

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное учреждение
высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»

В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СЕМАНТИЧЕСКИЕ СЕТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
<http://e.biblio.bru.by/xmlui/>



Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2015

УДК 621.91.01

Рекомендовано к изданию Советом Белорусско-Российского университета
«28» ноября 2014 г., протокол № 3

Рецензенты :

д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Технология машиностроения»
Белорусского национального технического университета *Ж. А. Мрочек* ;
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Автоматизация технологических
процессов и производств» Могилевского государственного университета
продовольствия *М. М. Кожевников*

Пашкевич, В. М.

Функциональные семантические сети для обеспечения
точности механической обработки : монография / В. М. Паш-
кевич, М. Н. Миронова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. –
210 с. : ил.

ISBN 978-985-492-143-3.

В монографии рассмотрены вопросы обеспечения точности
механической обработки деталей машин на основе подхода, базирую-
щегося на технологиях функциональных семантических сетей, а также
возможность применения функциональных семантических сетей для
расчета параметров станочных приспособлений.

Монография предназначена для научных работников, занимаю-
щихся вопросами изучения точности механической обработки, а также
специалистов-технологов, которые могут использовать разработанные
авторами программные средства для управления процессами изготов-
ления изделий машиностроения и проектирования оптимальной техно-
логической оснастки.

УДК 621.91.01

ISBN 978-985-492-143-3

© Пашкевич В. М., Миронова М. Н., 2015
© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2015

Введение

Обеспечение точности механической обработки является актуальной задачей технологии машиностроения, решение которой гарантирует точность работы механизмов и машин, их износостойкость, надежность и долговечность. Повышение точности механической обработки упрощает пригоночные работы при сборке, позволяет осуществить принцип взаимозаменяемости деталей и узлов, вести поточную сборку, что не только сокращает ее трудоемкость, но также облегчает и удешевляет проведение ремонта машин в условиях их эксплуатации.

В настоящее время обеспечение точности обработки ведется в трех направлениях: за счет улучшения качества технологической системы; на основе устранения факторов, порождающих погрешности обработки; путем управления процессом обработки.

Улучшение качества технологической системы и снижение погрешности обработки достигаются, в основном, за счет повышения жесткости, виброустойчивости, износостойкости оборудования, а также требований к качеству изготовления режущих инструментов. Это связано с большими затратами, а потому не всегда эффективно.

Ввиду этого управление процессом механической обработки представляется наиболее эффективным методом обеспечения требуемой точности. В то же время современные методы управления не в полной мере учитывают текущее состояние технологического оборудования, а также функциональные взаимосвязи между параметрами обработки и технологической оснастки.

Альтернативу таким подходам могут составить методы, позволяющие обеспечить наибольший запас точности обработки на основе решения задачи многофакторной оптимизации технологических процессов, в том числе на базе методов искусственного интеллекта. Решение должно обусловить комплексный подход к обеспечению точности и осуществить многофакторную оптимизацию как параметров технологического процесса, так и технологической оснастки.

Важность такого подхода объясняется и тем, что точность механической обработки при применении метода автоматического получения размеров на настроенном станке в значительной степени зависит от станочного приспособления, его точности, а также способности сохранить ее в процессе обработки. Выбор рациональной системы закрепления заготовок в приспособлениях также повышает качество изготовления изделия, т. к. уменьшает перемещения заготовок относительно

установочных элементов и за счет этого снижает погрешность закрепления.

Кроме того, на современных предприятиях машиностроения до 90 % организационно-технологических мероприятий, направленных на обеспечение точности механической обработки, связано с изготовлением новых видов приспособлений, т. к. смена оборудования в производстве происходит в среднем через 6...8 лет. В результате, наряду с высокопроизводительными современными станками, эксплуатируются и станки устаревших моделей, на которых затруднительно получить высокую точность обработки, а также приспособления, имеющие относительно низкие эксплуатационные показатели. Данное обстоятельство требует учета фактического состояния станочного оборудования и точности его изготовления.

Таким образом, точность обработки должна обеспечивать также и решение подзадачи – оптимального проектирования станочных приспособлений, учитывающее фактическое состояние технологического оборудования и его взаимосвязи с параметрами технологического процесса.

Средством многофакторной оптимизации параметров технологического процесса и оснастки могут стать интеллектуальные системы, использующие технологии функциональных семантических сетей. Такие системы обладают существенным преимуществом по сравнению с традиционными программными средствами. В отличие от принятого в традиционном программировании подхода, в них программа формируется самой системой. При этом жесткий алгоритм отсутствует и вырабатывается системой в процессе решения поставленной задачи. Это существенно снижает требования к квалификации конструктора, упрощает и ускоряет процесс поиска решения.

Монография отражает реализацию вышеизложенного подхода и опыт, приобретенный при решении задачи обеспечения точности обработки концевым инструментом при использовании аппарата функциональных семантических сетей на кафедре «Технология машиностроения» Белорусско-Российского университета (г. Могилев, Республика Беларусь).

1 Функциональные семантические сети

1.1 Функциональные семантические сети как способ представления знаний

Одним из методов представления знаний в интеллектуальных системах являются семантические сети, в которых знания отражаются в виде совокупности понятий и отношений между ними в некоторой предметной области [1; 2].

В зависимости от типов отношений (связей) различают: классифицирующие [3], функциональные семантические сети [4] и сценарии [5; 6].

Сети состоят из узлов и связывающих их дуг. Узлы в семантической сети соответствуют объектам, параметрам или событиям. Дуги описывают отношения между узлами.

Семантическую сеть удобно изображать в виде графа, в котором вершины отображают понятия, а ребра или дуги – отношения между ними. Таким образом, семантическую сеть можно представить тройкой объектов (V, E, θ) , где V – множество вершин графа; E – множество ребер; θ – функция инцидентности, которая каждому элементу множества E ставит в соответствие пару элементов из множества V [7].

У функциональной семантической сети множество вершин V является объединением непересекающихся подмножеств P и R , т. е.

$$V = P \cup R, \quad (1.1)$$

где P – множество параметров рассчитываемых задач, в том числе исходные данные;

R – множество отношений, определяющих расчетные зависимости решаемых с помощью семантической сети задач.

$$R_i = \{ f(P_1, \dots, P_j) = 0 \}, \quad (1.2)$$

где P_i – элемент множества параметров сети P ;

R_i – i -е отношение сети, определяющее функциональные зависимости между параметрами P_1, \dots, P_j и имеющее вид $f(P_1, \dots, P_j) = 0$.

На рисунке 1.1 приведена возможная структура функциональной семантической сети, представляющей собой в общем случае двудольный граф и состоящей из N отношений и M параметров. Здесь вершины-кружки являются параметрами проектируемой системы, а вершины-прямо-

угольники содержат расчетные зависимости (отношения).

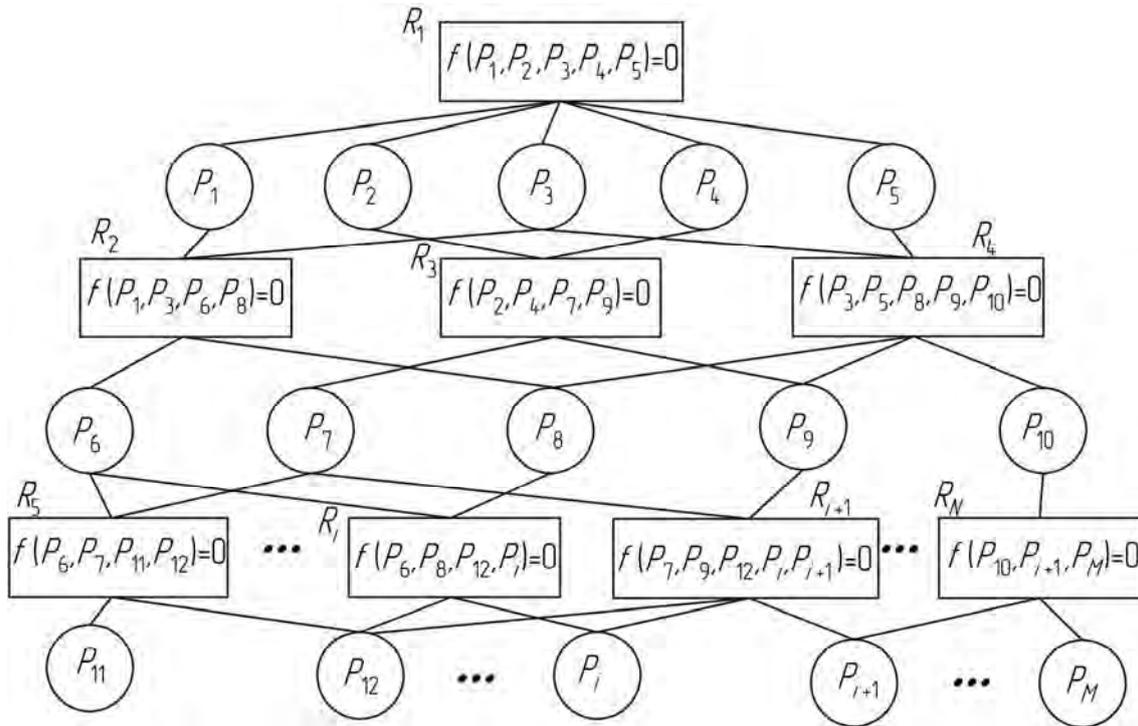


Рисунок 1.1 – Пример структуры функциональной семантической сети

Для двудольного графа функция инцидентности имеет вид [8]:

$$\theta(e) = \{ (P_i, R_j) \mid P_i \in P, R_j \in R \}. \quad (1.3)$$

Это означает, что любое ребро сети соединяет некоторую вершину из множества P с некоторой вершиной из множества R .

В функциональной семантической сети под отношением R , определенном на k своих атрибутах (значениях параметров) P_1, \dots, P_k , понимается некоторое подмножество декартова произведения доменов D_i (множеств возможных значений), т. е.

$$R(P_1, \dots, P_k) \subseteq D_1 \times \dots \times D_k, \quad (1.4)$$

где $P_j \in D_j$ ($j = 1, 2, \dots, k$).

Отношение R указывает на существование зависимостей между значениями атрибутов в пространстве, определенном декартовым произведением их доменов [4].

Любой кортеж, удовлетворяющий отношению R , является его элементом, что эквивалентно условию

$$(P_1, \dots, P_j, \dots, P_k) \in R. \quad (1.5)$$

1.2 Поиск решений в семантических сетях

Следует отметить, что функциональная семантическая сеть – неориентированный граф, т. к. только при постановке условия расчетной задачи станет известно, какие параметры являются входными, а какие выходными для отношений сети.

В связи с этим поиск решения в функциональной семантической сети можно построить следующим образом.

Выделим в кортеже какой-либо атрибут P_j , обозначив его через y . Отношение будет функциональным, если для всего множества кортежей кортежи $(P_1, \dots, P_{j-1}, P_{j+1}, \dots, P_k)$ различны. В этом случае кортежу $(P_1, \dots, P_{j-1}, P_{j+1}, \dots, P_k)$ соответствует не более одного значения $P_j = y$, такого, что $(P_1, \dots, P_j, \dots, P_k) \in R$. Следовательно, значение $P_j = y$ однозначно определяется значениями кортежа $(P_1, \dots, P_{j-1}, P_{j+1}, \dots, P_k)$ и задает функцию

$$y = F^{(P_j)}(P_1, \dots, P_{j-1}, P_{j+1}, \dots, P_k), \quad (1.6)$$

называемую разрешением функционального отношения для атрибута $P_j = y$.

При одном выделенном атрибуте y ранг отношения полагается равным единице.

Если взять отношение ранга z , то будет определено z функций, зависящих от $k-z$ переменных:

$$y_i = F_i(P_1, \dots, P_{k-z}), \quad (1.7)$$

где $i = 1, 2, \dots, z$.

Поиск решения в данном случае заключается в поиске кортежа (P_1, \dots, P_{k-z}) , удовлетворяющего одновременно всему множеству функций y_i .

В этом случае при решении конкретной задачи на семантической сети определяется минимально замкнутая подсистема отношений для

решения поставленной задачи.

Если отношение имеет только одно разрешение, то используется так называемый алгоритм паросочетаний, когда устанавливается взаимно однозначное соответствие между обоими типами вершин семантической сети.

Если же ранг отношений больше единицы, то для нахождения минимально замкнутой системы отношений, необходимой для решения поставленной задачи, требуются более сложные алгоритмы, в том числе переборные.

У отношений, входящих в минимально замкнутую систему, выявляются входы и выходы. В результате этого происходит преобразование отношений в соответствующие функции:

$$R = \{f(P_1, \dots, P_k) = 0\} \rightarrow F^{(P_i)}(P_1, \dots, P_{j-1}, P_{j+1}, \dots, P_k). \quad (1.8)$$

Пример преобразования отношения R , состоящего из k параметров, в функцию F по нахождению параметра P_i показан на рисунке 1.2.

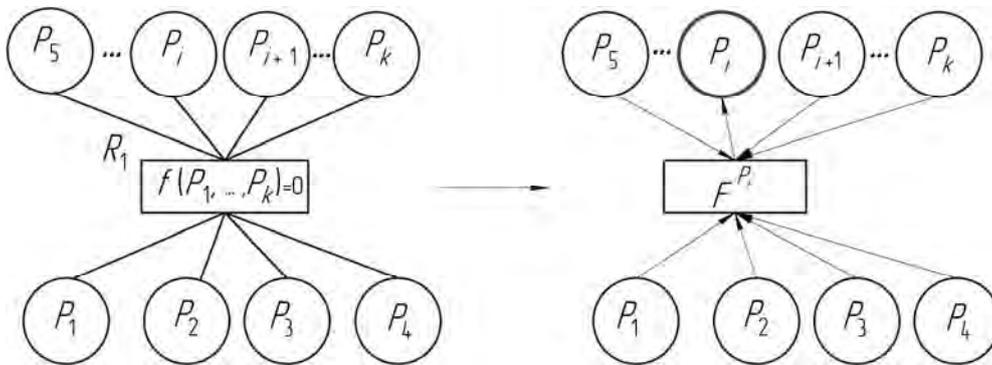


Рисунок 1.2 – Пример преобразования отношений в функции

Далее после преобразования всех отношений R в соответствующие функции F формируется цепочка функций для решения поставленной задачи (рисунок 1.3).

В результате этого происходит преобразование неориентированного двудольного графа отношений в ориентированный граф решения задачи (рисунок 1.4), в котором вершины-кружки являются параметрами проектируемой системы, а вершины-прямоугольники содержат функции, в которые отношения между параметрами проектируемой системы были преобразованы.

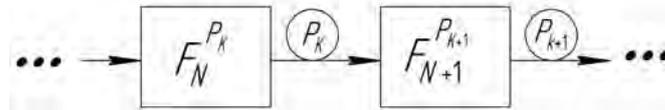


Рисунок 1.3 – Формирование цепочки функций

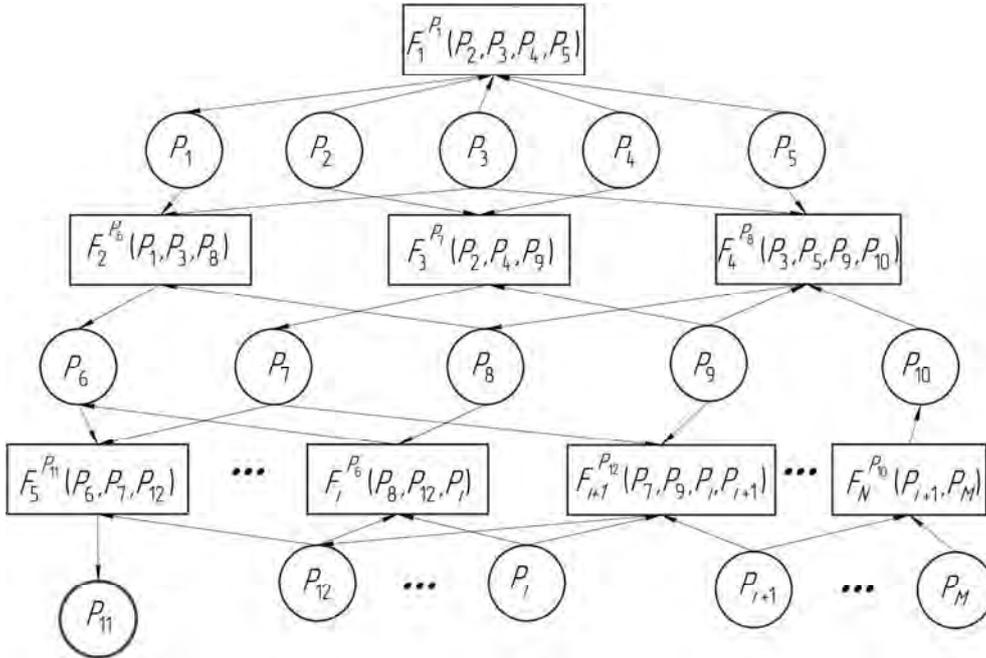


Рисунок 1.4 – Пример ориентированного графа решения задачи

Преобразование неориентированного двудольного графа отношений в ориентированный граф решения задачи не всегда происходит по линейному сценарию, при этом в цепочке функций могут появляться так называемые стыки, вилки и циклы [9; 10].

Так, например, отношения R_1 и R_3 сети, изображенной на рисунке 1.1, имеют единственные разрешения относительно параметра P_4

$$P_4 = F_1^{P_4}(P_1, P_2, P_3, P_5); \tag{1.9}$$

$$P_4 = F_3^{P_4}(P_2, P_7, P_9). \tag{1.10}$$

В этом случае параметр P_4 может быть вычислен с использованием отношений R_1 и R_3 . В результате в вершину P_4 стрелки только входят и ни одна не выходит. Образуется ситуация, называемая стыком (рисунок 1.5).



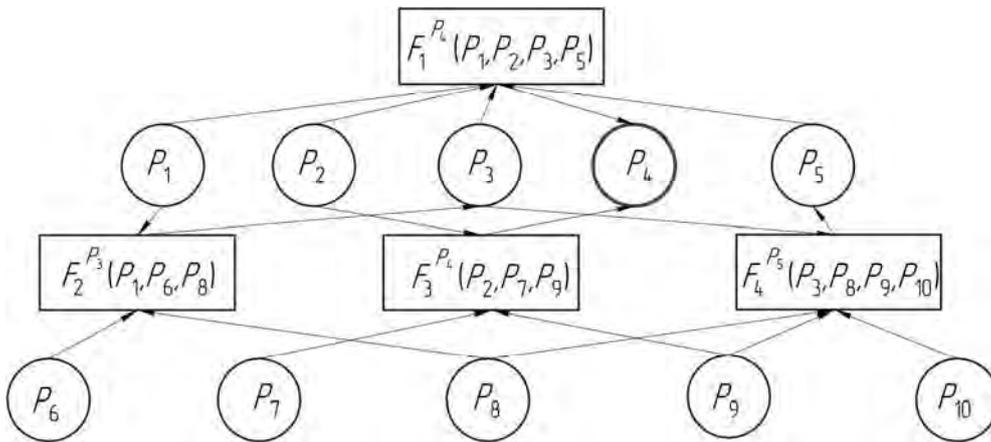


Рисунок 1.5 – Образование стыка в графе решения задачи

Проблема, связанная с образованием стыка в вершине P_4 , решается численными методами (рисунок 1.6), путем последовательных приближений (например, путем перебора) до достижения равенства

$$F_1^{P_4}(P_1, P_2, P_3, P_5) = F_3^{P_4}(P_2, P_7, P_9). \quad (1.11)$$

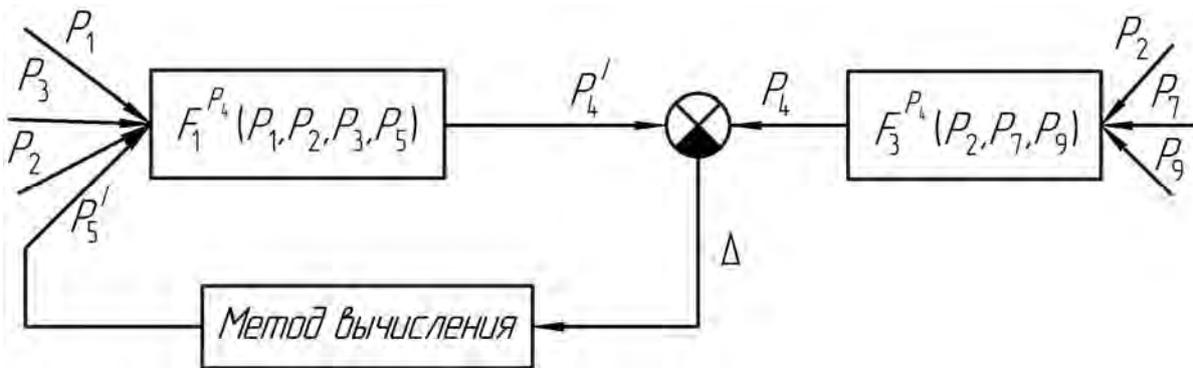


Рисунок 1.6 – Схема для определения стыка в вершине P_4

При этом разница между вычисленными значениями P_4 и P_4' должна стремиться к нулю, т. е.

$$\Delta = P_4 - P_4' \rightarrow 0. \quad (1.12)$$

Рассмотрим ситуацию возникновения вилки в ориентированном графе решения задачи. Пусть на сети, показанной на рисунке 1.4, требуется решить задачу по нахождению параметра P_7 при известных параметрах

P_1, P_2, P_4, P_6, P_8 и P_{10} . Параметр P_7 можно определить из отношений R_1, R_2, R_3 и R_4 (рисунок 1.7).

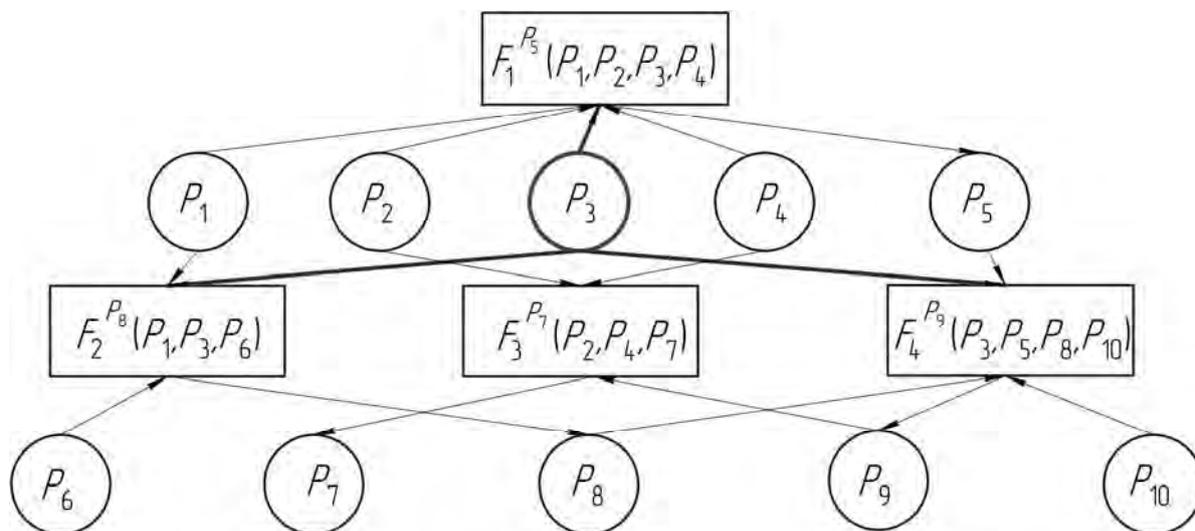


Рисунок 1.7 – Образование вилки в графе решения задачи

Эти отношения имеют следующие разрешения:

$$P_7 = F_3^{P_7}(P_2, P_4, P_9); \quad (1.13)$$

$$P_8 = F_4^{P_8}(P_3, P_5, P_9, P_{10}); \quad (1.14)$$

$$P_5 = F_1^{P_5}(P_1, P_2, P_3, P_4); \quad (1.15)$$

$$P_1 = F_2^{P_1}(P_3, P_6, P_8). \quad (1.16)$$

В данном случае образуется цепочка функций, изображенная на рисунке 1.8.

