – 183 с. https://rep.vstu.by/bitstream/handle/123456789/17987/Beliakov_Osnovy_avtomatizir_proektnogo_bazir.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
2. Лутова, Е. В. Методы автоматизированного выбора технологических баз и схем закрепления для корпусных деталей при 2,5 координатной обработке на фрезерных станках с ЧПУ / Е. В. Лутова // *Известия вузов. Северо-кавказский регион. Технические науки*. – 2011. – № 5. – С. 42–46. <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-avtomatizirovannogo-vybora-tehnologicheskikh-baz-i-schem-zakrepleniya-dlya-korpusnykh-detaley-pri-2-5-koordinatnoy-obrabotke-na>.
3. Boyle, I. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches / I. Boyle, R. Rong, D. C. Brown // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2011. – № 27. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.rcim.2010.05.008.
4. Bakker, O. J. Active fixturing: literature review and future research directions / O. J. Bakker, T. N. Papastathis, A. A. Popov, S. M. Ratchev // *International Journal of Production Research*. – 2013. – Vol. 51. – № 11. – P. 3171–3190. – DOI:10.1080/00207543.2012.695893.
5. Gothwal, S. Different aspects in design and development of flexible fixtures: Review and future directions / S. Gothwal, T. Raj // *International Journal of Services and Operations Management*. – 2017. – Vol. 26. – № 3. – P. 386–410. – DOI:10.1504/IJSOM.2017.081944.
6. Сахаров, А. В. Определение технологических возможностей вертикального фрезерного обрабатывающего центра / А. В. Сахаров // *Станкоинструмент*. – 2020. – № 4 (021). – С. 48–52. – DOI: 10.22184/2499-9407.2020.21.04.48.52.
7. Аверьянов, Е. В. Инновации в отечественном станкостроении: модельный ряд вертикально-фрезерных обрабатывающих центров / Е. В. Аверьянов, А. К. Бокач, А. Е. Ковалев, А. Э. Шалдов // *Инновации*. – 2016. – № 8 (214). – С. 71–77. <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsii-v-otchestvennom-stankostroenii-modelnyy-ryad-vertikalno-frezernykh-obrabatyvayuschih-tsentrov>.
8. Ловыгин, А. А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система : практическое пособие / А. А. Ловыгин, Л. В. Теворовский. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 280 с.
9. Vukelic, D. Intelligent design and optimization of machining fixtures / D. Vukelic, G. Simunovic et al. // *Tehnički vjesnik*. – 2016. – № 23(5). – P. 1325–1334. – DOI: 10.17559/TV-20150908142130.
10. Meraz, M. M. Localization of the work coordinate system using computer vision and geometric transformations on three-axis cnc milling machines / M. M. Meraz, L. J. Duarte, C. L. Hernández // *EAI Endorsed Transactions on AI and Robotics*. – 2025. – Vol. 4. – P. 1–14. – DOI:10.4108/airo.9898.
11. Чегринец, Е. Г. CAD/CAM/CAE системы, OMW-технологии и нейросетевые алгоритмы анализа данных на предприятиях авиастроительной отрасли. – Текст : электронный // Е. Г. Чегринец, А. В. Верченко // *Труды МАИ*. – 2019. – № 104. – С. 1–26. – URL https://trudymai.ru/upload/iblock/aeb/CHigrinets_Verchenko_rus.pdf?lang=ru&issue=104. (дата обращения: 21.03.2026).
12. Petrakov, Y. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine / Y. Petrakov, D. Shuplietsov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – № 2(1 (98)). – P. 54–60. – DOI:10.15587/1729-4061.2019.162673.
13. Киселёв, Е. С. Применение быстросменных палетных систем нулевого базирования для увеличения производительности предприятий / Е. С. Киселёв, К. С. Жирухин // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. – 2024. – № 4(87). – С. 38–45. <https://ptsmdonntu.ru/article/view/350/333>.
14. Кротов, С. Н. Системы быстрого базирования и предъявляемые к ним требования на примере SCHUNK VERO-S / С. Н. Кротов // *Станкоинструмент*. – 2016. – № 4. – С. 70–74. https://www.stankoinst.ru/files/article_pdf/5/article_5749_435.pdf.

REFERENCES

1. Belyakov NV, Popok NN. Osnovy avtomatizirovannogo proektnogo bazirovaniya v subtraktivnom i additivnom mashinostroitel'nykh proizvodstvakh : monografiya = Fundamentals of automated design basing in subtractive and additive mechanical engineering production: monograph. Vitebsk: UO «VGTU»; 2023:183. https://rep.vstu.by/bitstream/handle/123456789/17987/Beliakov_Osnovy_avtomatizir_proektnogo_bazir.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
2. Lutova EV. Methods for automated selection of technological bases and fastening schemes for

body parts during 2.5-coordinate machining on CNC milling machines. *Izvestiya vuzov. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2011;5:42–46. <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-avtomatizirovannogo-vybora-tehnologicheskikh-baz-i-shem-zakrepleniya-dlya-korpusnyh-detaley-pri-2-5-koordinatnoy-obrabotke-na>.