Для вычисления параметра P_7 нужно найти P_1, P_5, P_8 , для определения которых необходим параметр P_3 . Но P_3 – неизвестная величина, и не существует отношений, в которых данный параметр являлся бы разрешением. В таком случае в ориентированном графе решения задачи из вершины P_3 стрелки только выходят и ни одна не входит, что приводит к возникновению вилки в этой вершине (см. рисунок 1.7). В результате решение поставленной задачи не будет найдено.

Очевидно, что для устранения вилки в ориентированном графе необходимо задать значение параметру P_3 .

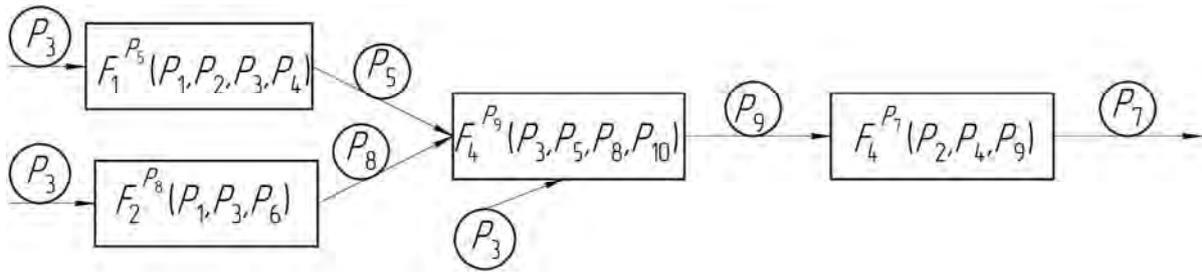


Рисунок 1.8 – Цепочка функций для нахождения параметра P_7

Еще одна ситуация, которая может возникнуть в процессе решения поставленных задач на функциональной семантической сети, – циклы.

Пусть на сети, показанной на рисунке 1.1, требуется решить задачу по нахождению параметра P_8 при известных параметрах P_2 – P_4 , P_6 , P_7 , P_9 и P_{10} .

Параметр P_8 можно определить из отношений R_1 , R_2 , и R_4 , которые имеют следующие разрешения (рисунок 1.9):

$$P_8 = F_4^{P_8}(P_3, P_5, P_9, P_{10}); \quad (1.17)$$

$$P_5 = F_1^{P_5}(P_1, P_2, P_3, P_4); \quad (1.18)$$

$$P_1 = F_2^{P_1}(P_3, P_6, P_8). \quad (1.19)$$

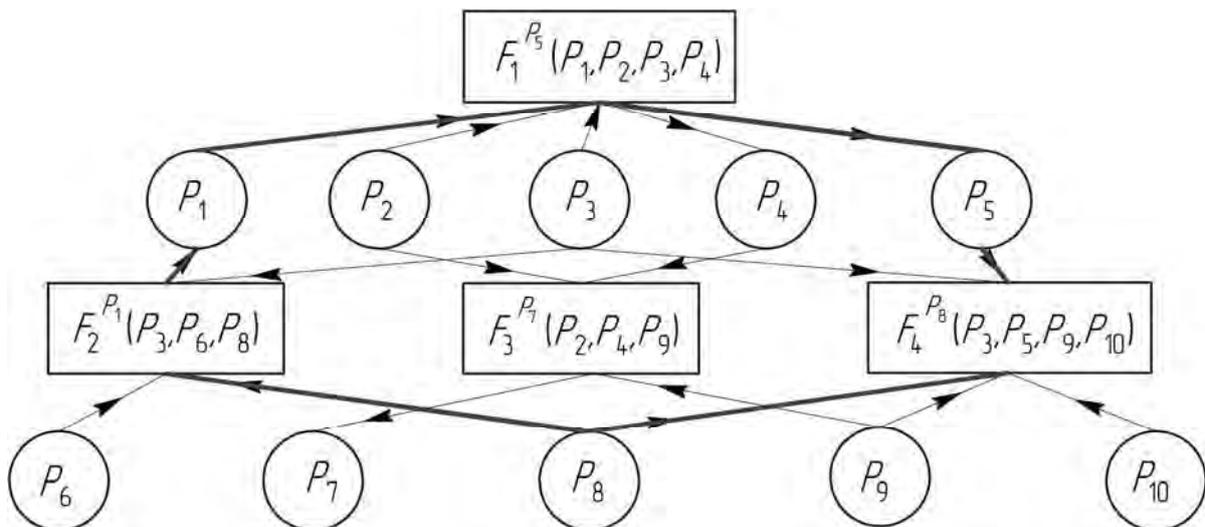


Рисунок 1.9 – Пример цикла в графе решения задачи

Подставляя P_1 в формулу для вычисления параметра P_5 , получим

$$P_5 = F_1^{P_5} (F_2^{P_1} (P_3, P_6, P_8), P_2, P_3, P_4) = F_{1.2}^{P_5} (P_2, P_3, P_4, P_6, P_8). \quad (1.20)$$

Подставив P_5 в формулу для P_8 , получим

$$P_8 = F_4^{P_8} (P_3, F_{1.2}^{P_5} (P_2, P_3, P_4, P_6, P_8), P_9, P_{10}) = F_{4.1.2}^{P_8} (P_2, P_3, P_4, P_6, P_8, P_9, P_{10}). \quad (1.21)$$

В результате имеем цикл, когда для определения параметра P_8 необходимо найти тот же параметр P_8 .

При этом возникает обратная связь (рисунок 1.10), для размыкания которой нужно найти так называемую неподвижную точку, т. е. такое значение параметра P_8 при известных значениях параметров P_5 или P_1 , когда будет удовлетворяться равенство

$$P_8 = F_{4.1.2}^{P_8} (P_2, P_3, P_4, P_6, P_8, P_9, P_{10}). \quad (1.22)$$

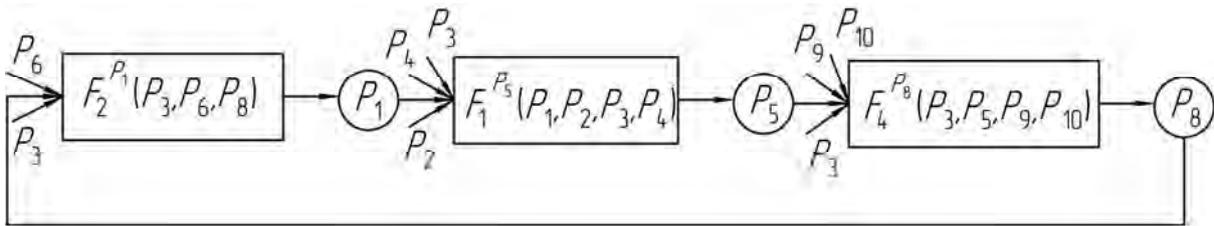


Рисунок 1.10 – Пример цикла в графе

Очевидно также, что избежать циклов можно дополнением сети новыми отношениями или вводом дополнительных исходных данных.

Таким образом, при решении задач на функциональной семантической сети определяются минимально замкнутые подсистемы отношений, у которых выявляются входные и выходные параметры, что приводит к преобразованию отношений в соответствующие функции. В результате этого происходит формирование цепочек функций и преобразование неориентированного двудольного графа отношений, представляющего собой функциональную семантическую сеть, в ориентированные графы решения задач.

На основе таких сформированных цепочек функций можно выполнять расчет любых параметров функциональной семантической сети.

1.3 Многофакторная оптимизация на основе функциональной семантической сети

В качестве алгоритма оптимизации на функциональной семантической сети можно использовать алгоритм случайного поиска с возвратом (рисунок 1.11).

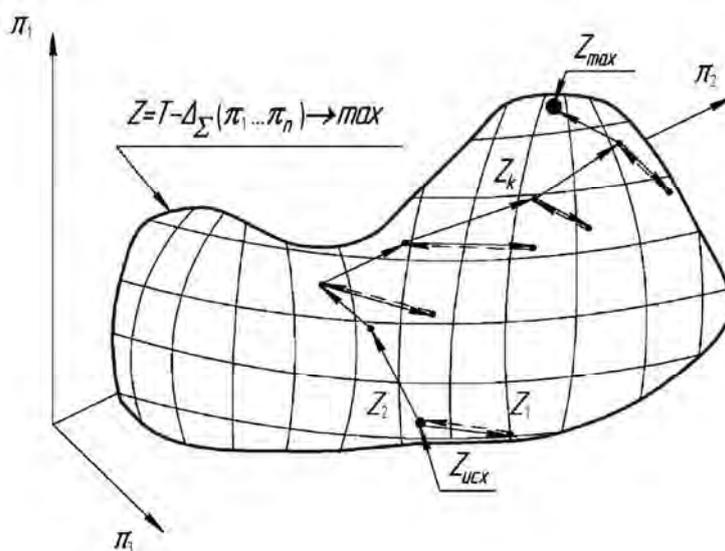


Рисунок 1.11 – Схема случайного поиска с возвратом

В данном алгоритме поиск значений n переменных $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$, доставляющих экстремум функции $\Delta_{\Sigma}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ при условиях $\pi_{i_{\max}} \leq \pi_i \leq \pi_{i_{\min}}$, начинается из исходной точки $X_{исх}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, в которой определяется значение целевой функции $\Delta_{\Sigma}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = \Delta_{\Sigma_{исх}}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$.

При этом из n переменных $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ выбирается какая-то одна, например π_1 , значения же остальных остаются фиксированными.

Далее выполняется переход от исходной к новой допустимой точке $X_1(\pi_{1(k+1)}, \pi_2, \dots, \pi_n)$, и для нее оценивается значение целевой функции $\Delta_{\Sigma}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = \Delta_{\Sigma_1}(\pi_{1(k+1)}, \pi_2, \dots, \pi_n)$, которое сравнивается со значением $\Delta_{\Sigma}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = \Delta_{\Sigma_{исх}}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, найденным предварительно в $X_{исх}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$.

Переход к новой точке осуществляется в соответствии с формулой [11]

$$X_1(\pi_{1(k+1)}, \pi_2, \dots, \pi_n) = X_1(\pi_{1k} \pm a_k r, \pi_2, \dots, \pi_n), \quad (1.23)$$

где a_k – величина k -го шага, определяемая случайным образом;
 r_k – единичный вектор, в направлении которого производится этот шаг.

Если оказывается $\Delta_{\Sigma_1}(\pi_{1(k+1)}, \pi_2, \dots, \pi_n) > \Delta_{\Sigma_{ucx}}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, то совершается переход из $X_{ucx}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ в $X_1(\pi_{1(k+1)}, \pi_2, \dots, \pi_n)$, после чего $X_1(\pi_{1(k+1)}, \pi_2, \dots, \pi_n)$ становится новой исходной точкой для продолжения поиска $X_{ucx}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$.

Если же $\Delta_{\Sigma_1}(\pi_{1(k+1)}, \pi_2, \dots, \pi_n) < \Delta_{\Sigma_{ucx}}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, то осуществляется возврат в исходную точку.

В дальнейшем в качестве опорных назначаются точки, в которых последовательно изменяются координаты относительно переменных π_2, \dots, π_n . Применительно к ним вся процедура поиска повторяется. Так продолжается до тех пор, пока не будет найдена точка глобального экстремума $X(\pi_1^*, \pi_2^*, \dots, \pi_n^*)$.

Таким образом, сущность метода заключается в переходе из начальной точки в новую допустимую, в которой значение целевой функции лучше, чем в исходной. Этот процесс продолжается до тех пор, пока сохраняется возможность улучшения целевой функции. Каждый шаг поиска базируется на использовании двух операций – выборе подходящего направления, двигаясь в котором можно достичь лучших $\Delta_{\Sigma}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, и оценке случайной величины перемещения.

В этом случае алгоритм может быть задан соотношениями

$$X(\pi_1, \dots, \pi_{ik}, \dots, \pi_n) = \begin{cases} X(\pi_1, \dots, \pi_{i(k-1)}, \dots, \pi_n), & \text{если } \Delta_{\Sigma}(\pi_1, \dots, \pi_{i(k-1)}, \dots, \pi_n) < \Delta_{\Sigma}(\pi_1, \dots, \pi_{ik}, \dots, \pi_n), \\ X(\pi_1, \dots, \pi_{ik}, \dots, \pi_n), & \text{если } \Delta_{\Sigma}(\pi_1, \dots, \pi_{ik}, \dots, \pi_n) \leq \Delta_{\Sigma}(\pi_1, \dots, \pi_{i(k-1)}, \dots, \pi_n). \end{cases}$$

2 Методы и средства обеспечения точности обработки лезвийным инструментом

2.1 Погрешности механической обработки и способы обеспечения ее точности

Обострение конкуренции на рынке машиностроительной продукции, непрерывное усовершенствование конструкций машин, рост требований к их качеству вызывают необходимость резкого сокращения производственно-технологического цикла создания машин, а также повышения качества принимаемых проектных решений. Наиболее остро это ощущается в технической подготовке производства, которая является важнейшим этапом жизненного цикла изделия, а затраты времени и средств на нее зачастую значительно превышают затраты на само производство.

В то же время повышение точности изготовления деталей увеличивает надежность (долговечность и безотказность) эксплуатации механизмов.

Из зависимости «стоимости от точности» обработки на металлорежущих станках (рисунок 2.1) видно, что при повышении точности на 1 квалитет стоимость обработки в диапазоне погрешностей от 0 до 50 мкм обрабатываемых размеров возрастает примерно в 2 и более раз [12].

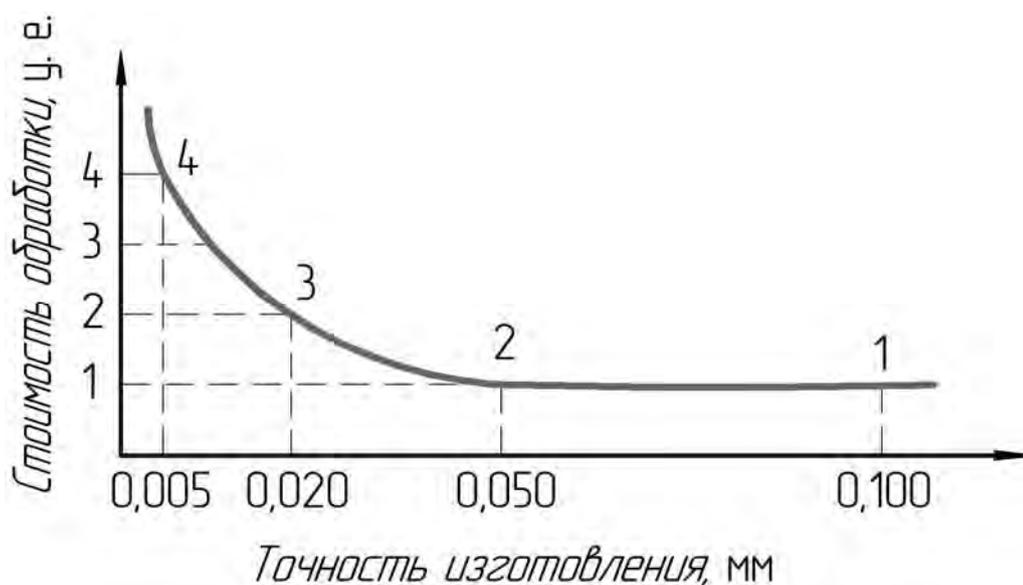


Рисунок 2.1 – Зависимость стоимости от точности обработки на металлорежущих станках

В связи с этим повышение точности и производительности обработки деталей на металлорежущих станках – одна из основных задач современного машиностроения.

Исследования точности механической обработки проводили А. А. Маталин, К. С. Колев, П. А. Кораблев, Р. К. Мещеряков, М. А. Калинин, В. В. Микитянский, Д. Н. Решетов, Э. В. Рыжов, А. Г. Косилова и др.

Заданная точность обработки детали может быть достигнута одним из двух принципиально отличающихся методов: методом пробных ходов и измерений или методом автоматического получения размеров на настроенных станках.

При производстве деталей каждый из методов достижения заданной точности сопровождается погрешностями обработки, вызванными причинами систематического или случайного характера.

Причины возникновения систематических погрешностей обработки деталей связаны с неточностью, износом и деформацией станков, приспособлений и инструментов, тепловыми явлениями, происходящими в технологической системе, а также с погрешностями теоретической схемы обработки.

Случайные погрешности возникают в результате неравномерности твердости обрабатываемого материала, неточностей измерений, переменного припуска на обработку и др.

Методика определения величин случайных и систематических погрешностей обработки подробно изложена в работах Б. С. Балакшина [12], Н. А. Бородачева [13], А. П. Соколовского [14], А. Б. Яхина [15], А. Н. Гаврилова [16], В. С. Корсакова [17] и др.

Рассмотрим решение задачи обеспечения точности обработки на примере обработки концевым инструментом.

В общем случае суммарную погрешность расположения оси обрабатываемого отверстия можно описать зависимостью

$$\Delta_{\Sigma} = k \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{np}^2 + \Delta_y^2} + \Delta_{\Gamma} + \Delta_T + \Delta_c, \quad (2.1)$$

где ε_{δ} – погрешность базирования заготовки, мм;

ε_3 – погрешность закрепления заготовки, мм;

ε_{np} – погрешность, вызываемая приспособлением, мм;

Δ_y – погрешность обработки, обусловленная упругими смещениями оси концевой инструмента, мм;

Δ_{Γ} – погрешность обработки, обусловленная геометрическими



смещениями оси концевой инструмента, мм;

Δ_T – погрешность, вызываемая тепловыми деформациями технологической системы, мм;

Δ_c – погрешность, связанная с неточностью, износом и деформацией станков, мм.

Структурная модель суммарной погрешности обработки концевым инструментом, представленная зависимостью (2.1), приведена на рисунке 2.2.

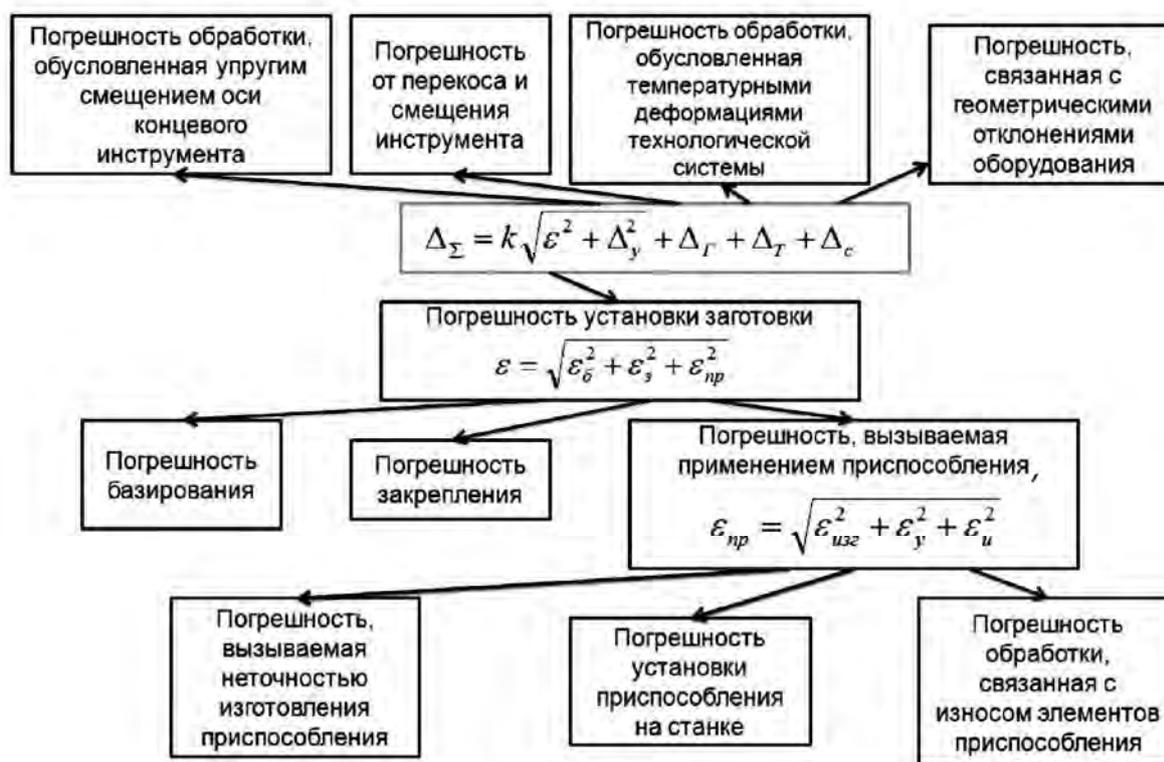


Рисунок 2.2 – Суммарная погрешность обработки концевым инструментом

Проблема повышения точности обработки деталей решается в трех направлениях:

- 1) улучшение качества технологической системы;
- 2) устранение факторов, порождающих погрешность обработки;
- 3) управление процессом обработки.

Улучшение качества технологической системы при обработке отверстий концевым инструментом достигается, в основном, путем повышения жесткости, виброустойчивости, износостойкости и оптимизации геометрических параметров инструмента, т. к. они являются наименее жестким звеном в технологической системе.

Задача обеспечения точности обработки, связанная с уменьшением ее отдельных погрешностей, в настоящее время решается несколькими способами [18]:

- снижение погрешности настройки станков, обеспечивающее наибольший период их работы без поднастройки;
- выбор режимов резания с учетом фактической жесткости и состояния технологической системы, при которых обеспечивается требуемое уточнение деталей в процессе их обработки;
- ручное и автоматическое управление процессом обработки и периодическая поднастройка станков.

Важным элементом настройки металлорежущих станков является обеспечение оптимальных режимов резания. Фактическая точность размеров и геометрической формы обработанных деталей зависит от изменения величины отжаты в упругой технологической системе, вызываемых колебаниями нормальной составляющей силы резания, определяемой, в свою очередь, уровнем применяемых режимов резания.

На практике режимы резания и параметры инструмента в ряде случаев определяются на основе практического опыта, эмпирических результатов, а не на базе оптимизационных исследований. В связи с этим использование таких методов позволяет выявить резервы повышения точности механической обработки за счет организационных мероприятий.

Процедуры оптимизации режимов резания по различным критериям в настоящее время разработаны достаточно полно. Так, в [23] приводятся методика и алгоритм оптимизации режима резания с учетом разброса значений стойкости, обусловленного разбросом физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Методика позволяет управлять интенсивностью износа инструмента путем соответствующего изменения скорости резания.

В [21] представлена методика выбора оптимальных режимов резания на основе анализа динамики процесса сверления, позволяющая определить параметры колебаний при сверлении и включающая расчет интенсивности износа режущего элемента, лимитирующего стойкость спирального сверла с учетом параметров колебаний инструмента, и автоматизированный расчет выходных технологических параметров операции.

В [24] приведена методика оптимизации режимов резания с использованием схемы обратной связи на основе многослойной нейронной сети, позволяющая на базе результатов измерения сил и вибрации оптимизировать исходные параметры – подачу и скорость резания.

Под влиянием переменных систематических погрешностей, связанных с износом режущего инструмента и тепловым расширением элементов технологической системы, через определенный промежуток времени возрастает риск возникновения брака [19].

Чтобы повысить точность обработки, необходимо сократить периоды работы станка между подналадками. Однако подналадка станка, производимая вручную, требует его остановки, продолжительность которой может быть довольно значительной, что снижает производительность обработки.

Устранение данного противоречия между требованиями повышения точности (сокращение продолжительности работы станка между поднастройками) и производительности (уменьшение простоев станков и увеличение продолжительности работы между подналадками) достигается путем автоматизации самого процесса подналадки. Для этих целей применяются устройства так называемого «активного контроля», получившие наименование автоподналадчиков [18].

В настоящее время разработано значительное количество систем активного контроля, которые автоматически корректируют заданный размер [25–28]. Общим недостатком таких систем является относительно высокая стоимость.

Внедрение высокопроизводительных методов механической обработки в условиях, когда традиционные средства активного контроля не обеспечивают эффективного управления процессом, требует разработки принципиально новой разновидности таких средств, которые характеризуются возможностью получения дополнительной статистической информации об условиях и параметрах процесса обработки и используются для формирования сигнала управления.

Так, в [29] описан алгоритм управления точностью механической обработки, корректирующая команда управления в котором формируется на основе контроля выборки деталей и статистических вычислений непосредственно в процессе обработки.

В случае автоматической подналадки точность изготовления деталей на станках обеспечивается системами автоматического управления точностью обработки. Управление при этом заключается в предсказании погрешности обработки, ожидаемой в данный момент времени, и во введении коррекции в положение инструмента на предсказанную величину [30].

В [31; 32] автоматическая подналадка основана на использовании предположения о линейном характере смещения настройки. Уменьшение

рассеивания размеров деталей достигается путем периодической коррекции положения инструмента (или упора) в тех случаях, когда размеры деталей доходят до подналадочной границы. Между подналадочными границами располагается зона нечувствительности. Информация о размерах внутри этой зоны для управления остается недоступной, поэтому такой метод не обеспечивает максимальной точности обработки.

В [33] излагается метод пульсирующей подналадки, при котором обе ее границы сведены в одну, чем ликвидируется зона нечувствительности, а подналадка осуществляется на каждом шаге импульсом, постоянным по величине и переменным по знаку. Этот метод обеспечивает наиболее полную компенсацию систематической составляющей, но одновременно приводит к увеличению случайной составляющей погрешностей обработки.

Дальнейшее развитие методов автоматической подналадки связано с расширением возможностей алгоритмов. Одним из путей решения такой задачи является придание системе управления адаптивных свойств, при наличии которых параметры алгоритма изменяются в зависимости от оценки качества результатов управления. Например, в [34] параметры алгоритма уточняются в зависимости от текущей оценки дисперсии размеров деталей, обработанных с подналадкой. Уточнение алгоритма производится также по величине отклонений от нуля текущих значений коэффициента корреляции между размерами «подналоженных» деталей [35].

Однако придание системе управления адаптивных свойств в общем случае сопровождается не только существенным ее усложнением, что влечет за собой появление более или менее длительных периодов неоптимальной работы системы, в течение которых в ней выполняются анализ результатов подналадки и подстройка параметров алгоритма.

Вследствие этого системы с адаптивными свойствами на практике применяются относительно редко, когда доступные средства не способны обеспечить приемлемых результатов подналадки.

Другой недостаток методов автоматической подналадки в том, что они способны подавлять лишь систематическую составляющую суммарной погрешности обработки. При этом для обеспечения высокой точности обработки системе часто требуется осуществить малые перемещения инструмента в момент подналадки, что является еще одной из причин, ограничивающих практическую реализацию таких систем.

В отличие от управления точностью обработки по выходным параметрам, сокращающего величину переменных систематических

погрешностей, связанных с износом режущего инструмента, температурными деформациями и переменной жесткостью технологической системы, управление точностью по входным данным может обеспечить увеличение точности размеров деталей за счет снижения случайных погрешностей обработки [18].

В связи с этим можно снизить погрешность обработки путем непосредственно измерения размеров и твердости заготовок с последующей сортировкой их на группы и внесением необходимых поправок в статическую наладку станка, учитывающих различие упругих отжатый технологической системы при обработке заготовок разных групп [18]. Недостатками этого метода, ограничивающими его практическое применение, являются трудоемкость и организационная сложность.

От недостатка, свойственного регулированию размеров по выходным данным, свободны адаптивные методы управления точностью обработки, развитые в 1960–1976 гг. проф. Б. С. Балакшиным и его сотрудниками [36].

Так, были разработаны адаптивные системы, в которых в качестве регулирующего параметра принимают один из физических показателей процесса резания. Имеются системы, регулирующие процесс резания путем изменения подачи в зависимости от тангенциальной составляющей силы резания [37] или изменения скорости резания в зависимости от температуры [38].

Зачастую системы регулирования строят на основе учета специфических особенностей конкретной операции. Например, для глубокого сверления решающее значение имеет прочность длинного и тонкого стебля инструмента, его защемление удаляющейся по канавкам стружкой. Учитывая это, в МВТУ им. Н. Э. Баумана было разработано устройство для управления операцией глубокого сверления, действие которого основано на фиксировании определенного допустимого значения крутящего момента. Его величина в процессе глубокого сверления обусловлена действующей силой резания и затиранием стружки при ее движении по канавкам инструмента [39].

Описанная в [40] система предназначена для эффективного управления процессом обработки глубоких отверстий при постоянном контроле условий обработки и состояния режущей кромки инструмента. Она обеспечивает адаптивное управление приводами подачи и главного движения на основе данных о крутящем моменте и осевом усилии на сверле.

Фирмой «ОМАТ Контрол Технолджис» (OMAT Control Technologies, Израиль) была создана система адаптивного управления

OptiDrill, позволяющая минимизировать длительность цикла сверления и предохранить сверло от поломки [41].

В [42] рассмотрено комбинированное управление точностью обработки. В этом случае в системах автоматического управления точностью обработки одновременно используются методы автоматической подналадки и управления по возмущению, что дает возможность подавлять систематические и случайные составляющие погрешности обработки.

Наряду с традиционными методами управления точностью, существуют и др. Так, в [43] предложена методология построения системы управления процессом механической обработки применительно к сверлению. Система обеспечивает выполнение функций оптимизации параметров и управления системой по иерархической структуре. Принято управление по трем параметрам (подача, скорость резания и крутящий момент), которые изменяются в соответствии с различными значениями глубин сверления.

В [44] описан способ повышения точности обработки на металло-режущих станках без изменения жесткости его узлов, при этом относительное положение обрабатываемого изделия и инструмента сохраняют первоначальным. Способ отличается тем, что для устранения влияния на точность различных деформаций, возникающих в узлах станка в процессе обработки изделия, несущие исполнительные поверхности станка, кроме действия силы резания, дополнительно нагружают силами, создаваемыми автономными регуляторами давления.

Для повышения точности обработанных отверстий в [45] предлагается использовать способ коррекции оси предварительно обработанного отверстия. Величину припуска назначают из условия обеспечения коррекции оси отверстия при любой, даже максимально наблюдаемой величине смещения, характерной для данных условий обработки.

В 1990 г. японскими учеными была разработана система контроля прямолинейности и компенсации отклонения оси сверла в условиях глубокого сверления [46].

С. В. Кирсановым были предложены и научно обоснованы технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности точной обработки отверстий мерными инструментами путем применения самоустанавливающейся технологической оснастки, инструментов с определенностью базирования, внутреннего подвода СОЖ в зону резания и эжекторного отвода пульпы [187].

Изучению динамики формирования геометрии отверстия при глубоком сверлении спиральными сверлами и построению алгоритмов

диагностирования и управления посвящена работа [188], в которой рассмотрены вопросы выбора рациональной геометрии инструмента и управления траекторией движения исполнительных элементов, при которой обеспечиваются траектории движений инструмента относительно заготовки, формирующие отверстие заданного геометрического качества в единстве точности оси, продольного и поперечного сечения отверстий, под углом зрения динамики процесса сверления глубоких отверстий.

Вопросу повышения точности изготовления отверстий в корпусных деталях из титановых сплавов твердосплавным инструментом посвящена работа [189]. Объектом исследования являлся комплекс технологических параметров, влияющих на процесс сверления отверстий высокой точности, для изделий топливно-регулирующей аппаратуры авиационного назначения, изготавливаемой из титанового сплава.

Повысить качество обработки прерывистых отверстий в [190] предлагается на основе управления процесса глубокого сверления отверстий за счет наложения вибраций.

Ряд исследователей для обеспечения требуемой точности при обработке резанием предлагают использовать компьютерный контроль. Для этого был разработан метод комплексной диагностики станочной системы [48].

В [49] описана система автоматического управления точностью на основе виброметрической информации, которая характеризует относительное мгновенное положение инструмента и заготовки при обработке резанием. Показано также, что в ряде случаев целесообразно не устранять возмущения в технологической системе, а лишь управлять их уровнем.

Однако рассмотренные методы управления обработкой детали на металлорежущих станках не исключают возникновения различных погрешностей. Экономически выгодно так настроить технологическую систему, чтобы свести суммарную погрешность до нуля или до минимального значения, не превышающего поля допуска на обработку. В этом случае в построении дорогостоящих систем автоматического управления точностью нет необходимости.

В то же время расчеты показывают, что устранение основных причин, порождающих погрешности обработки, гораздо выгоднее и удобнее, чем внедрение сложных систем управления [20].

Таким образом, основные направления и пути повышения точности обработки деталей на отдельных операциях технологического процесса связаны с компенсацией составляющих суммарной погрешности обработки на этапе подготовки производства.

Ввиду этого при проектировании технологических операций обработки точных отверстий большое значение имеет прогнозирование точности обработки, которая неразрывно связана с конструктивными параметрами инструмента, применяемой оснастки и условиями работы инструмента на различных этапах формообразования поверхности отверстия.

Возможность иметь количественный прогноз параметров точности при проектировании и отладке технологических процессов обработки деталей позволит:

- целенаправленно назначать основные конструкторско-технологические параметры технологических операций;
- исключить брак по точности обработки;
- уменьшить длину технологических маршрутов;
- сократить затраты на технологическую подготовку производства за счет применения компьютерной отладки технологических операций, которая поможет значительно снизить число проблем, решаемых при обработке пробной партии деталей, т. к. при компьютерной отладке не расходуется металл, инструменты, энергия и др.

В связи с этим весьма актуальной задачей является разработка методики количественной оценки прогнозируемой точности на стадии проектирования технологических процессов, которая даст возможность существенно повысить эффективность технологической подготовки производства.

В [47] представлена математическая модель, описывающая процесс врезания инструментов в заготовку и позволяющая выполнять оценку точности обработки отверстий как на стадии проектирования технологических процессов, так и при диагностике существующих. Установлено, что величина погрешности зависит от количества оборотов инструмента при врезании, подачи и амплитуды осевых биений. Однако не учитываются другие параметры технологического процесса, влияющие на точность обработки.

В [191] расчет прогноза точности обработки отверстий концевыми мерными инструментами выполняется на основе системы математических моделей формообразования отверстий, описывающих профили обработанного отверстия в продольном и поперечном сечениях. Модели отличаются тем, что в них учитываются сочетания параметров диссимметрии режущей части инструмента, погрешностей заготовки и осевых колебаний шпинделя станка. Использование новых расчетных

методик позволило разработать информационно-справочную базу определения погрешностей обработки отверстий в зависимости от подачи, разности главных углов в плане φ [192].

Однако модели формообразования отверстий концевыми мерными инструментами в виде системы уравнений с запаздывающим аргументом, приведенные в [191; 192] для универсального оборудования, ограничены в наборе типов концевых мерных инструментов и уточнены расчеты площадей срезаемых слоев для различных типов концевых инструментов, особенно для многолезвийных.

Вследствие этого на базе результатов исследований И. П. Дерябина [191; 192] был изучен процесс формообразования отверстий инструментами одностороннего резания, разработаны методики расчета погрешностей размера и формы в поперечном сечении обработанных отверстий и создания на их основе компьютерной методики проектирования и отладки операций обработки отверстий инструментами одностороннего резания [193].

Обеспечению эффективности обработки отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ на основе математического моделирования этапов настройки оборудования и формообразования отверстий посвящена работа [194]. Для этого были разработаны и реализованы в виде компьютерных прикладных программ методики оценки точности расположения осей отверстий на этапе настройки путем интервального расчета размерных цепей и расчета точности формообразования отверстий концевыми мерными инструментами типа двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток.

В [195] повышают стойкость сверл, увеличивают производительность сверления и точность обрабатываемых отверстий путем выявления оптимального сочетания направлений микронеровностей направляющих поверхностей сверла глубокого сверления и обрабатываемого отверстия.

Диссертационная работа [196] посвящена изучению процесса сверления глубоких отверстий малого диаметра, выявлению свойств и закономерностей этого процесса. В ней представлены принципы управления этим процессом и построения станочного оборудования для сверления глубоких отверстий и систем управления. Задача оптимального управления процессом глубокого сверления строится на основе математической модели, которая связывает силовые параметры процесса с пространством координат состояния системы.

С. Ю. Быков для оценки точности обработки отверстий использовал результаты измерений траектории формообразующих движений, чтобы

прогнозировать перемещение инструмента относительно заготовки детали и выявить влияние различных факторов на точность обрабатываемого отверстия непосредственно в процессе обработки [197].

Для повышения надежности технологической системы на основе учета исходных состояний технологической системы и износа ее элементов разработана методика, включающая выбор рациональной установки детали и положения режущих инструментов относительно базовых элементов системы, позволяющая назначить исходную точность элементов технологической системы и условия ее эксплуатации по заданным режимам резания и точности обработки как выходного параметра технологической системы [198].

Исследованиям, направленным на решение проблемы технологического обеспечения геометрических параметров качества деталей путем создания имитационных стохастических моделей формирования профиля и топографии поверхности при лезвийной и абразивной обработке, посвящена работа [199]. На основе модели для расчета топографии и геометрических параметров качества поверхности строятся алгоритмы проектирования и оптимизации технологических операций с учетом стохастических параметров инструмента и процесса резания, прогнозируется вероятность брака по параметрам шероховатости поверхности детали.

Анализ работ, отражающих проблему управления точностью обработки концевым инструментом, показал, что среди большого объема научных изданий в основном работы посвящены либо отдельным явлениям, либо нескольким. При этом отсутствует комплексный подход в решении данной проблемы, т. к. объем исследований, необходимый для изучения взаимосвязи и воздействия всех явлений друг на друга, очень велик. В то же время авторы этих исследовательских работ решали вопрос обработки отверстий в очень узких рамках, несмотря на разработанные многочисленные методики и способы изучения того или иного воздействия физического явления.

В настоящее время основным источником для назначения параметров точности на операции обработки поверхностей являются различные справочники, данные в которых среднестатистические. Так, для операций обработки отверстий в них указываются допуски на размер, форму и увод оси для различных методов обработки с обозначением типа оборудования и оснастки (в основном это обработка по кондуктору или без него). Однако известно из практики и многих исследований, что на

точность обработки отверстий концевыми мерными инструментами значительное влияние оказывают такие параметры процесса обработки, как режимы резания (особенно подача), геометрия и точность изготовления инструмента, точность оборудования, марка обрабатываемого материала и др. Поскольку в справочных данных по точности обработки эти параметры не указаны, то технологи зачастую назначают их исходя из других соображений: производительности, стойкости инструмента, возможностей оборудования и др.

Отсутствие четких нормативных данных по комплексной связи всех параметров точности обработки отверстий с режимами резания, параметрами инструмента, оснастки и оборудования приводит к высокой роли субъективных решений при проектировании технологического процесса обработки точных отверстий. Поэтому проблемы обеспечения точности, как правило, переносятся на этап отладки технологического процесса, что значительно повышает его трудоемкость и стоимость. Особенно возрастают трудности при обработке отверстий с высокими требованиями к точности расположения оси. В связи с этим для внедрения в производство таких технологических процессов необходимы многочисленные доработки. Поэтому возможность иметь надежные методы прогноза параметров точности может значительно повысить достоверность результатов проектных работ.

Вследствие этого возникает необходимость создания математических моделей, позволяющих рассчитать значения отклонений точности при воздействии комплекса технологических факторов, разработки для них методов автоматизированного формирования исходных данных, а также методов автоматизированного планирования действий по повышению точности выпускаемых деталей.

Известно, что при обработке точных отверстий от оснастки во многом зависят возможности метода обработки по обеспечению заданных параметров точности. Однако оснастка, как правило, выбирается после назначения операций и переходов, а критерии выбора больше связаны с габаритами детали, чем с параметрами точности обработки.

В то же время на точность взаимного расположения обрабатываемых поверхностей в большинстве случаев (60...90 %) влияют погрешности, вносимые приспособлением, и в меньшей степени погрешности, вносимые методом обработки [22].

При этом сокращение погрешности, вызванной применением приспособления, может быть достигнуто использованием более совер-

шенных конструкций, проектирование которых может осуществляться с помощью систем автоматизированного проектирования. Технологические же возможности изготовления приспособлений обеспечивают величины погрешностей в пределах 0,005...0,01 мм [50].

Таким образом, повысить эффективность технологического обеспечения точности возможно на основе разработки методов расчетного прогнозирования точности обработки, включающих математические модели формообразования отверстий, и выбора технологической оснастки.

Повышение эффективности технологических методов обеспечения точности обработки отверстий концевыми мерными инструментами на стадии технологической подготовки производства имеет теоретическое и большое практическое значение. Это возможно на основе комплексного подхода к решению задач проектирования и отладки технологических процессов. Поэтому создание нового метода технологического обеспечения точности на базе математических моделей расчета погрешностей и выбора технологической оснастки, позволяющих определять на стадии проектирования основные параметры переходов, является научной проблемой.

2.2 Повышение точности механической обработки за счет рационального проектирования станочных приспособлений

Использование станочных приспособлений позволяет заметно снизить величины отдельных составляющих погрешности обработки – погрешность базирования и закрепления заготовки в приспособлении; погрешность, вызванную неточностью изготовления приспособления; погрешность установки приспособления на станке; погрешность, связанную с износом элементов приспособления; погрешность, обусловленную упругими смещениями технологической системы, а также погрешность, вызванную геометрическими смещениями инструмента (например, при обработке концевым инструментом).

В связи с этим обеспечение оптимальной конструкции приспособления на этапе технологической подготовки производства может рассматриваться как один из путей повышения точности механической обработки. При этом использование автоматизированных систем может обеспечить прирост точности на 22...46 % [22].

Работам по автоматизации и оптимизации проектирования приспособлений предшествовали результаты, полученные в области

автоматизации инженерного труда [52–55], которые показали принципиальную возможность и экономическую целесообразность применения средств вычислительной техники для решения отдельных задач проектирования.

Теоретическим фундаментом развития исследований по автоматизации проектирования станочных приспособлений послужили работы Г. К. Горанского [55; 56] и А. Г. Раковича [57], на базе которых были созданы научные основы технологической подготовки производства и изготовления приспособлений в единой многофункциональной проектирующей системе.

Исследования по автоматизации проектирования приспособлений, по изучению особенностей проектирования элементов различного функционального назначения, формализации большого числа специфических приемов и правил, которыми руководствуется конструктор, совершенствованию расчетов конструкций и их элементов проводились в Институте технической кибернетики АН БССР [58; 59], Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана [60; 62; 63], Ленинградском [64], Фрунзенском [62], Саратовском [65], Киевском политехнических институтах [66], Ленинградском институте авиационного приборостроения [67], Центральном научно-исследовательском институте техники управления (г. Минск) [68] и других научных организациях. Полученные результаты явились методической основой для создания средств автоматизации проектирования станочных приспособлений.

В 1970 г. в ИТК АН БССР была завершена разработка программного комплекса конструирования сверлильных приспособлений для деталей тяжелого машиностроения. Функциональные возможности данного комплекса обеспечивали лишь получение цифрового описания конструкции [69].

По мере дальнейшего развития теоретических и прикладных работ в ИТК АН БССР были созданы и получили широкое внедрение системы автоматизированного конструирования токарных приспособлений для автомобильной и радиотехнической промышленности [70], пакет программ для проектирования технологической оснастки для обработки деталей на координатно-револьверных прессах [71] и др.

В Малоарославецком филиале ГОСНИТИ была создана система конструирования приспособлений для ремонта и восстановления деталей [72], во Всесоюзном проектно-технологическом институте энергетического машиностроения (г. Ленинград) – для проектирования и вычерчивания мерительной оснастки для лопаток турбин [73] и др.

На ПО «КамАЗ» была разработана автоматизированная система проектирования оборудования и сложной оснастки в автомобильной промышленности. На первом этапе были автоматизированы такие процессы, как создание многошпиндельных гайковертов, получение конструкторской документации на электрооборудование [74].

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время задачу автоматизированного проектирования станочных приспособлений решают двумя методами:

- 1) использованием информационно-поисковых систем для поиска, расчета и последующего документирования типовых конструкций [75–77];
- 2) алгоритмическим синтезом конструкций приспособлений на базе элементарных типизированных проектных решений, их графического и текстового документирования, технологической подготовки производства и программирования процессов их изготовления на станках с ЧПУ в рамках единой автоматизированной проектирующей системы [78; 79].

Для анализа и систематизации конструкций существующих приспособлений, заимствования наиболее прогрессивных конструкций при новом проектировании, а также унификации приспособлений, их узлов и деталей было предложено также использовать информационно-поисковые системы, основанные на применении современной вычислительной техники [80].

Функциональная схема информационно-поисковой системы приведена на рисунке 2.3 [81].