3. Boyle IA, Rong R, Brown DC. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches/ *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2011;27:1–12. – DOI: 10.1016/j.rcim.2010.05.008.

4. Bakker OJ, Papastathis TN, Popov AA, Ratchev SM. Active fixturing: literature review and future research directions. *International Journal of Production Research*. 2013;51(11):3171–3190. – DOI:10.1080/00207543.2012.695893.

5. Gothwal S, Raj T. Different aspects in design and development of flexible fixtures: Review and future directions. *International Journal of Services and Operations Management*. 2017;26(3):386–410. – DOI:10.1504/IJSOM.2017.081944.

6. Sakharov AV. Determination of the technological capabilities of a vertical milling machining center. *Stankoinstrument*. 2020;4(021):48–52. – DOI: 10.22184/2499-9407.2020.21.04.48.52

7. Aver'yanov EV, Bokach AK, Kovalev AE, Shaldov AE. Innovations in the domestic machine tool industry: a range of vertical milling machining centers. *Innovatsii = Innovations*. 2016;8(214):71–77. <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsii-v-otechestvennom-stankostroenii-modelnyy-ryad-vertikalno-frezernykh-obrabatyvayushchih-tsentrov>.

8. Lovygin AA, Teverovskiy LV. Sovremennyy stanok s ChPU i CAD/CAM-sistema : prakticheskoe posobie = Modern CNC Machine and CAD/CAM

System: A Practical Guide. Moscow: DMK Press; 2018:280.

9. Vukelic D, Simunovic G et al. Intelligent design and optimization of machining fixtures. *Tehnički vjesnik*. 2016;23(5):1325–1334. – DOI: 10.17559/TV-20150908142130.

10. Meraz MM, Duarte LJ, Hernández CL. Localization of the work coordinate system using computer vision and geometric transformations on three-axis cnc milling machines. *EAI Endorsed Transactions on AI and Robotics*. 2025;4: 1–14. – DOI:10.4108/airo.9898.

11. Chegrinets EG, Verchenko AV. CAD/CAM/CAE systems, OMW technologies and neural network algorithms for data analysis in the aircraft manufacturing industry. *Trudy MAI*. 2019;104: 1–26. Available from: https://trudymai.ru/upload/iblock/aeb/CHigrinets_Verchenko_rus.pdf?lang=ru&issue=104. [Accessed 21 March 2026].

12. Petrakov Y., Shuplietsov D. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019;2(1 (98)): 54–60. – DOI:10.15587/1729-4061.2019.162673.

13. Kiselev ES, Zhirukhin KS. Using zero-based quick-change pallet systems to increase enterprise productivity. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*. 2024;4(87):38–45. <https://ptsmdonntu.ru/article/view/350/333>.

14. Krotov SN. Rapid deployment systems and the requirements placed on them, using the example of SCHUNK VERO-S. *Stankoinstrument*. 2016;4: 70–74. https://www.stankoinst.ru/files/article_pdf/5/article_5749_435.pdf.

Сведения об авторах

Беляков Николай Владимирович

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения учреждения образования «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск, Республика Беларусь

E-mail: nikolay_belyakov@mail.ru

Попок Николай Николаевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроительного производства учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь

E-mail: n.popok@psu.by

Information about the authors

Nikolay V. Belyakov

Cand. Sc. in Engineering, Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department of Technology of the Educational Institution «Vitebsk State Technological University», Vitebsk, Republic of Belarus

E-mail: nikolay_belyakov@mail.ru

Nikolay N. Popok

D. Sc. in Eng., Prof., Head of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production of the Educational Institution «EuphrosynePolotskaya State University of Polotsk», Novopolotsk, Republic of Belarus

E-mail: n.popok@psu.by

Махаринский Юрий Ефимович

Доцент кафедры технологии машиностроения учреждения образования «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск, Республика Беларусь

E-mail: maharinsky1957@gmail.com

Якушев Максим Александрович

Студент учреждения образования «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск, Республика Беларусь

E-mail: maxcrashemulator@gmail.com

Станкевич Александр Павлович

Студент учреждения образования «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск, Республика Беларусь

E-mail: stankevichaleks24@gmail.com

Yuri E. Makharinsky

Associate Professor of the Department of Technology of the Educational Institution «Vitebsk State Technological University», Vitebsk, Republic of Belarus

E-mail: maharinsky1957@gmail.com

Maxim A. Yakushev

Student of the Educational Institution «Vitebsk State Technological University», Vitebsk, Republic of Belarus

E-mail: maxcrashemulator@gmail.com

Alexander P. Stankevich

Student of the Educational Institution «Vitebsk State Technological University», Vitebsk, Republic of Belarus

E-mail: stankevichaleks24@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.04.2026.