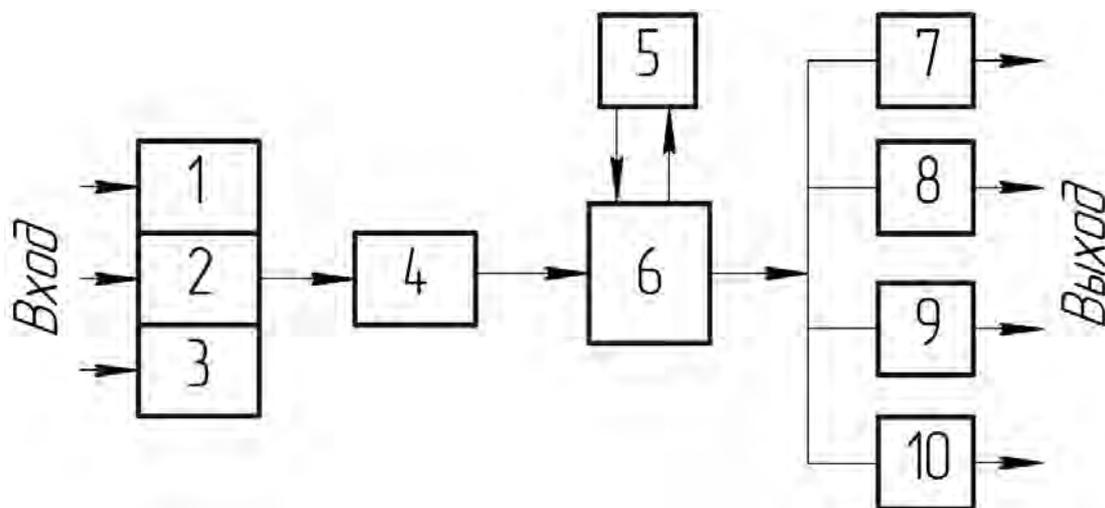


Рисунок 2.3 – Функциональная схема информационно-поисковой системы выбора приспособления

Содержание запроса 4 определяется требованиями производства 1, техническими заданиями на разработку технологического процесса 2 и конструкцией оснастки 3. Модуль поиска 6 при взаимодействии с базой данных 5 позволяет получить четыре разновидности решения запроса: однозначное решение 7 с выдачей системой адреса одного приспособления; многовариантное решение 8, требующее анализа вариантов и выбора рационального из них; типовое решение-аналог 9, которое будет базовым для последующей доработки, и отказ 10 при отсутствии искомой информации.

Метод поискового конструирования позволяет эффективно использовать ЭВМ при решении задач поиска новых технических решений и оценке их рациональности. В [82; 83] изложены машинные методы поискового конструирования и их применение для решения отдельных типов задач. В [84] рассмотрены основные проблемы создания информационно-поисковых систем конструкторско-технологического назначения, связанные со сложностью представления и классификации знаний, и главные стратегии поиска решений в интеллектуальных системах.

К информационно-поисковым системам можно отнести систему автоматизированного синтеза технологической оснастки (АСТО) [85], систему технологического назначения ТИС-81 [86], систему выбора, заимствования и унификации приспособлений [87].

Широкое распространение получили также информационно-поисковые системы, предназначенные для автоматизированного проектирования станочных приспособлений определенного класса. Примерами таких систем могут служить информационно-поисковая система для выбора типовых конструкций приспособлений и их элементов при оснащении операций технологического процесса обработки турбинных лопаток [81] и информационно-поисковая система для проектирования приспособления, применяющегося при зубообработке [88].

В [89] описана информационно-поисковая система, обеспечивающая возможность подбора вариантов, состоящих из конструктивных компоновок приспособлений, объединяющих множество конкретных конструкций и имеющих одинаковую схему установки. Результатом работы системы является количество и конструктивный вид оснастки.

В связи с тем, что удельный вес типовых приспособлений в общем объеме создаваемых конструкций невысок, а сами конструкции станочных приспособлений отличаются большим многообразием, сложной геометрией составляющих деталей и широким диапазоном изменения размеров,

различной степенью универсальности и типизации, в основу автоматизации проектирования станочных приспособлений может быть положен метод машинного синтеза. При автоматизированном проектировании приспособлений на базе унифицированных решений в ЭВМ вводят описания детали и оснащаемой операции, по которым с помощью программ синтеза конструкций генерируется цифровое описание приспособления, которое в дальнейшем перерабатывается в сборочный чертеж приспособления и рабочие чертежи деталей, технологию изготовления деталей приспособления и программы обработки деталей для станков с ЧПУ [90].

Синтез приспособления следует рассматривать как процесс накопления данных в информационной модели, отображающий изменения пространственного образа конструкции во времени [77]. Этапы синтеза конструкций представляют собой части процесса, соответствующие автоматизированному построению информационных описаний функционально-однородных групп элементов приспособлений: установочных, направляющих, зажимных, делительных, корпусных. В указанном порядке обычно следуют программные блоки автоматизированного синтеза в проектирующих системах [91].

В [92; 93] описаны методы создания унифицированного информационного обеспечения САПР приспособлений, позволяющие осуществить выбор оптимального варианта конструктивных решений деталей и сборочных единиц приспособлений, унифицированное информационное представление всех компонентов системы, организацию данных в системе в виде проблемно-ориентированной базы.

Рассмотрим состав типовой структуры одной из наиболее известной САПР приспособлений, построенной на основе метода синтеза и разработанной А. Г. Раковичем [78; 79], блок-схема которой приведена на рисунке 2.4.

Метод алгоритмического синтеза приспособлений реализован в системах автоматизированного проектирования станочных приспособлений «Кондуктор-1» (для конструирования приспособлений для обработки деталей тяжелого машиностроения на операциях сверления) [94; 95], «Кондуктор-2ЕС» (для проектирования приспособлений, используемых для сверления отверстий, расположенных на плоских участках обрабатываемых деталей) [85], «Кондуктор-3» (для проектирования стационарных и накладных кондукторов без поджима и с поджимом обрабатываемой детали к установочным упорам) [58; 96], «Токар-1М» (для

конструирования оправок для наружного точения, приспособлений для внутренней и наружной обработки заготовок, сменных кулачков к универсальным самоцентрирующимся патронам) [97], «Фрезер-1» [98]. Использование таких систем сокращает время проектирования в 8...10 раз, а стоимость в 7...8 раз [81].

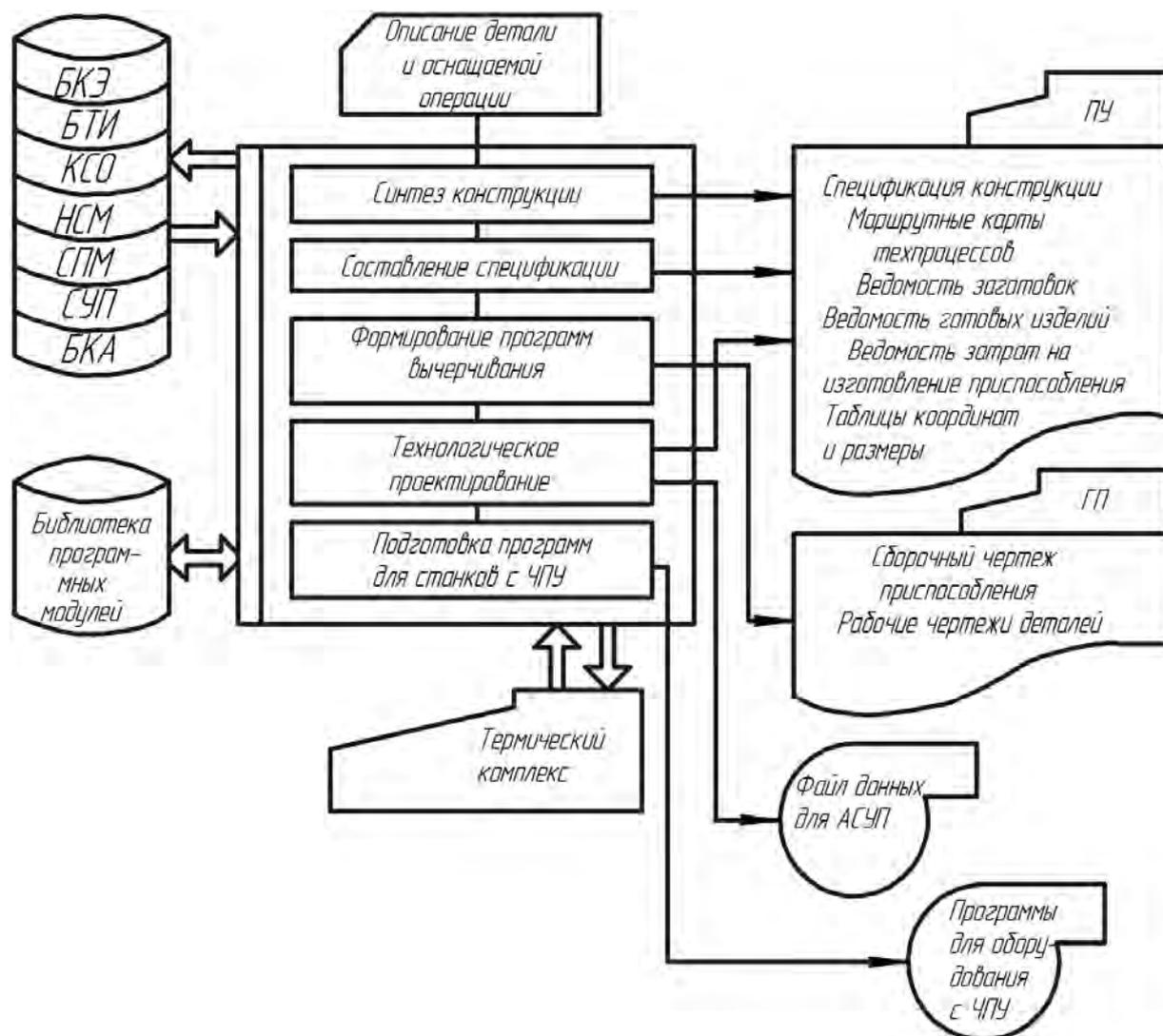


Рисунок 2.4 – Функциональная схема САПР приспособления

Для разработки САПР приспособлений агрегатных станков была создана методика проектирования. Комплекс программ определения и вычерчивания компоновок приспособлений агрегатных станков с поворотно-детальными столами позволяет проработать несколько вариантов компоновок, выбрать среди них качественное решение и этим обеспечить подбор шпиндельных коробок с минимальными габаритами [99].

В [100] рассмотрены основные проблемы теории проектирования станговых зажимных механизмов и даны предпосылки для их автоматизированного проектирования.

В Северо-Кавказском государственном техническом университете была создана система для проектирования и расчета станочных приспособлений на основе комплекта универсально-сборных приспособлений. Она включает в себя конструкторские расчеты приспособления на точность, базу данных по элементам универсально-сборных приспособлений и программу, выполняющую сборочные операции приспособления [101].

Работниками кафедры «Технология машиностроения» ЮУрГУ разработан программный продукт «Призма» [102], предназначенный для параметрического проектирования конструктивных элементов станочного или контрольного приспособления с установочными опорами типа «призма». Эта программа рассчитывает конструктивные размеры неподвижной призмы и погрешности базирования в зависимости от измеряемого размера.

В результате совершенствования ранее созданной системы проектирования станочных приспособлений «Конструктор СП» [103; 104] разработана новая система визуального проектирования «Контур», рассчитанная на проектирование технологической оснастки. Особенность этой системы в том, что она обеспечивает решение различных проектных задач. Это достигается в значительной степени за счет двух подсистем, содержащих системные средства визуального проектирования – средства инструментального оснащения и информационного обеспечения [105; 106].

Автоматизированные системы проектирования средств технологического оснащения широко используются и за рубежом [107–113].

В Техническом университете г. Карл-Маркс-Штадт проводились работы по рациональному конструированию приспособлений в режиме диалога конструктора с ЭВМ [114]. Были выполнены исследования по автоматизации выбора оптимальных типов патронов для металлорежущих станков с помощью вычислительных машин.

Краковским политехническим институтом совместно с Институтом обработки резанием (г. Краков) разработан программный комплекс конструирования приспособлений для сверлильной обработки деталей типа «тело вращения». Результатом конструирования является цифровое описание конструкции, которое может быть использовано для ее вычерчивания. Система носит интерактивный характер. Основные алгоритмы конструирования были взяты из [115].

Для автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства технологической оснастки была разработана система автоматизированного проектирования средств технологического оснащения «Оснастка». Программный продукт представляет собой единую систему сквозного проектирования различных видов оснастки [116].

Внимания заслуживают комплексные автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении, представляющие собой модуль с многоуровневой структурой ряда подсистем, осуществляющих проектирование технологических процессов для деталей основного производства, конструирование специальной технологической оснастки и проектирование для нее технологических процессов [117–119].

Эффективность разрабатываемых технологических процессов зависит от правильного, технически и экономически обоснованного выбора различных видов оснастки. Так, выбор технологической оснастки для токарной обработки осуществляется системой технологической подготовки производства CAPSY [120], в которой учтены разнообразные приспособления: кулачковый патрон, центры, цанги. Система позволяет определить положение детали в системе координат приспособления.

Разработке методических и программных средств, обеспечивающих снижение сложности и трудоемкости процессов построения и адаптации программных комплексов, посвящена [121]. Авторами были созданы новые виды моделей для описания приспособлений и их элементов, составлены типовые схемы построения и адаптации программных комплексов систем автоматизированного проектирования приспособлений.

При проектировании станочных приспособлений наиболее неопределенной и трудноформализуемой задачей является выбор их структуры. Для выбора структуры силового механизма станочного приспособления была создана автоматизированная система проектирования элементарных и комбинированных силовых механизмов в качестве специализированного приложения к интегрированной САПР [122].

Недостатком описанных систем является отсутствие оптимизации конструкции приспособления на основе анализа взаимосвязей между его параметрами, а также параметрами технологического процесса.

Важным шагом в развитии принципов обеспечения точности стала работа [120], отражающая тенденцию к комплексному, системному подходу к решению этой задачи. В ней впервые с единых позиций были изложены основные процессы автоматизированного проектирования. В

основу этой работы был положен принцип единства таких процессов производства, как конструирование и технологическое проектирование, базирующихся на интегральной внутренней модели изделия.

Однако многие из существующих средств проектирования приспособлений не учитывают функциональные взаимосвязи между параметрами технологического процесса и технологической оснастки, вследствие чего для обеспечения точности механической обработки по-прежнему остаются резервы, связанные с системным характером таких взаимосвязей.

2.3 Обеспечение точности обработки на основе использования методов искусственного интеллекта

Стремление преодолеть противоречие между усложнением создаваемых систем и традиционными подходами к их проектированию и обслуживанию в настоящее время определило одно из новых направлений развития систем автоматического управления точностью, связанное с применением интеллектуальных технологий.

Использование алгоритмов искусственного интеллекта открывает возможность осуществления иного подхода к данной проблеме, который предполагает отказ от статистического управления технологическим процессом на основе обобщенных экспериментальных зависимостей и использует принципы динамической обучаемости и адаптации системы управления технологическим оборудованием к реальным условиям производства.

В последние годы сформировалось несколько самостоятельных подходов к решению данной проблемы, основанных на использовании методов искусственного интеллекта [123–131]:

- 1) применение технологии экспертных систем, предполагающей программно-алгоритмическую реализацию интеллектуальных функций на базе использования знаний;
- 2) применение технологии нейросетевых структур, предполагающей аппаратно-программную реализацию интеллектуальных функций.

Современные интегрированные системы автоматизированного проектирования все чаще включают экспертные компоненты (подсистемы), которые могут эксплуатироваться также самостоятельно. Такие компоненты в составе систем автоматизированного проектирования технологических процессов используют для выбора вида и способа изготовления исходной заготовки; классификации деталей; проектирования технологи-

ческих процессов, изготовления деталей; управления качеством производства и определения возможных причин его нарушения в ходе технологического процесса или в результате выполнения отдельной операции; поиска оптимального технологического маршрута [127].

В [132] описана интеллектуальная диагностическая система Inter, предназначенная для диагностики приводов технологического оборудования, различных механизмов и машин, передач любого назначения, а также адаптивного управления точностью технологических процессов изготовления деталей. Система имеет возможность приобретения знаний в диалоге с исследователем, реализует механизмы прямого и обратного вывода, поддерживает нечёткую логику на базе коэффициентов уверенности.

Для построения систем автоматического управления технологическими процессами наиболее популярна многослойная нейронная сеть прямого распространения [133]. В ряде работ [134; 135] описано применение нейронных сетей в задачах адаптивного управления различным промышленным оборудованием. В [136] предлагается использовать нейронные сети в системах адаптивного управления для повышения эффективности металлообработки за счет улучшения качества процесса адаптации системы управления при изменении технологических параметров. При этом задача стабилизации температурно-силового режима процесса обработки решается за счет высокой гибкости нейросетевых моделей, позволяющих корректировать режимы резания при изменении технологических параметров.

В [137] приведены результаты исследования по применению нейросетей и нелинейной динамики на примере управления и адаптивной корректировки управляющих параметров технологических систем механической обработки в реальном масштабе времени. Показана возможность создания нейросетей, способных учитывать изменения свойств обслуживаемого объекта, на основании которых вводятся поправки в управляемый процесс с целью поддержания оптимального функционирования станочного оборудования и выполнения поставленных задач механической обработки при изменении условий протекания технологического процесса. В [138] предлагается использовать нейронные сети для контроля и снижения износа инструмента в процессе резания.

В [139] использован аппарат искусственных нейронных сетей для корректировки траектории движения подачи резца в процессе резания с целью обеспечения точности токарной обработки.

В [140] представлена система оптимального управления процессами механической обработки, сочетающая в себе основанные на свойстве самоорганизации нейронных сетей модели процесса обработки, генетические алгоритмы оптимизации режимов, экспертные системы накопления знаний. На базе предлагаемой концепции разработана система адаптивного управления металлорежущим станком.

В [141] описано интеллектуальное управление станком по состоянию элементов технологической системы. Здесь представлены принципы построения интеллектуальной системы для управления технологическими объектами на основе интеграции машинного интеллекта и традиционного устройства числового программного управления. Рассмотрены следующие алгоритмы: идентификация состояния компонентов технологической системы, формирование базы данных; прогнозирование изменения состояния компонентов конкретной технологической системы в процессе обработки и планирование действий, позволяющих реализовать требования к точности детали.

Интеллектуальная система для управления точностью механической обработки, реализованная применительно к токарной обработке для условий продольного наружного точения, представлена в [132]. Система имеет иерархическое построение и обладает свойством обучаемости. Она функционирует на базе сетевой модели и включает модуль расчета общей погрешности, модули расчета составляющих общей погрешности, процедуры управления этими составляющими, процедуры управления входными параметрами и их связывающий анализатор.

На основе использования современных технологий искусственного интеллекта построены и некоторые системы для проектирования технологической оснастки.

Так, например, в [142] представлены методы проектирования и выбора геометрии крепежных резьбообразующих элементов, сочетающие в себе преимущества двух различных методик: нечеткой логики и искусственных нейронных сетей.

Системы искусственного интеллекта для обеспечения точности механической обработки и для расчета станочных приспособлений могут быть основаны на знаниях, отделенных от процедурной части программ и представленных в одной из характерных форм. Такими формами могут быть продукции [143; 144], фреймы [145; 146], семантические сети [147; 148].

На основе функциональной семантической сети можно строить интеллектуальные пакеты прикладных программ, которые дают возмож-

ность конечному пользователю решать задачи по их описаниям и исходным данным без явного программирования процесса решения задачи. Программирование осуществляется автоматически программой-планировщиком из набора готовых программных модулей, относящихся к данной предметной области. Модульный принцип формирования программных комплексов сформулирован и развит школами академиков А. А. Самарского и Н. Н. Яненко [4].

В пакете ПРИЗ [149] разработчик строит для конечного пользователя математическую модель предметной (проблемной) области в виде функциональной семантической сети. Такая модель и набор методов работы с ней позволяют конечному пользователю на доступном ему входном языке решать задачи из своей предметной области по их описаниям и значениям исходных данных. При этом рабочая программа автоматически синтезируется планировщиком из набора программных модулей, т. е. функции программиста выполняются программой.

Для создания открытой технологии проектирования интеллектуальных систем различного назначения был разработан комплексный проект OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems) [150]. В основе предлагаемой технологии лежит ориентация на семантическое представление знаний, а следовательно, использование опыта применения семантических моделей представления знаний, а также развития и применения современных семантических технологий.

Активность работ в области семантических технологий подтверждается большим числом проводимых конференций: Semantic Technology Conference, Asian Semantic Web Conferences, European Semantic Technology Conferences, Extended Semantic Web Conferences, International Semantic Web Conference, Leveraging Information Asset Management.

К проектирующим интеллектуальным системам можно отнести также экспертную систему GOSSEYN, которая используется в механическом производстве для конструирования штампованных деталей и производства картеров для автомобильных двигателей [151].

Таким образом, имеющиеся сегодня подходы к имитации интеллектуальной деятельности специалиста позволяют строить эффективные системы для обеспечения точности механической обработки. В то же время отсутствует комплексный подход к решению этой задачи, т. к. вопросы проектирования технологического процесса и технологической оснастки рассматриваются как независимые друг от друга подзадачи.

2.4 Использование информационно-справочных данных для обеспечения точности механической обработки

Одним из способов обеспечения точности является использование справочных данных, базирующихся на эмпирических результатах, полученных различными исследователями. Однако часто эти данные оказываются противоречащими друг другу, что затрудняет их применение на практике.

Кроме того, нормативные данные часто не учитывают взаимосвязей между параметрами технологического процесса, что не позволяет использовать в полной мере резервы повышения точности за счет многофакторной оптимизации процессов.

Так, например, в современной литературе существенно различаются результаты оценки погрешностей в технологических системах под воздействием сил закрепления. В то же время такие погрешности, как правило, имеют значительную величину и в обязательном порядке должны учитываться при оценке точности механической обработки.

Рассмотрим подробнее эти погрешности.

В направлении действия силы закрепления возникают перемещения в связи с деформациями элементов приспособления, воспринимающих эту силу, а также с деформациями заготовки и стыков звеньев цепи «заготовка–установочные элементы–корпус приспособления», что также вызывает соответствующие перемещения. Наибольшую величину они имеют в стыке «заготовка–установочные элементы». При этом контактные деформации в сопряжениях приспособления, а также деформации сжатия заготовки и деталей приспособления малы.

Зависимость между контактными деформациями для стыков «заготовка–опора приспособления» и действующей силой Q выражается известной эмпирической зависимостью [152]

$$y = CQ^n, \quad (2.2)$$

где n – показатель степени, характеризующий особенности стыка «заготовка–опора приспособления»;

C – коэффициент, зависящий от вида контакта, материала, шероховатости поверхности, их твердости и т. д.

Определение показателей n и C аналитическим путем затруднительно, поэтому их величины обычно находят экспериментально.

По зависимости (2.2) можно исследовать жесткость узлов станочного приспособления и правильно определять силу закрепления заготовки.

Первые исследования контактной жесткости были выполнены К. В. Вотиновым, А. П. Соколовским, Д. Н. Решетовым, В. М. Кованом, В. С. Корсаковым, Х. Опитцом, В. Хёлкином, Н. Нойвалером, И. Бильфельдом и др. Наибольшее внимание было уделено изучению жесткости элементов технологической системы (станка, приспособления, детали и инструмента).

К. В. Вотинов, изучая жесткость металлорежущих станков, выполнил эксперименты по выявлению зависимости контактной жесткости от величины нагрузки и шероховатости поверхности [153].

Большое значение для понимания вопросов контактной жесткости сыграло рассмотрение А. П. Соколовским контактных деформаций образцов с микронеровностями [14].

Н. Б. Демкин, моделируя шероховатую поверхность набором сферических выступов, рассмотрел задачу об упругом контакте поверхностей с учетом шероховатости в продольном и поперечном направлениях [154].

Д. Н. Решетов, З. М. Левина и В. В. Каминская исследовали жесткость стыков при повторных нагружениях [155]. Для плоских стыков при центральном нагружении было установлено, что сближения их поверхностных слоев были связаны с удельным давлением степенными зависимостями.

Г. Е. Чихладзе [156] исследовал влияние масштабного фактора на контактную жесткость плоских стыков.

Е. Шлоссер, проводивший экспериментальное исследование деформаций при работе стыков на изгиб и кручение, установил, что плоские стыки менее жестки на изгиб, чем на кручение. В своей работе он также показал, что при расчете деформаций стыков необходимо учитывать направления штрихов обработки контактирующих поверхностей [157].

И. Т. Гусев установил зависимости контактной жесткости при внецентровом нагружении, когда одна поверхность гладкая, вторая – шероховатая, а также когда обе поверхности шероховатые [158].

Исследования, выполненные Н. М. Михиным и Г. Я. Рамишвили [159], показали, что различие в величинах контактной жесткости при статическом нагружении неподвижных соединений и в условиях движения (скользящего контакта) сравнительно мало и достигает 15...20 %. Эти обстоятельства подчеркивают ценность метода изучения контактной жесткости при статическом нагружении неподвижных соединений.

Контактные деформации при закреплении заготовок в приспособлениях с установкой на различные типы опор изучал В. С. Корсаков [60]. При расчетах погрешностей закрепления заготовок в приспособлениях в условиях упруго-пластического контакта заготовки с опорами он использовал степенную зависимость между контактными деформациями и силой, приходящейся на опору. Подобные зависимости рекомендовал применять также М. М. Абдель Аал [160] для определения величины смещения заготовки в результате контактных деформаций при закреплении в призме, а также при установке заготовки в центрах. Он также рассматривал случай внецентренного приложения зажимной силы.

М. А. Калинин [161] рассматривал подобные зависимости при закреплении заготовок в центрах.

На основе исследований контактных деформаций при закреплении заготовок в приспособлениях с установкой на различные типы опор строились расчетные модели, которые постепенно совершенствовались за счет увеличения числа их факторов.

Так, в работе В. С. Корсакова [60] при установке стальной заготовки на постоянные сферические опоры для определения смещения вследствие контактных деформаций стыка «заготовка–опоры приспособления» представлено следующее выражение:

$$y = \left[0,67 + \frac{6,23}{r} - 0,003HB \right] \left(\frac{Q}{9,8} \right)^{0,8}, \quad (2.3)$$

где r – радиус сферической поверхности опоры, мм;

HB – твердость материала заготовки по Бринеллю;

Q – сила, действующая по нормали к опоре, Н.

Для опоры с насеченной головкой при установке стальной заготовки

$$y = [0,38 + 0,034D - 0,004HB] \left(\frac{Q}{9,8} \right)^{0,6}. \quad (2.4)$$

Для опоры с плоской головкой или опорной пластины при установке стальной заготовки

$$y = [0,004R_z - 0,0016HB + 0,4 + 0,012F] \left(\frac{q}{9,8} \right)^{0,7}, \quad (2.5)$$

где q – удельное давление на поверхности контакта, Н/см²;
 R_z – параметр шероховатости поверхности заготовки, мкм;
 F – площадь контакта опоры с заготовкой, см².

В работе В. В. Микитянского [22] представлены следующие зависимости для определения смещений заготовки под действием сил закрепления.

Если опора сферическая, то

$$y = 82 \cdot 10^2 \left(\frac{\theta^2 Q^2}{r_u} \right)^{1/3} + R_{\max} \left(\frac{Q^{1/3}}{3,3\pi HB (\theta r_u)^{2/3}} \right)^{1/3}, \quad (2.6)$$

где θ – упругая постоянная материалов заготовки и опоры, 1/ГПа;
 R_{\max} – параметр шероховатости поверхности заготовки, мкм;
 r_u – радиус изношенной сферической опоры (для новой опоры $r_u = r$), мм.

Если используется опора с насеченной головкой, то смещение выражается следующей зависимостью:

$$y = R_{\max} \left(\frac{Qt^2}{\pi D^2 (b_1 + 2u)^2 + HB} \right)^{1/3}, \quad (2.7)$$

где D – диаметр опоры, мм;
 t, b_1 – параметры формы рифлений на опоре, мм.

Если опора плоская или в качестве опоры используется опорная пластина, то смещение описывается уравнением

$$y = (4 + R_{\max}) \left(\frac{Q}{AC' \sigma_T b_\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2+\nu_3}} + 2,8 R_{B_3}^{1/3} \left(\frac{W_3 \theta Q}{A} \right)^{2/3}, \quad (2.8)$$

где A – номинальная площадь опоры, мм²;
 σ_T – предел текучести материала заготовки, МПа;
 C' – коэффициент стеснения, характеризующий степень упрочнения поверхностных слоев обработанных баз заготовки;
 R_{B_3} – длина волны профиля поверхности заготовки, мкм;
 W_3 – высота волны профиля поверхности заготовки, мкм.
 b_ε – приведенный параметр кривой опорной поверхности,

характеризующий условия контакта базы заготовки с опорой и определяющийся соотношением

$$b_{\varepsilon} = \frac{0,24(0,4 - 0,1\nu_3)b_3(4 + R_{\max})^{2+\nu_3}}{R_{\max}^{\nu_3}}, \quad (2.9)$$

где ν_3, b_3 – безразмерные параметры кривой опорной поверхности заготовки.

В свою очередь, в [152] для определения смещения вследствие контактных деформаций стыка «заготовка–опоры приспособления» представлены следующие зависимости:

– для сферических опор

$$y = 8,2 \left(\frac{\theta^2 Q^2}{r_u} \right)^{1/3} + 0,46 R_{\max} \left(\frac{Q^{1/3}}{3,3\pi HB (\theta r_u)^{2/3}} \right)^{1/3}; \quad (2.10)$$

– для опоры с насеченной головкой

$$y = 0,46 R_{\max} \left(\frac{Qt^2}{\pi D^2 (b_1 + 2u)^2 HB} \right)^{1/3}; \quad (2.11)$$

– для плоских опор и опорных пластин

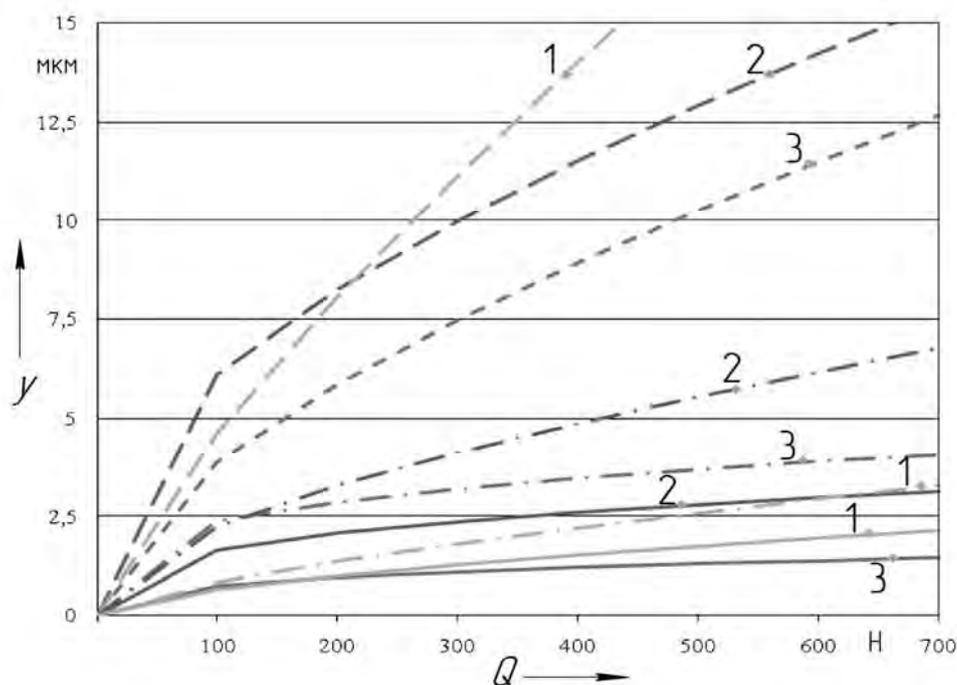
$$y = (4 + R_{\max}) \left(\frac{100Q}{AC' \sigma_T b_{\varepsilon}} \right)^{\frac{1}{2+\nu_3}} + 0,13 R_{B_3}^{1/3} \left(\frac{W_3 \theta Q}{A} \right)^{2/3}. \quad (2.12)$$

Проанализируем расчетные зависимости (2.3)...(2.12) и построим их графики в виде $y = f(Q)$ при установке на сферические, рифленые и плоские опоры. Эти графики представлены на рисунке 2.5.

Из рисунка 2.5 видно, что полученные различными авторами результаты при одинаковых условиях значительно (на 46 % и более) отличаются друг от друга.

Отсутствие однозначности в рассматриваемых зависимостях требует их экспериментальной проверки и корректировки. В связи с этим, основываясь на результатах ранее выполненных в данной области работ, необходимо решить следующие задачи, связанные с нахождением смещения в стыке «заготовка–опора приспособления»:

- усовершенствовать и скорректировать расчетные модели и формулы для определения смещений;
- получить дополнительные экспериментальные данные по смещениям;
- разработать нормативные данные, позволяющие обоснованно производить технические расчеты.



— — — — — сферическая опора; ————— — рифленная опора; - · - · - · — — — — — плоская опора

Рисунок 2.5 – Зависимости смещения заготовки от прикладываемой нагрузки, приходящейся на одну опору

Примечание – Графики построены по зависимостям, представленным в работах: 1 – В. С. Корсакова; 2 – В. В. Микитянского; 3 – Б. Н. Вардашкина

2.5 Экспериментальные исследования смещений заготовки под действием сил закрепления при базировании по плоскости

Как было показано в подразд. 2.4, смещения заготовок под действием сил закрепления описываются существенно отличающимися между собой зависимостями, полученными рядом авторов. Разница в этих величинах может достигать 5...62 %, в связи с чем их использование на практике не

позволяет обеспечить точности оценки погрешности механической обработки.

Настоящий раздел представляет результаты экспериментальных исследований таких смещений и построения корректирующих зависимостей, используемых для базы знаний интеллектуальной системы.

2.5.1 Методика экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования смещений заготовки под действием сил закрепления при ее базировании по плоскости выполнялись на специальной установке, конструктивная схема которой приведена на рисунке 2.6.

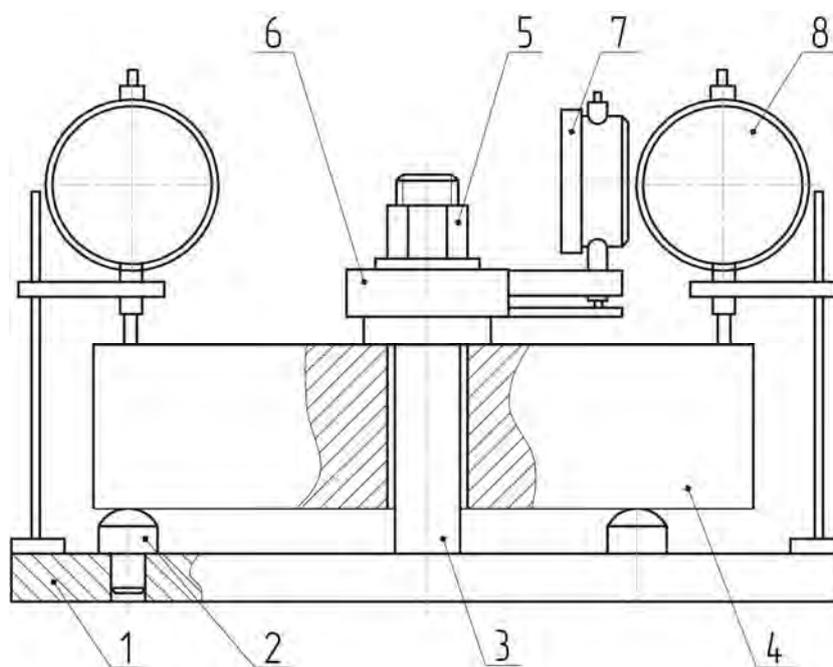


Рисунок 2.6 – Конструктивная схема установки для определения смещений заготовки под действием сил закрепления

Установка содержит основание 1, в котором выполнены отверстия, позволяющие устанавливать сменные опоры 2, и центральный стержень 3, служащий для нагружения жесткой заготовки 4 при помощи гайки 5.

Для измерения перемещений верхней плоскости заготовки в вертикальном направлении служат индикаторы 8, закрепленные на стойках, расположенных на основании установки (рисунок 2.7).

Величина силы закрепления измеряется при помощи динамометра сжатия 6, снабженного индикатором 7 (рисунок 2.8).



Рисунок 2.7 – Установка для определения смещений заготовки под действием сил закрепления при базировании по плоскости

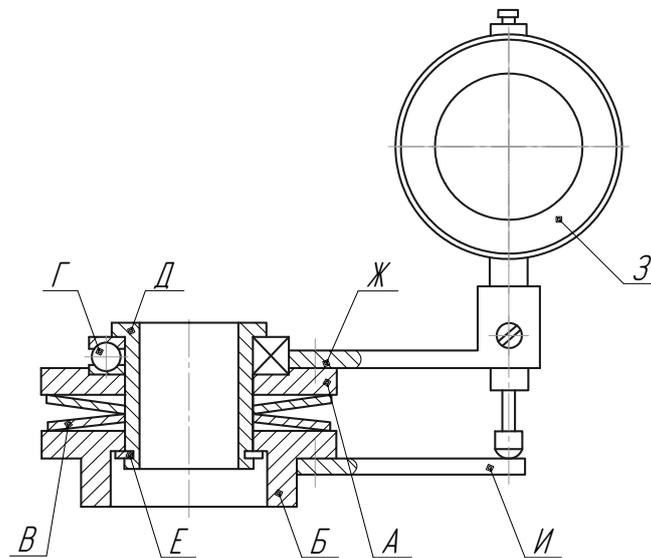


Рисунок 2.8 – Конструкция динамометра сжатия с упругими элементами в виде тарельчатых пружин

Динамометр сжатия состоит из фланцев *A* и *B*, между которыми размещены тарельчатые пружины *B*. В кольцевой расточке фланца *A* установлен упорный шарикоподшипник *Г*. В этот подшипник входит соединительная втулка *Д*, связывающая в осевом направлении фланцы *A* и

Б и создающая начальный натяг тарельчатых пружин при установке стопорного кольца *Е*.

К верхнему фланцу *А* динамометра прикреплена пластина *Ж*, служащая для установки индикатора *З*, концевик которого опирается на пластину *И*, прикрепленную к фланцу *Б*.

Преимущество описанного динамометра состоит в том, что он прост в изготовлении и может использоваться там, где стандартные образцовые динамометры типа ДОСМ применяться не могут, т. к. в них отсутствует центральное отверстие.

Измерение осевых сил осуществлялось путем измерения деформаций тарельчатых пружин, которые пропорциональны этим силам. Чувствительность используемого в экспериментальных исследованиях динамометра определялась на основе его тарировки образцовыми весами и оказалась равной 113 Н/деление индикатора.

При проведении эксперимента использовались две стальные заготовки с различной твердостью и шероховатостью базовой поверхности, изготовленные из материала одной поставки.

Шероховатость базовой поверхности заготовок определялась с помощью профилометра-профилографа, входящего в исследовательский комплекс Sharc УП «Унитехпром» Белорусского государственного университета (рисунок 2.9), который предназначен для исследований шероховатости поверхностей и отклонений от круглости цилиндрических деталей [132].



Рисунок 2.9 – Внешний вид измерительного комплекса Sharc

Комплекс включает аппаратное расширение персонального компьютера и программное обеспечение для визуализации и математической обработки результатов измерений.

Измерения шероховатости для двух заготовок проводились на пяти несовпадающих трассах. Интерфейс комплекса представлен на рисунке 2.10, результаты сведены в таблицу 2.1.

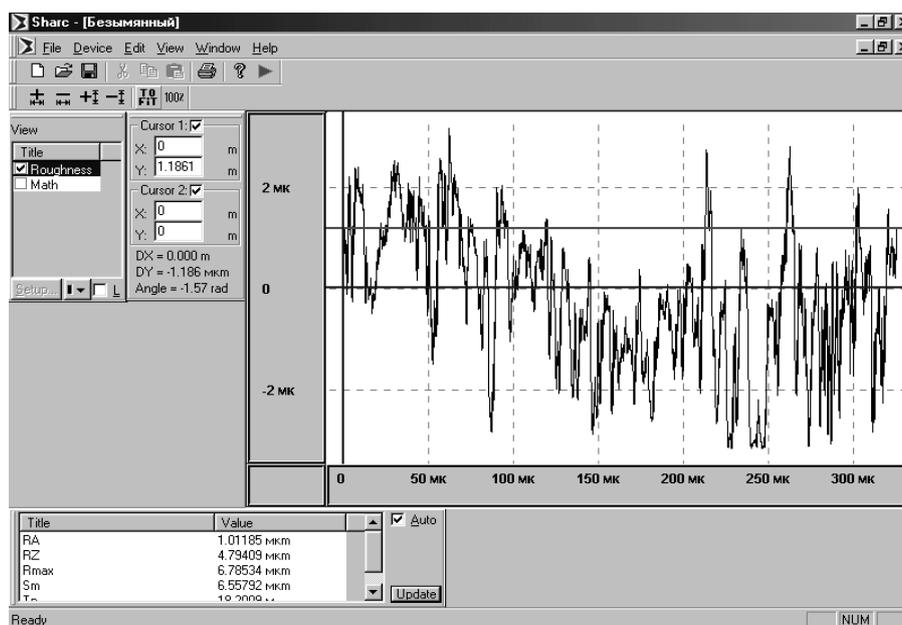


Рисунок 2.10 – Интерфейс компьютерного комплекса для измерения шероховатости

Таблица 2.1 – Результаты измерения шероховатости базовых поверхностей заготовок

Номер заготовки	Номер измерения				
	1	2	3	4	5
	<i>Ra</i> , мкм				
1	0,77	0,84	1,01	1,26	0,93
2	0,49	0,42	0,73	0,59	0,56

Для первой заготовки среднее значение шероховатости базовой поверхности равно 0,962 мкм. Среднеквадратическое отклонение – 0,19 мкм.

Для второй заготовки среднее значение шероховатости базовой поверхности составляет 0,542 мкм. Среднеквадратическое отклонение – 0,12 мкм.

Погрешность результата измерения шероховатости базовых поверхностей заготовок определим как случайную погрешность [162]

$$\Delta_{cl} = \frac{t_{\alpha;n} S}{\sqrt{n}}, \quad (2.13)$$

где $t_{\alpha;n}$ – критерий Стьюдента, зависящий от заранее принятого уровня значимости α и числа дублирующих экспериментов n ;

S – среднеквадратическое отклонение измерений от их среднего значения \bar{x} ,

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (2.14)$$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе проведенных экспериментов $n = 5$ критерий Стьюдента $t_{0,05;10} = 2,57$.

Таким образом, случайная погрешность для двух заготовок соответственно равна:

$$\Delta_{cl}^1 = \frac{2,57 \cdot 0,19}{\sqrt{5}} = 0,22 \text{ мкм};$$

$$\Delta_{cl}^2 = \frac{2,57 \cdot 0,12}{\sqrt{5}} = 0,14 \text{ мкм}.$$

Результаты измерения шероховатости:

$$Ra_1 = 0,962 \pm 0,22 \text{ мкм}; \quad p_{дов} = 0,95;$$

$$Ra_2 = 0,542 \pm 0,14 \text{ мкм}; \quad p_{дов} = 0,95.$$

Твердость заготовок определялась твердомером ТПЦ-4 (рисунок 2.11). Измерения проводились в десяти точках заготовок.

Результаты измерений представлены в таблице 2.2.

Для заготовки со средней шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм среднее значение твердости составляет 156 *НВ*. Среднеквадратическое отклонение – 5,02 *НВ*.



Рисунок 2.11 – Измерение твердости заготовки твердомером ТПЦ-4

Таблица 2.2 – Результаты измерения твердости заготовок

Номер заготовки	Номер измерения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Твердость <i>HB</i>									
1	163	158	155	158	158	155	144	152	158	155
2	130	135	138	138	155	135	147	138	141	140

Для заготовки со средней шероховатостью базовой поверхности Ra 0,542 мкм среднее значение шероховатости базовой поверхности равно 140 *HB*. Среднеквадратическое отклонение – 6,96 *HB*.

Общую погрешность результата измерения твердости определим геометрической суммой:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{сл}^2 + \Delta_{пр}^2}, \quad (2.15)$$

где $\Delta_{сл}$ – абсолютная величина случайной составляющей погрешности измерений;

$\Delta_{пр}$ – абсолютная величина приборной составляющей погрешности измерений.

Приборную составляющую погрешности найдем по формуле [162]

$$\Delta_{np} = \frac{\lambda_p}{3} \cdot \frac{Kx_{\max}}{100}, \quad (2.16)$$

где λ_p – квантиль обратного распределения Лапласа, зависящий от заранее выбранной доверительной вероятности p ;

K – класс точности прибора;

x_{\max} – предел измерений прибора.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе проведенных экспериментов $n = 10$ критерий Стьюдента $t_{0,05;10} = 2,23$.

Случайная погрешность для двух заготовок соответственно равна:

$$\Delta_{cl}^1 = \frac{2,23 \cdot 5,02}{\sqrt{10}} = 3,54 \text{ НВ};$$

$$\Delta_{cl}^2 = \frac{2,23 \cdot 6,96}{\sqrt{10}} = 4,91 \text{ НВ}.$$

Квантиль обратного распределения Лапласа для доверительной вероятности $p = 0,95$ имеет величину $\lambda_p = 1,96$.

Приборная погрешность в этом случае

$$\Delta_{np} = \frac{1,96}{3} \cdot \frac{5 \cdot 500}{100} = 16,33 \text{ НВ}.$$

Общая погрешность результата измерения твердости для двух заготовок составляет:

$$\Delta_1 = \sqrt{3,54^2 + 16,33^2} = 16,71 \text{ НВ};$$

$$\Delta_2 = \sqrt{4,91^2 + 16,33^2} = 17,05 \text{ НВ}.$$

Таким образом, результат измерения твердости заготовок будет соответствовать следующим значениям:

$$HB_1 = 156 \pm 16,71 \text{ мкм}; \quad p_{\text{дов}} = 0,95;$$

$$HB_2 = 140 \pm 17,05 \text{ мкм}; \quad p_{\text{дов}} = 0,95.$$

Для каждого типа опор перемещения измерялись при ступенчато изменяющейся нагрузке Q от 0 до 1318 Н. При этом было использовано семь уровней изменения переменной Q и на каждом ее уровне было проведено по пять дублирующих экспериментов.

В ходе исследования устанавливались зависимости величин смещений заготовок от сил закрепления $y = f(Q)$ для точечных опор со сферической, плоской и рифленной рабочими поверхностями.

Полученные зависимости позволяют определить значения перемещений y , сравнить теоретические зависимости, а также найти соответствующую погрешность закрепления.

2.5.2 Экспериментальные исследования смещений заготовки при установке на точечные рифленные опоры.

Исследования установки заготовок на точечные рифленные опоры проводились в соответствии с изложенной выше методикой.

Во время эксперимента использовались точечные рифленные опоры диаметром 12 мм, изготовленные из стали 40Х по ГОСТ 4543-71 твердостью 41,5...46,5 HRC.

В таблице 2.3 представлены значения перемещений, полученных при проведении экспериментальных исследований с заготовкой твердостью 140 HB, базовая поверхность которой подвергалась шлифованию до шероховатости Ra 0,542 мкм.

Среднее значение на i -м уровне эксперимента определялось по формуле

$$\bar{y}_i = \frac{1}{u} \sum_1^u y_{iu}, \quad (2.17)$$

где y_{iu} – наблюдаемые значения;
 u – номер дубля для уровня i .

Общая погрешность результата измерений смещений заготовки от сил закрепления определяется геометрической суммой двух составляющих: абсолютной величиной случайной составляющей погрешности и абсолютной величиной приборной составляющей погрешности.

Приборная составляющая погрешности измерения смещения заготовки составляет 0,5 мкм.

Погрешности измерений смещения заготовки под действием сил закрепления приведены в таблице 2.4.

Результаты экспериментальных исследований представлены в графическом виде на рисунке 2.12.

Таблица 2.3 – Результаты исследования смещений заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,542 мкм и твердостью 140 HV при ее установке на точечные рифленые опоры

Сила закрепления, Н	Номер дубля	Смещение, мкм		Среднее смещение, мкм	\bar{y} , мкм
		y_1	y_2		
188	1	2	2	2	1,5
	2	1	2	1,5	
	3	1	1	1	
	4	2	2	2	
	5	1	1	1	
377	1	3	5	4	2,75
	2	2	2	2	
	3	2	2	2	
	4	3	3	3	
	5	2,5	3	2,75	
565	1	4	6	5	3,55
	2	3	2	2,5	
	3	3	3	3	
	4	3,5	4	3,75	
	5	3	4	3,5	
753	1	5	6	5,5	4,35
	2	4	4	4	
	3	4	4	4	
	4	4	4	4	
	5	4	4,5	4,25	
942	1	6	7	6,5	4,95
	2	4	4,5	4,25	
	3	4,5	4,5	4,5	
	4	4,5	5	4,75	
	5	4,5	5	4,75	
1130	1	7	8	7,5	5,65
	2	5	5	5	
	3	5	5	5	
	4	5	6	5,5	
	5	5	5,5	5,25	
1318	1	7	8	7,5	6,3
	2	6	6	6	
	3	6	6	6	
	4	6	6	6	
	5	6	6	6	

Таблица 2.4 – Погрешности измерений смещения заготовки с Ra 0,542 мкм и 140 HV под действием сил закрепления при установке на точечные рифленые опоры

Сила закрепления, Н	Смещение, мкм	Среднеквадратическое отклонение, мкм	Случайная составляющая погрешности, мкм	Приборная погрешность, мкм	Суммарная погрешность, мкм
188	1,5	0,5	0,5748	0,5	0,762
377	2,75	0,8291	0,9532		1,076
565	3,55	0,9421	1,083		1,193
753	4,35	0,6519	0,7494		0,901
942	4,95	0,8909	1,0242		1,140
1130	5,65	1,0547	1,2125		1,312
1318	6,3	0,6708	0,7712		0,919

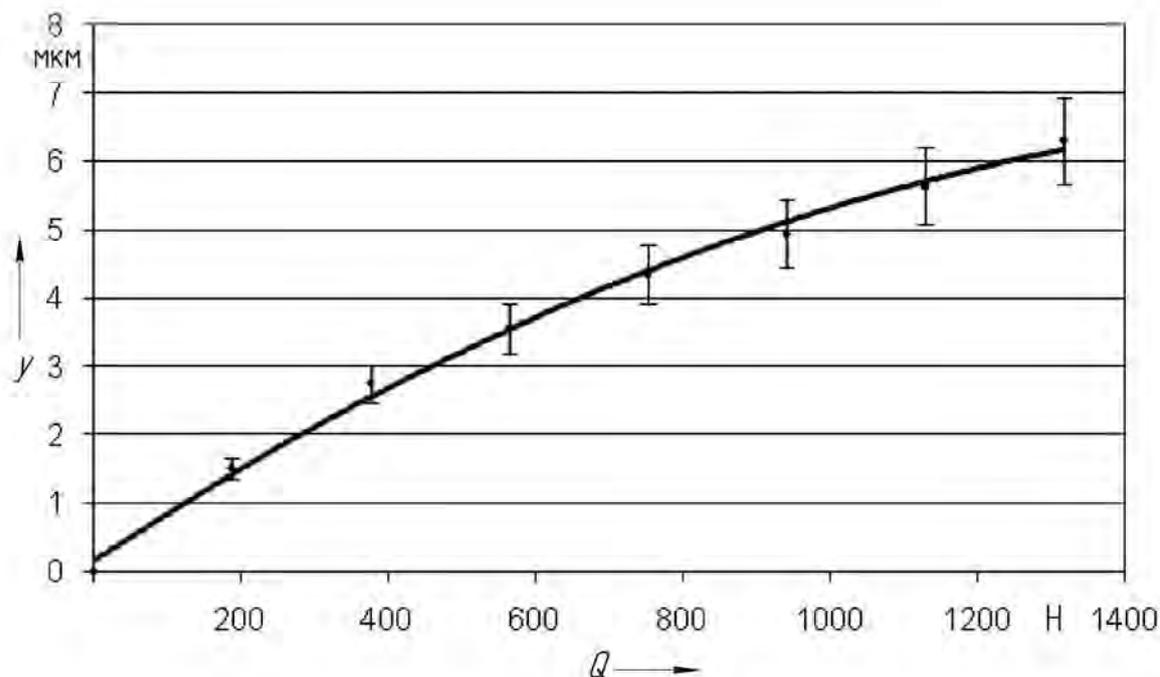


Рисунок 2.12 – Зависимость смещений заготовки (Ra 0,542 мкм и 140 HV) от прикладываемой нагрузки при установке на точечные рифленые опоры

На графике результаты оценки погрешностей измерений показаны в виде планок погрешностей с длиной, равной абсолютной погрешности измерений, образующей доверительный интервал оценки.

Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией позволила получить следующую зависимость:

$$\hat{y} = 0,0359Q^{0,722}, \quad (2.18)$$

где y – перемещение заготовки, мкм;
 Q – сила закрепления заготовки, Н.

На рисунке 2.13 представлено взаимное расположение модели $\hat{y}(Q)$ и экспериментальных данных $(Q_i; y_i)$, относительно которых она построена. Кружками показаны экспериментально полученные точки, а линией соединены предсказанные моделью значения.

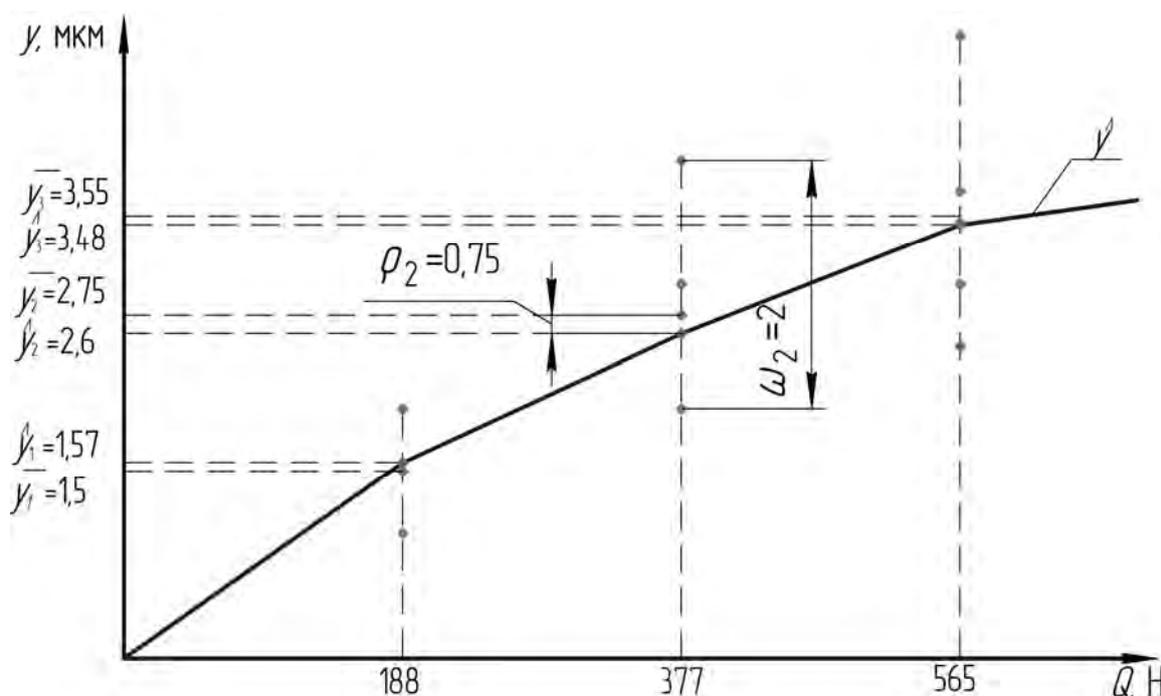


Рисунок 2.13 – Сравнение величин смещений заготовки (Ra 0,542 мкм и 140 HV), полученных экспериментальным и расчетным путем

При установке заготовки с твердостью 156 HV и шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм на рифленые опоры были получены экспериментальные данные, приведенные в таблице 2.5.

Общая погрешность результата измерений смещений заготовки от сил закрепления представлена в таблице 2.6.

На графике (рисунок 2.14) отражены результаты экспериментальных исследований.

Таблица 2.5 – Результаты исследования смещений заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HV при ее установке на точечные рифленые опоры

Сила закрепления, Н	Номер дубля	Смещение, мкм		Среднее смещение, мкм	\bar{y} , мкм
		y_1	y_2		
188	1	0,5	0,5	0,5	0,92
	2	1	1	1	
	3	1	1	1	
	4	1	1	1	
	5	1	1	1	
377	1	1	1	1	1,75
	2	1,5	2	1,75	
	3	2	2	2	
	4	2	2	2	
	5	2	1,5	1,75	
565	1	3	2	2,5	2,92
	2	4,5	2	3,25	
	3	3	4	3,5	
	4	5	2	3,5	
	5	2,5	2	2,25	
753	1	5	4	4,5	4,08
	2	5	4	4,5	
	3	3,5	5	4,25	
	4	6	5,5	5,75	
	5	2	3	2,5	
942	1	7	5	6	4,79
	2	6	5	5,5	
	3	4	6	5	
	4	7	4	5,5	
	5	3	3,5	3,25	
1130	1	8	6	7	5,5
	2	7	6	6,5	
	3	6	7,5	6,75	
	4	7	4,5	5,75	
	5	3	4	3,5	

Таблица 2.6 – Погрешности измерений смещения заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HV под действием сил закрепления при установке на точечные рифленые опоры

Сила закрепления, Н	Смещение, мкм	Среднеквадратическое отклонение, мкм	Случайная составляющая погрешности, мкм	Приборная погрешность, мкм	Суммарная погрешность, мкм
188	0,92	0,2041	0,2039	0,5	0,54
377	1,75	0,3873	0,3869		0,632
565	2,92	0,5627	0,5621		0,752
753	4,08	1,169	1,1678		1,27
942	4,79	1,1447	1,1435		1,248
1130	5,5	1,6047	1,603		1,679
1318	6,21	1,8467	1,8448		1,91

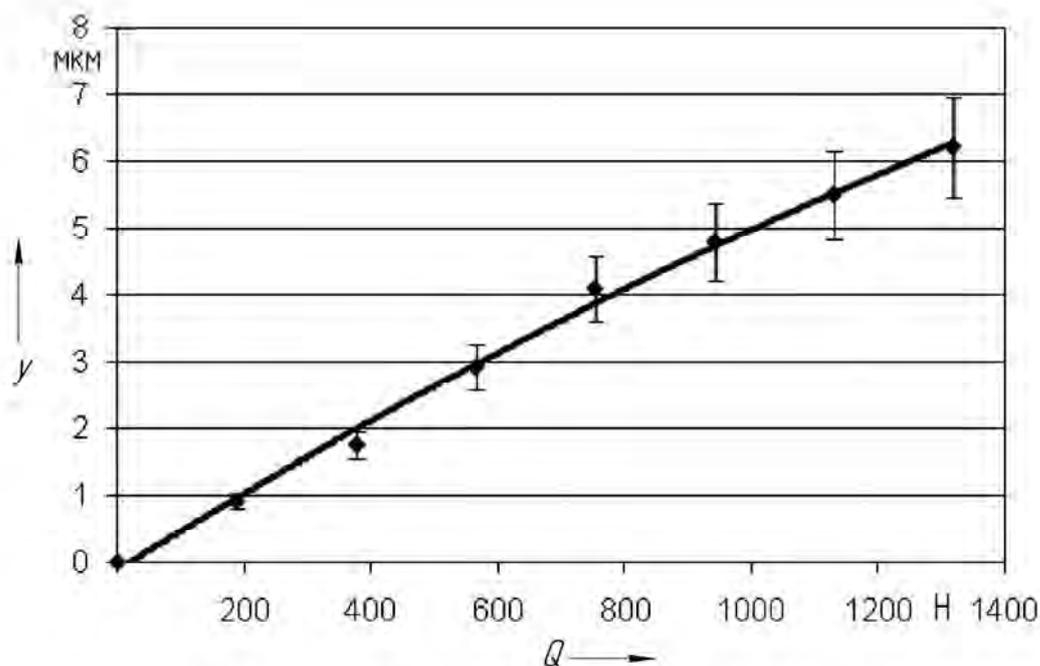


Рисунок 2.14 – Зависимость смещений заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HV при установке на точечные рифленые опоры от прикладываемой нагрузки

Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией позволила получить следующую зависимость:

$$\hat{y} = 0,0044Q^{1,017}. \quad (2.19)$$

2.5.3 Экспериментальные исследования смещений заготовки при установке на точечные сферические опоры.

Исследования установки заготовок на точечные сферические опоры проводились в соответствии с изложенной методикой. Опоры диаметром 12 мм были изготовлены из стали 40Х по ГОСТ 4543-71 твердостью 56...61 HRC. Радиус сферы опоры равен 12 мм. При использовании заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HB были получены данные, представленные в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты исследования смещений заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HB при ее установке на точечные сферические опоры

Сила закрепления, Н	Номер дубля	Смещение, мкм		Среднее смещение, мкм	\bar{y} , мкм
		y_1	y_2		
1	2	3	4	5	6
188	1	2	2	2	1,9
	2	1,5	2	1,75	
	3	2	1	1,5	
	4	2	2	2	
	5	2	2,5	2,25	
377	1	3,5	3,5	3,5	3,45
	2	3,5	3,5	3,5	
	3	3,5	3	3,25	
	4	3	3,5	3,25	
	5	3,5	4	3,75	
565	1	4,5	5	4,75	4,65
	2	4,5	5	4,75	
	3	4	4,5	4,25	
	4	4	5	4,5	
	5	4,5	5,5	5	
753	1	6	7	6,5	6,3
	2	5,5	7	6,25	
	3	6	6	6	
	4	6	6,5	6,25	
	5	6	7	6,5	

Окончание таблицы 2.7

1	2	3	4	5	6
942	1	6,5	8,5	7,5	7,25
	2	6,5	8,5	7,5	
	3	5	8	6,5	
	4	6,5	8	7,25	
	5	6,5	8,5	7,5	
1130	1	8	9,5	8,75	8,8
	2	8	9,5	8,75	
	3	8	9,5	8,75	
	4	8	9,5	8,75	
	5	8	10	9	

Результаты расчета суммарной погрешности измерений смещений заготовки от сил закрепления в данных условиях приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Погрешности измерений смещения заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 НВ под действием сил закрепления при установке на точечные сферические опоры

Сила закрепления, Н	Смещение, мкм	Среднеквадратическое отклонение, мкм	Случайная составляющая погрешности, мкм	Приборная погрешность, мкм	Суммарная погрешность, мкм
188	1,9	0,285	0,328	0,5	0,598
377	3,45	0,209	0,240		0,555
565	4,65	0,285	0,328		0,598
753	6,3	0,209	0,240		0,555
942	7,25	0,433	0,498		0,706
1130	8,8	0,112	0,128		0,516
1318	10,25	0,306	0,352		0,611

На рисунке 2.15 представлены результаты экспериментальных исследований.

По результатам проведенных экспериментов была построена модель, в соответствии с которой получена зависимость

$$\hat{y} = 0,021Q^{0,857}. \quad (2.20)$$

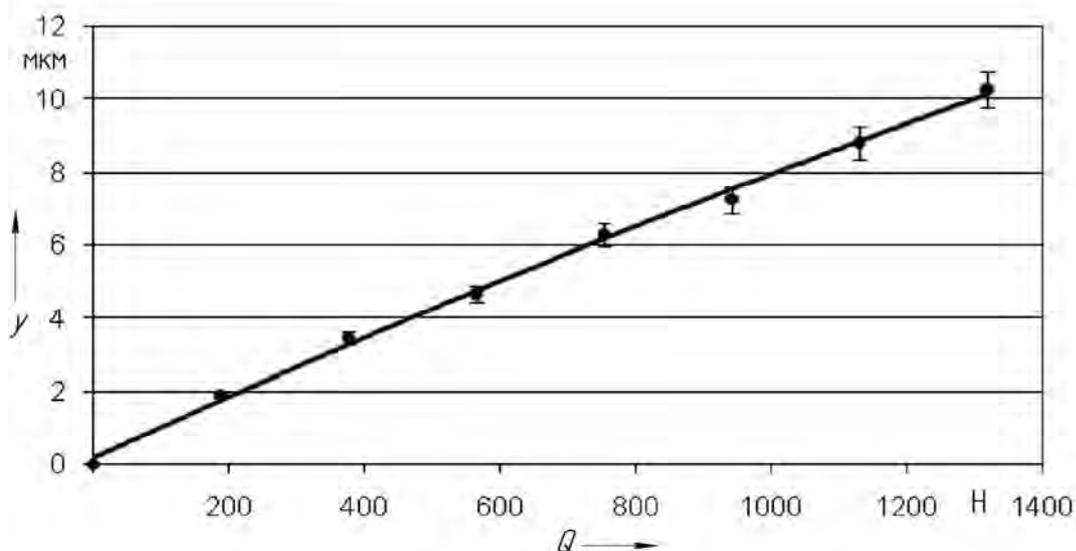


Рисунок 2.15 – Зависимость смещений заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HV при установке на сферические опоры от прикладываемой нагрузки

В таблице 2.9 приведены экспериментальные данные для заготовки с твердостью 140 HV и шероховатостью базовой поверхности Ra 0,542 мкм.

Таблица 2.9 – Результаты исследования смещений заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,542 мкм и твердостью 140 HV при ее установке на точечные сферические опоры

Сила закрепления, Н	Номер дубля	Смещение, мкм		Среднее смещение, мкм	\bar{y} , мкм
		y_1	y_2		
1	2	3	4	5	6
188	1	2	1,5	1,75	1,6
	2	1	0,5	0,75	
	3	2	2	2	
	4	2	1,5	1,75	
	5	2	1,5	1,75	
377	1	3	2,5	2,75	2,7
	2	2	1	1,5	
	3	3	3	3	
	4	3,5	3	3,25	
	5	3,5	2,5	3	

Окончание таблицы 2.9

1	2	3	4	5	6
565	1	4,5	4	4,25	4,05
	2	3	3	3	
	3	4,5	4	4,25	
	4	4	4	4	
	5	5,5	4	4,75	
753	1	6,5	5	5,75	5,65
	2	5	4	4,5	
	3	7,5	6	6,75	
	4	5,5	5	5,25	
	5	7	5	6	
942	1	7	6	6,5	6,4
	2	4,5	5	4,75	
	3	8	6	7	
	4	7,5	6	6,75	
	5	8	6	7	
1130	1	9	7,5	8,25	8,15
	2	6,5	7	6,75	
	3	10	7,5	8,75	
	4	9	8	8,5	
	5	10	7	8,5	
1318	1	10	8,5	9,25	9,05
	2	7,5	8	7,75	
	3	11	8,5	9,75	
	4	10	8	9	
	5	11	8	9,5	

Общая погрешность результата измерений смещений заготовки от сил закрепления представлена в таблице 2.10.

По результатам измерений перемещений заготовки от действия осевой нагрузки был построен график зависимости $y = f(Q)$ (рисунок 2.16).

Таблица 2.10 – Погрешности измерений смещения заготовки с Ra 0,542 мкм и 140 HV под действием сил закрепления при установке на точечные сферические опоры

Сила закрепления, Н	Смещение, мкм	Среднеквадратическое отклонение, мкм	Случайная составляющая погрешности, мкм	Приборная погрешность, мкм	Суммарная погрешность, мкм
188	1,6	0,487	0,56	0,5	0,751
377	2,7	0,694	0,797		0,941
565	4,05	0,647	0,744		0,896
753	5,65	0,840	0,966		1,088
942	6,4	0,945	1,087		1,196
1130	8,15	0,802	0,922		1,049
1318	9,05	0,779	0,895		1,025

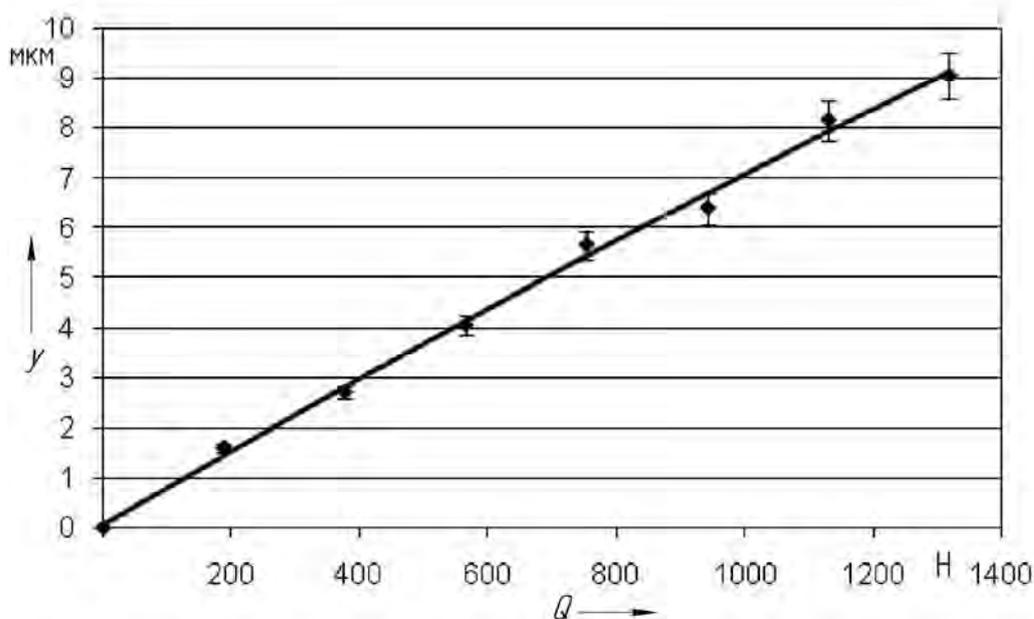


Рисунок 2.16 – Зависимость смещений заготовки с Ra 0,542 мкм и 140 HV при установке на сферические опоры от прикладываемой нагрузки

Экспериментальные данные были аппроксимированы степенной функцией. В результате получена следующая зависимость:

$$\hat{y} = 0,0129Q^{0,9112}. \quad (2.21)$$

2.5.4 Экспериментальные исследования смещений заготовки при установке на точечные плоские опоры.

При проведении исследований были выполнены измерения перемещений верхней плоскости заготовки в вертикальном направлении, соответствующие приложенной осевой нагрузке. В таблице 2.11 представлены значения перемещений, полученных при проведении экспериментов.

Таблица 2.11 – Результаты исследования смещений заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HV при ее установке на точечные плоские опоры

Сила закрепления, Н	Номер дубля	Смещение, мкм		Среднее смещение, мкм	\bar{y} , мкм
		y_1	y_2		
1	2	3	4	5	6
188	1	2,5	2	2,25	1,9
	2	2	1,5	1,75	
	3	2,5	2	2,25	
	4	1,5	1,5	1,5	
	5	2	1,5	1,75	
377	1	4,5	3,5	4	3,45
	2	4	3	3,5	
	3	4,5	3,5	4	
	4	3	2,5	2,75	
	5	3,5	2,5	3	
565	1	5,5	4,5	5	4,45
	2	5	4	4,5	
	3	5,5	4,5	5	
	4	4	3,5	3,75	
	5	4,5	3,5	4	
753	1	7	5	6	5,85
	2	7	5	6	
	3	6	7,5	6,75	
	4	4,5	5	4,75	
	5	5,5	6	5,75	

Окончание таблицы 2.11

1	2	3	4	5	6
942	1	7,5	6,5	7	6,45
	2	7	6	6,5	
	3	7,5	6,5	7	
	4	6	5,5	5,75	
	5	6,5	5,5	6	
1130	1	9,5	7	8,25	7,75
	2	10	7,5	8,75	
	3	10	8	9	
	4	7	6	6,5	
	5	7	5,5	6,25	

Точечные плоские опоры диаметром 12 мм были изготовлены из стали 40Х по ГОСТ 4543-71 с твердостью 56...61 HRC. Базовая поверхность заготовки подвергалась шлифованию. Шероховатость заготовки – Ra 0,962 мкм; твердость – 156 HB. Результаты расчета суммарной погрешности измерений смещений заготовки от сил закрепления в данных условиях представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Погрешности измерений смещения заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HB под действием сил закрепления при установке на плоские опоры

Сила закрепления, Н	Смещение, мкм	Среднеквадратическое отклонение, мкм	Случайная составляющая погрешности, мкм	Приборная погрешность, мкм	Суммарная погрешность, мкм
188	1,9	0,335	0,385	0,5	0,631
377	3,45	0,57	0,655		0,824
565	4,45	0,57	0,655		0,824
753	5,85	0,72	0,828		0,967
942	6,45	0,57	0,655		0,824
1130	7,75	1,287	1,479		1,562
1318	8,55	1,095	1,259		1,355

На рисунке 2.17 отражены результаты экспериментальных исследований.

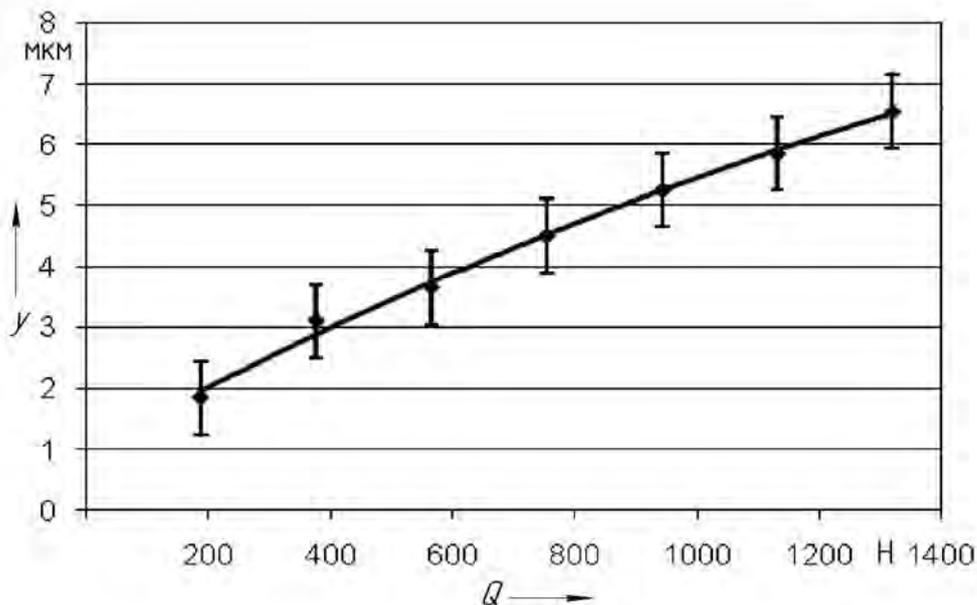


Рисунок 2.17 – Зависимость смещений заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HV при установке на точечные плоские опоры от прикладываемой нагрузки

Представленные результаты могут быть аппроксимированы степенной функцией вида

$$y = 0,0353Q^{0,7655} . \quad (2.22)$$

При использовании заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,542 мкм и твердостью 140 HV были получены данные, приведенные в таблице 2.13.

Общая погрешность результата измерений смещений заготовки от сил закрепления представлена в таблице 2.14.

По результатам экспериментальных исследований был построен график изменения перемещения заготовки от действующей осевой нагрузки (рисунок 2.18).

Аппроксимация экспериментальных данных для данной заготовки степенной функцией позволила получить следующую зависимость:

$$y = 0,0678Q^{0,6348} . \quad (2.23)$$

Таблица 2.13 – Результаты исследования смещений заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,542 мкм и твердостью 140 HV при ее установке на точечные плоские опоры

Сила закрепления, Н	Номер дубля	Смещение, мкм		Среднее смещение, мкм	\bar{y} , мкм
		y_1	y_2		
188	1	2	1,5	1,75	1,85
	2	2,5	1,5	2	
	3	1	1	1	
	4	3	2	2,5	
	5	2,5	1,5	2	
377	1	3	2	2,5	3,1
	2	5	2	3,5	
	3	3,5	2	2,75	
	4	4	2,5	3,25	
	5	4,5	2,5	3,5	
565	1	3	3	3	3,65
	2	3	3	3	
	3	4,5	3	3,75	
	4	5,5	3,5	4,5	
	5	5	3	4	
753	1	3,5	4	3,75	4,5
	2	5,5	4	4,75	
	3	5	3,5	4,25	
	4	6	4	5	
	5	6	3,5	4,75	
942	1	4	5	4,5	5,25
	2	6,5	5	5,75	
	3	6	4	5	
	4	7	4,5	5,75	
	5	6,5	4	5,25	
1130	1	4,5	6	5,25	5,65
	2	7	5	6	
	3	7	5,5	6,25	
	4	7	5	6	
	5	6,5	5	5,75	

Таблица 2.14 – Погрешности измерений смещения заготовки с Ra 0,542 мкм и 140 HV под действием сил закрепления при установке на точечные плоские опоры

Сила закрепления, Н	Смещение, мкм	Среднеквадратическое отклонение, мкм	Случайная составляющая погрешности, мкм	Приборная погрешность, мкм	Суммарная погрешность, мкм
188	1,85	0,548	0,629	0,5	0,804
377	3,1	0,454	0,522		0,723
565	3,65	0,652	0,749		0,901
753	4,5	0,5	0,575		0,762
942	5,258	0,53	0,61		0,788
1130	5,85	0,379	0,436		0,663
1318	6,55	0,411	0,472		0,688

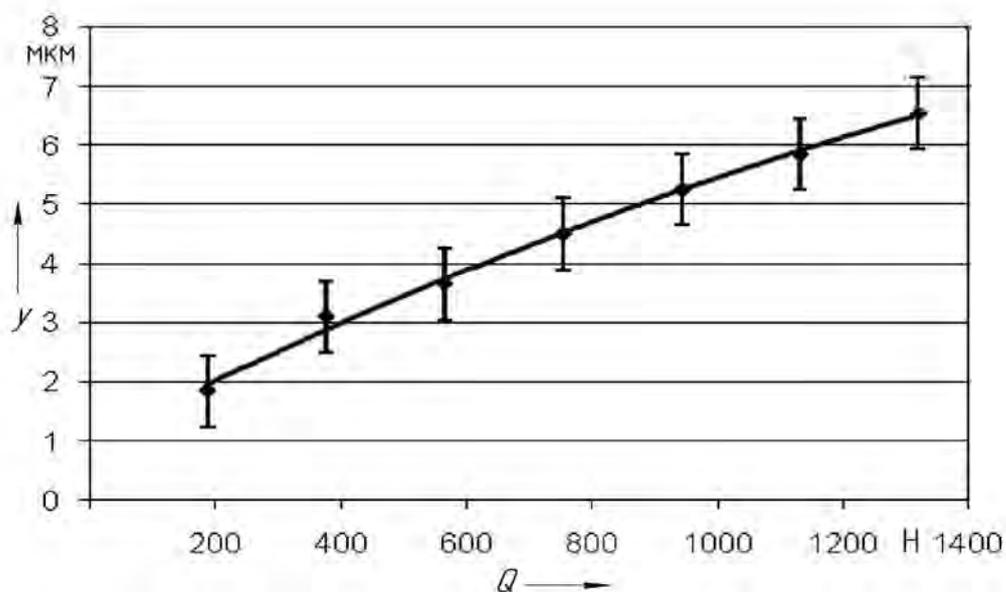


Рисунок 2.18 – Зависимость смещений заготовки с Ra 0,542 мкм и 140 HV при установке на точечные плоские опоры от прикладываемой нагрузки

2.5.5 Проверка адекватности регрессионных моделей.

Проведем анализ степени взаимосвязи выходной переменной y с входными параметрами Q_i , т. е. проверим значимость коэффициентов уравнений регрессии (2.18)...(2.23).

Рассчитаем общую сумму квадратов отклонений наблюдений от общего среднего S_0^2 и соответствующее число степеней свободы этой суммы f_0 по следующим зависимостям:

$$S_0^2 = \sum_1^i \sum_1^u (y_{iu} - \bar{y})^2; \quad (2.24)$$

$$f_0 = iu - 1, \quad (2.25)$$

где \bar{y} – общее (или так называемое генеральное) среднее.

Генеральное среднее определяется по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{iu} \sum_1^i \sum_1^u y_{iu}, \quad (2.26)$$

где y_{iu} – наблюдаемые значения.

Найдем остаточную сумму квадратов S_{ocm}^2 , характеризующую долю изменчивости переменной y под действием случайных ошибок x и систематических погрешностей, вносимых в объяснение вариации переменной y моделью, и число ее степеней свободы по формулам:

$$S_{ocm}^2 = \sum_1^i \sum_1^u (y_{iu} - y_i)^2; \quad (2.27)$$

$$f_{ocm} = f_0 - 1, \quad (2.28)$$

где y_i – значения y , предсказанные моделью для уровня i .

Определим сумму квадратов $S_{рег}^2$, характеризующую регрессионную (статистическую) связь между Q и y , и соответствующее ей число степеней свободы:

$$S_{рег}^2 = S_0^2 - S_{ocm}^2; \quad (2.29)$$

$$f_{рег} = k, \quad (2.30)$$

где k – число коэффициентов модели, за исключением постоянного коэффициента.

Рассчитаем общую сумму квадратов ошибок S_{ou}^2 , характеризующую суммарную случайную ошибку наблюдений, а также соответствующее ей число степеней свободы:

$$S_{ou}^2 = \sum_1^i \sum_1^u (y_{iu} - \bar{y}_i)^2; \quad (2.31)$$

$$f_{ou} = (u - 1)i, \quad (2.32)$$

где \bar{y}_i – среднее значение на i -м уровне.

Проверим адекватность моделей (2.18)...(2.23), т. е. оценим систематическую погрешность, вносимую моделью в объяснение вариации переменной y . Систематическая ошибка модели на уровне i характеризуется величиной $y_i - \bar{y}_i$. Эту ошибку можно отразить суммой квадратов

$$S_{ad}^2 = u \sum_1^i (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (2.33)$$

которую проще находить из условий

$$S_{ad}^2 = S_{ocm}^2 - S_{ou}^2; \quad (2.34)$$

$$f_{ad} = f_{ocm} - f_{ou} = i - 1 - k. \quad (2.35)$$

Тесноту связи между величинами Q и y характеризует значение индекса корреляции r , определяющееся из соотношения

$$r = \sqrt{\frac{S_{рег}^2}{S_0^2}}. \quad (2.36)$$

Проверка значимости коэффициентов моделей (2.18)...(2.23) эквивалентна условию проверки равенства дисперсий $S_{рег}^2$ и S_{ocm}^2 на основе критерия Фишера:

$$F_{рег} = \frac{S_{рег}^2 / f_{рег}}{S_{ocm}^2 / f_{ocm}} > F_{\alpha; f_{рег}; f_{ocm}}, \quad (2.37)$$

где $F_{\alpha; f_{рег}; f_{ocm}}$ – табличное значение квантиля распределения Фишера, зависящее от заранее определенного уровня значимости α и числа степеней свободы $f_{рег}$ и f_{ocm} .

Если условие (2.37) выполняется, то на уровне значимости α коэффициенты модели считаются значимыми.

Модель считается адекватной в том случае, если в статистическом смысле систематическая погрешность, вносимая моделью, не превышает

случайной погрешности данных, что эквивалентно выполнению условия

$$F_{a\partial} = \frac{S_{a\partial}^2 / f_{a\partial}}{S_{ou}^2 / f_{ou}} < F_{\alpha; f_{a\partial}; f_{ou}}. \quad (2.38)$$

Рассчитанные по приведенным выше формулам суммы квадратов и числа степеней свободы, необходимые для осуществления дисперсионного анализа, представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Данные для дисперсионного анализа

Параметры дисперсионного анализа	Установка на рифленые точечные опоры		Установка на сферические точечные опоры		Установка на плоские точечные опоры	
	Параметры заготовки					
	<i>Ra</i> 0,542 мкм 140 <i>HB</i>	<i>Ra</i> 0,962 мкм 156 <i>HB</i>	<i>Ra</i> 0,962 мкм 156 <i>HB</i>	<i>Ra</i> 0,542 мкм 140 <i>HB</i>	<i>Ra</i> 0,962 мкм 156 <i>HB</i>	<i>Ra</i> 0,542 мкм 140 <i>HB</i>
	Эмпирическая зависимость					
	(2.6)	(2.7)	(2.8)	(2.9)	(2.10)	(2.11)
	Значения параметров дисперсионного анализа					
S_0^2	102,9	183,994	265,368	243,42	186,118	88,161
f_0	34	41	34	34	34	34
S_{ocm}^2	18,746	47,8437	3,062	17,269	18,555	7,382
f_{ocm}	33	40	33	33	33	33
S_{pez}^2	84,154	136,150	262,305	226,152	167,562	80,774
f_{pez}	1	1	1	1	1	1
S_{ou}^2	18,425	46,7682	2,175	15,95	17,85	7,1
f_{ou}	28	35	28	28	28	28
$S_{a\partial}^2$	0,321	1,0754	0,887	1,319	0,705	0,282
$f_{a\partial}$	5	5	5	5	5	5
r	0,904	0,86	0,994	0,964	0,962	0,956
F_{pez}	148,142	113,829	2826	432,148	298,004	361,092
$F_{a\partial}$	0,0976	0,161	0,408	0,39	0,221	0,223

Связь между переменными Q и y моделей (2.18)...(2.23) хорошая, т. к. применительно к нашим условиям значение индекса корреляции r лежит в пределах от 0,8 до 0,994.

Квантиль распределения Фишера при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы 1 и 33 $F_{0,05; 1; 33} = 4,139$, а для числа степеней свободы 5 и 28 $F_{0,05; 5; 28} = 2,56$.

Проверка показала, что коэффициенты модели (2.18)...(2.23) значимы на уровне значимости 0,05, т. к. отношение $F_{рег}$ для данных моделей превышает табличное значение критерия Фишера для этих условий, т. е.

$$F_{рег} > F_{0,05; 1; 33} = 4,139.$$

Регрессионные модели (2.18)...(2.23) адекватно описывают экспериментальные данные, т. к. выполняется условие

$$F_{ад} < F_{0,05; 5; 28} = 2,56.$$

Таким образом, регрессионные модели (2.18)...(2.23) значимы и адекватно описывают экспериментальные данные.

2.5.6 Анализ расчетных зависимостей для определения смещений плоских заготовок под действием сил закрепления.

Значения смещений при установке заготовок на различных типах опор, вычисленные по зависимостям (1.3)...(1.8), (1.10)...(1.12), (2.18)...(2.23), приведены в таблицах 2.16...2.18.

Значения поправочного коэффициента k для формул (1.3)...(1.8), (1.10)...(1.12), представленных в [36; 38; 155], даны в таблицах 2.19...2.21.

Таблица 2.16 – Значения смещений заготовки при ее установке на плоские опоры

Заготовка	Q, Н	Формула			
		(2.12)	(2.8)	(2.5)	(2.22)...(2.23)
		y, мкм			
1	2	3	4	5	6
Ra 0,542 мкм и 140 HB	100	1,813561	2,063516	0,956184	1,261333
	200	2,199146	3,070114	1,553326	1,9585
	300	2,46596	3,897287	2,063129	2,533415
	400	2,677143	4,62745	2,523385	3,041007
	500	2,855003	5,293623	2,94999	3,503772

Окончание таблицы 2.16

1	2	3	4	5	6
	600	3,010304	5,913178	3,351563	3,93369
	700	3,149153	6,49665	3,733449	4,338084
<i>Ra</i> 0,962 мкм и 156 <i>HB</i>	100	2,366625	2,230738	0,836753	1,198877
	200	2,861309	3,270324	1,359309	2,038042
	300	3,201663	4,119732	1,805435	2,779784
	400	3,469926	4,867153	2,208203	3,464588
	500	3,695093	5,54763	2,581524	4,109947
	600	3,891134	6,179503	2,932939	4,725519
	700	4,065967	6,773855	3,267125	5,317375

Таблица 2.17 – Значения смещений заготовки при ее установке на рифленые опоры

Заготовка	$Q, Н$	Формула			
		(2.11)	(2.7)	(2.4)	(2.18)...(2.19)
		$y, мкм$			
<i>Ra</i> 0,542 мкм и 140 <i>HB</i>	100	0,439011	0,954371	0,918754	0,997917
	200	0,553119	1,202432	1,392571	1,646031
	300	0,633163	1,376441	1,776119	2,20585
	400	0,696886	1,514969	2,110742	2,715075
	500	0,750698	1,631951	2,413133	3,189707
	600	0,797735	1,734207	2,692092	3,638477
	700	0,839797	1,825646	2,952963	4,066823
<i>Ra</i> 0,962 мкм и 156 <i>HB</i>	100	0,751597	1,633907	0,660858	0,478825
	200	0,946953	2,058594	1,001674	0,969188
	300	1,083991	2,356502	1,277559	1,464004
	400	1,193086	2,593666	1,518253	1,961732
	500	1,285213	2,793942	1,735762	2,461638
	600	1,365743	2,969007	1,936417	2,963287
	700	1,437754	3,125552	2,124061	3,466388

Таблица 2.18 – Значения смещений заготовки при ее установке на сферические опоры

Заготовка	Q, Н	Формула			
		(2.10)	(2.6)	(2.3)	(2.20)...(2.21)
		у, мкм			
<i>Ra 0,542 мкм и 140 HB</i>	100	3,620289	4,919849	4,932188	0,857018
	200	5,561919	6,965522	8,587438	1,611715
	300	7,184128	8,652411	11,87782	2,332075
	400	8,62926	10,14523	14,9516	3,031006
	500	9,955841	11,50987	17,87375	3,714421
	600	11,19515	12,78098	20,68048	4,385722
	700	12,36638	13,97961	23,39473	5,047113
<i>Ra 0,962 мкм и 156 HB</i>	100	3,87983	6,104711	4,624394	1,095172
	200	5,842239	8,245243	8,051537	1,983824
	300	7,477365	9,991104	11,13658	2,80825
	400	8,932022	11,52741	14,01854	3,593553
	500	10,2662	12,92674	16,75833	4,350992
	600	11,51186	14,22685	19,38991	5,086941
	700	12,68857	15,45046	21,93478	5,805486

Таблица 2.19 – Значения поправочного коэффициента k при установке заготовки на плоские опоры

Заготовка	Q, Н	Формула		
		(2.12)	(2.8)	(2.5)
		Коэффициент k		
1	2	3	4	5
<i>Ra 0,542 мкм и 140 HB</i>	100	0,695501	0,611254	1,319132
	200	0,890573	0,637924	1,260843
	300	1,027354	0,650046	1,227948
	400	1,135915	0,657167	1,20513
	500	1,227239	0,661885	1,187723
	600	1,306742	0,665241	1,173688
	700	1,37754	0,667742	1,161951

Окончание таблицы 2.19

1	2	3	4	5
<i>Ra</i> 0,962 мкм и 156 <i>HВ</i>	100	0,506577	0,537435	1,432773
	200	0,712276	0,623193	1,499322
	300	0,868231	0,674749	1,539675
	400	0,998462	0,711831	1,568963
	500	1,112272	0,740847	1,592062
	600	1,214432	0,764709	1,611189
	700	1,307776	0,784985	1,627539

Таблица 2.20 – Значения поправочного коэффициента *k* при установке заготовки на рифленые опоры

Заготовка	<i>Q</i> , Н	Формула		
		(2.11)	(2.7)	(2.4)
		Коэффициент <i>k</i>		
<i>Ra</i> 0,542 мкм и 140 <i>HВ</i>	100	2,273102	1,045628	1,086163
	200	2,975908	1,368918	1,182009
	300	3,483858	1,602575	1,241949
	400	3,89601	1,792165	1,286313
	500	4,248988	1,954536	1,321812
	600	4,56101	2,098064	1,351543
	700	4,842626	2,227608	1,377201
<i>Ra</i> 0,962 мкм и 156 <i>HВ</i>	100	0,637077	0,293055	0,724551
	200	1,023481	0,470801	0,967568
	300	1,350568	0,621262	1,145938
	400	1,64425	0,756355	1,292098
	500	1,915354	0,881063	1,418189
	600	2,169725	0,998073	1,530294
	700	2,410974	1,109048	1,631963

Таблица 2.21 – Значения поправочного коэффициента k при установке заготовки на сферические опоры

Заготовка	Q, H	Формула		
		(2.10)	(2.6)	(2.3)
		Коэффициент k		
$Ra 0,542$ мкм и $140 HB$	100	0,236726	0,174196	0,17376
	200	0,289777	0,231385	0,187683
	300	0,324615	0,269529	0,196339
	400	0,351247	0,298762	0,202721
	500	0,37309	0,322716	0,207814
	600	0,391752	0,343144	0,212071
	700	0,408132	0,361034	0,215737
$Ra 0,962$ мкм и $156 HB$	100	0,282273	0,179398	0,236825
	200	0,339566	0,240602	0,246391
	300	0,375567	0,281075	0,252164
	400	0,402322	0,31174	0,256343
	500	0,423817	0,336588	0,259632
	600	0,441887	0,357559	0,26235
	700	0,457537	0,375748	0,26467

Аппроксимация значений поправочного коэффициента k для формул (1.3)...(1.8), (1.10)...(1.12) позволила получить зависимости, представленные в таблицах 2.22...2.24.

Таблица 2.22 – Расчетные зависимости поправочного коэффициента k при установке заготовки на плоские опоры

Формула		
(2.12)	(2.8)	(2.5)
Коэффициент k		
Заготовка с $Ra 0,962$ мкм и твердостью $156 HB$		
$k = 0,438297 + 0,001304Q$	$k = 0,535138 + 0,00039Q$	$k = 1,430158 + 0,000307Q$
Заготовка с $Ra 0,542$ мкм и твердостью $140 HB$		
$k = 0,438297 + 0,001304Q$	$k = 0,616475 + 0,0000843Q$	$k = 1,317499 - 0,00025Q$
Среднее значение k		
$k = 0,546472 + 0,001202Q$	$k = 0,575807 + 0,000237Q$	$k = 1,373829 + 0,0000285Q$

Таблица 2.23 – Расчетные зависимости поправочного коэффициента k при установке заготовки на рифленые опоры

Формула		
(2.11)	(2.7)	(2.4)
Коэффициент k		
Заготовка с Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HV		
$k = 0,424637 + 0,002921Q$	$k = 0,195333 + 0,001344Q$	$k = 0,655809 + 0,001471Q$
Заготовка с Ra 0,542 мкм и твердостью 140 HV		
$k = 2,091085 + 0,004159Q$	$k = 0,9619 + 0,001913Q$	$k = 1,079278 + 0,000461Q$
Среднее значение k		
$k = 1,257861 + 0,00354Q$	$k = 0,578616 + 0,001629Q$	$k = 0,867544 + 0,000966Q$

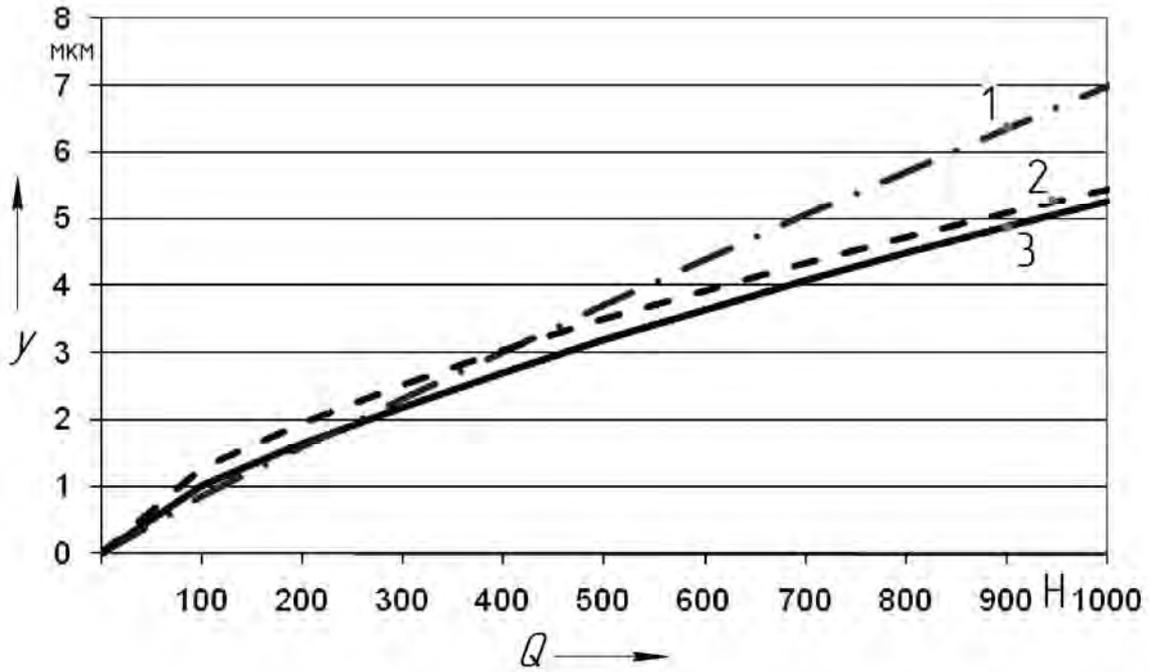
Таблица 2.24 – Расчетные зависимости поправочного коэффициента k при установке заготовки на сферические опоры

Формула		
(2.10)	(2.6)	(2.3)
Коэффициент k		
Заготовка с Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HV		
$k = 0,277755 + 0,000278Q$	$k = 0,172033 + 0,000314Q$	$k = 0,236493 + 0,0000439Q$
Заготовка с Ra 0,542 мкм и твердостью 140 HV		
$k = 0,229814 + 0,000274Q$	$k = 0,166221 + 0,000299Q$	$k = 0,172849 + 0,0000665Q$
Среднее значение k		
$k = 0,253785 + 0,000276Q$	$k = 0,169127 + 0,000307Q$	$k = 0,204671 + 0,0000552Q$

2.5.7 Обобщение результатов экспериментальных исследований.

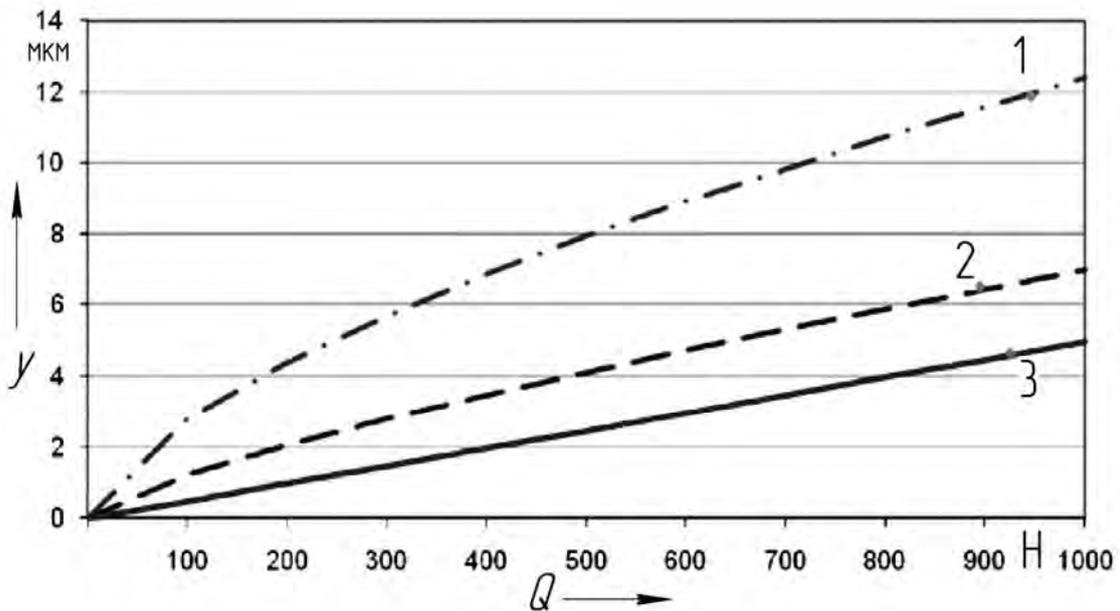
Проанализируем эмпирические зависимости (2.18)...(2.23) и построим их графики в виде $y = f(Q)$ при установке на сферические, рифленые и плоские опоры. Эти графики представлены на рисунках 2.19 и 2.20.

Из графиков видно, что увеличение силы закрепления заготовки в приспособлении приводит к увеличению ее смещения независимо от иных условий, а также то, что наибольшей жесткостью обладает рифленая опора, а наименьшей – сферическая.



1 – сферическая опора; 2 – плоская опора; 3 – рифленая опора

Рисунок 2.19 – Зависимости смещения заготовки с Ra 0,542 мкм и 140 HB от прикладываемой нагрузки при установке на различные типы опор



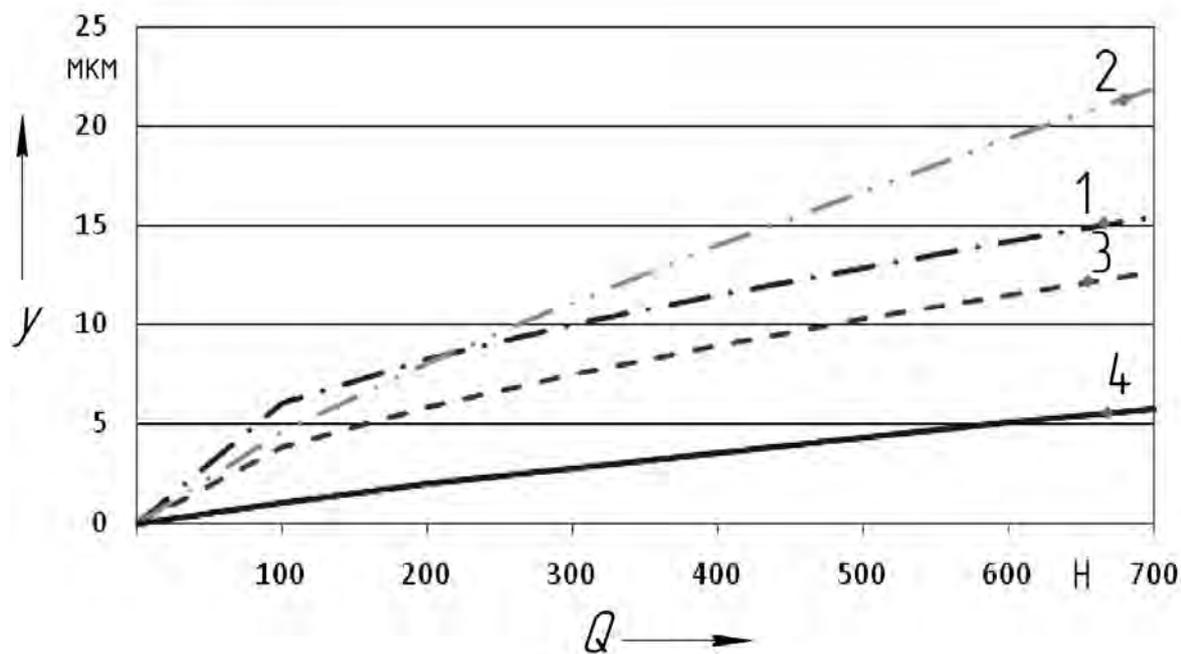
1 – сферическая опора; 2 – плоская опора; 3 – рифленая опора

Рисунок 2.20 – Зависимости смещения заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HB от прикладываемой нагрузки при установке на различные типы опор

Расчетные значения смещений заготовки под действием сил закрепления при установке на сферических опорах превышают экспериментальные, причем величина этого превышения при различных силах Q различная и с увеличением силы возрастает и составляет для соотношения, представленного в работе В. С. Корсакова, 72,46...76,32 %; в работе В. В. Микитянского – 53,73...82,06 %; в справочнике Б. Н. Вардашкина – 46,75...71,77 %.

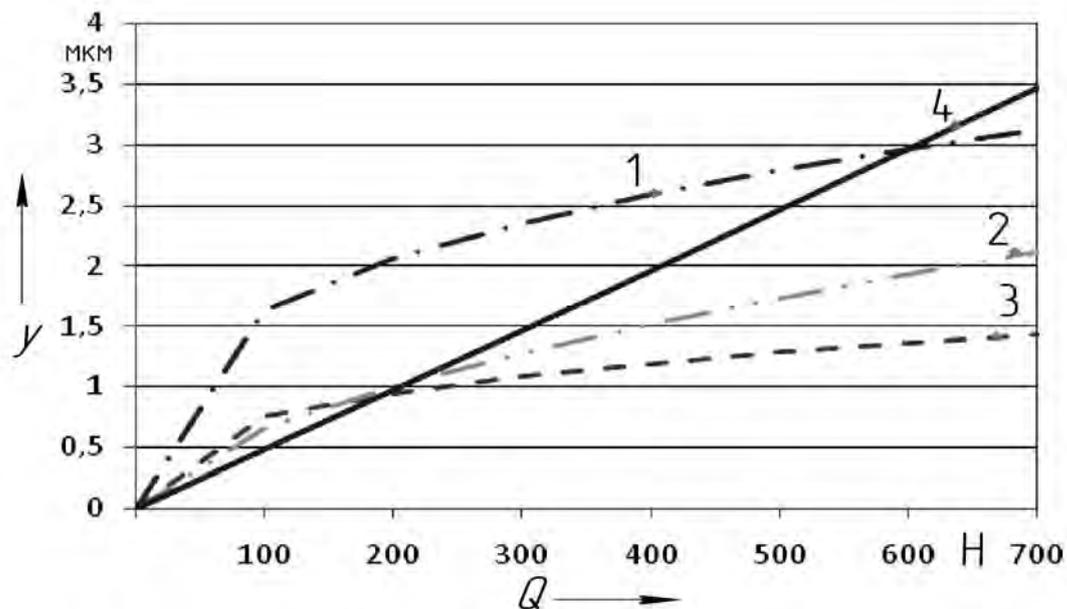
При установке заготовки на плоских и рифленых точечных опорах экспериментальные значения ее смещений соответствуют смещениям, вычисленным по зависимостям (2.3), (2.4), (2.7), (2.8), (2.11) и (2.12).

На рисунках 2.21...2.23 представлены графики изменения смещений заготовки с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HV под действием сил закрепления при установке на различные типы опор, построенные на основе выражений (2.3)...(2.8), (2.10)...(2.12) и полученных эмпирических зависимостей (2.18)...(2.23).



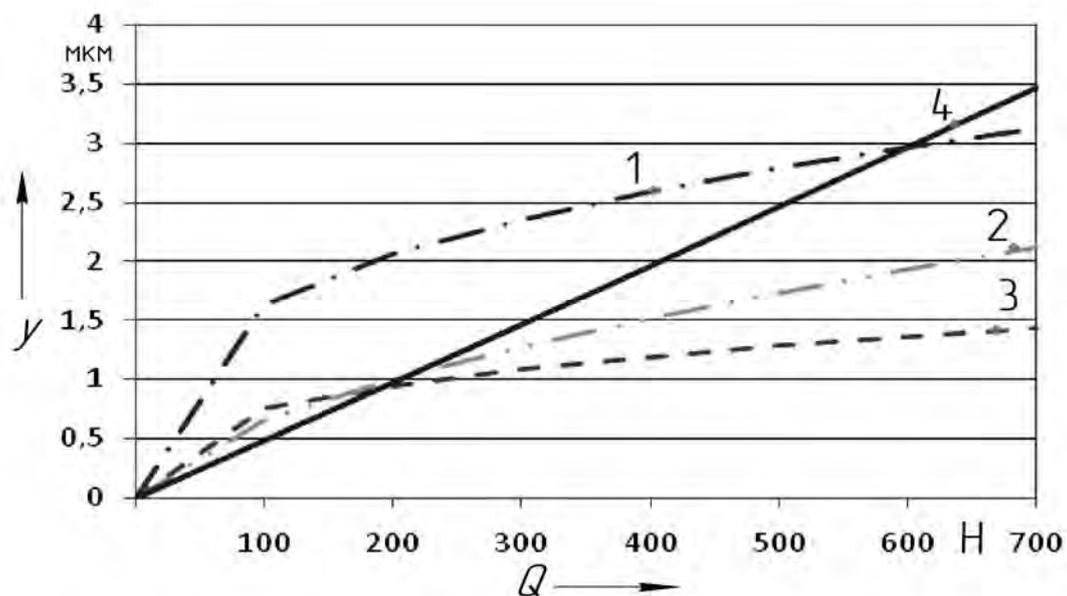
1 – график, построенный по зависимостям, представленным в работе В. В. Микитянского; 2 – то же в работе В. С. Корсакова; 3 – то же в работе Б. Н. Вардашкина; 4 – экспериментальные результаты

Рисунок 2.21 – Зависимости смещения заготовки с Ra 0,962 мкм и 156 HV от прикладываемой нагрузки при установке на сферических опорах



1 – график, построенный по зависимостям, представленным в работе В. В. Микитянского; 2 – то же в работе В. С. Корсакова; 3 – то же в работе Б. Н. Вардашкина; 4 – экспериментальные результаты

Рисунок 2.22 – Зависимости смещения заготовки с $Ra\ 0,962\ \mu\text{м}$ и $156\ \text{HB}$ от прикладываемой нагрузки при установке на рифленых опорах



1 – график, построенный по зависимостям, представленным в работе В. В. Микитянского; 2 – то же в работе В. С. Корсакова; 3 – то же в работе Б. Н. Вардашкина; 4 – экспериментальные результаты

Рисунок 2.23 – Зависимости смещения заготовки с $Ra\ 0,962\ \mu\text{м}$ и $156\ \text{HB}$ от прикладываемой нагрузки при установке на плоских опорах

Следует отметить, что эмпирические зависимости (2.18)...(2.23) справедливы в рамках тех условий, которые были реализованы при проведении эксперимента. Для других условий они могут давать существенные отклонения, и пользоваться ими целесообразно только при весьма приближенной оценке значений y .

Связь между расчетными y_p и экспериментальными $y_{\text{э}}$ значениями можно выразить соотношением

$$y_{\text{э}} = ky_p, \quad (2.39)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий факторы, которые не участвуют в вычислениях смещений по расчетным зависимостям.

В таблице 2.25 представлены зависимости вида $k = f(Q)$ из базы знаний интеллектуальной системы, применяемые для корректировки различных формул при закреплении заготовок с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HB , а также с Ra 0,542 мкм и 140 HB и использовании различных типов опор [163].

Таблица 2.25 – Расчетные зависимости поправочного коэффициента k

Наименование опоры	Формула		
	(2.10)...(2.12)	(2.6)...(2.8)	(2.3)...(2.5)
	Коэффициент k		
1	2	3	4
Заготовка с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,962 мкм и твердостью 156 HB			
Сферическая опора	$k = 0,277755 + 0,000278Q$	$k = 0,172033 + 0,000314Q$	$k = 0,236493 + 0,0000439Q$
Плоская опора	$k = 0,438297 + 0,001304Q$	$k = 0,535138 + 0,00039Q$	$k = 1,430158 + 0,000307Q$
Рифленая опора	$k = 0,424637 + 0,002921Q$	$k = 0,195333 + 0,001344Q$	$k = 0,655809 + 0,001471Q$
Заготовка с шероховатостью базовой поверхности Ra 0,542 мкм и твердостью 140 HB			
Сферическая опора	$k = 0,229814 + 0,000274Q$	$k = 0,166221 + 0,000299Q$	$k = 0,172849 + 0,0000665Q$
Плоская опора	$k = 0,438297 + 0,001304Q$	$k = 0,616475 + 0,0000843Q$	$k = 1,317499 - 0,00025Q$
Рифленая опора	$k = 2,091085 + 0,004159Q$	$k = 0,9619 + 0,001913Q$	$k = 1,079278 + 0,000461Q$

Окончание таблицы 2.25

1	2	3	4
Среднее значение k			
Сферическая опора	$k = 0,253785 + 0,000276Q$	$k = 0,169127 + 0,000307Q$	$k = 0,204671 + 0,0000552Q$
Плоская опора	$k = 0,546472 + 0,001202Q$	$k = 0,575807 + 0,000237Q$	$k = 1,373829 + 0,0000285Q$
Рифленая опора	$k = 1,257861 + 0,00354Q$	$k = 0,578616 + 0,001629Q$	$k = 0,867544 + 0,000966Q$

Как видно из зависимостей, приведенных в таблице 2.25, при нахождении поправочного коэффициента k силой закрепления заготовки можно пренебрегать. При этом погрешность вычисления лежит в пределах 0,19...4,67 %.

3 Методика формирования обобщенной базы знаний семантической сети для обеспечения точности механической обработки концевым инструментом

3.1 База знаний интеллектуальной системы

В этом разделе рассмотрена методика построения отношений функциональной семантической сети, используемой для оценки отдельных составляющих погрешности обработки концевым инструментом.

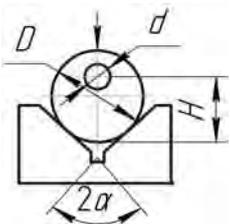
Анализ существующих зависимостей, определяющих составляющие погрешностей, проводится с целью построения отношений семантической сети, т. к. ряд данных, приводимых в справочной литературе, не позволяет непосредственно использовать их в компьютерных программах.

Кроме этого, на основе результатов анализа можно выделить два типа параметров технологического процесса – неуправляемые, которые в семантической сети фиксируются на некотором неизменном уровне, и управляемые, образующие пространство поиска интеллектуальной системы.

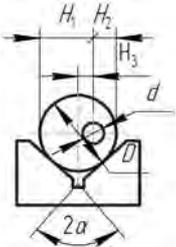
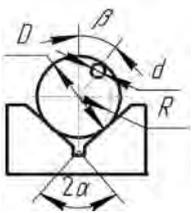
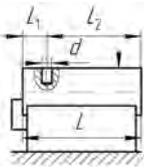
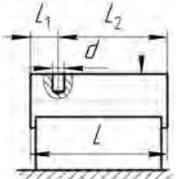
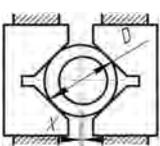
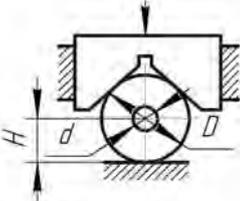
3.1.1 Отношения семантической сети для оценки погрешности базирования заготовки в приспособлении.

Погрешность базирования устанавливается геометрическим расчетом или с помощью анализа размерных цепей [152; 164; 165]. Формулы для расчета погрешностей базирования для типовых случаев применения приспособлений при обработке концевым инструментом приведены в таблице 3.1.

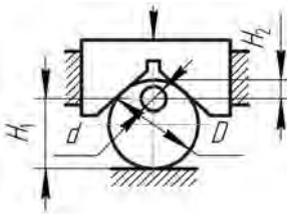
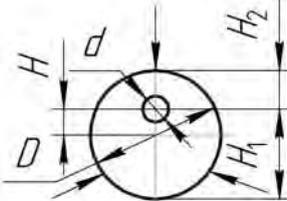
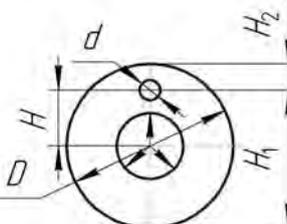
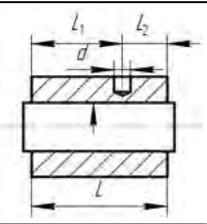
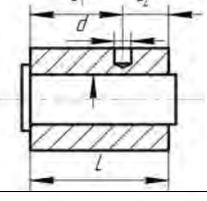
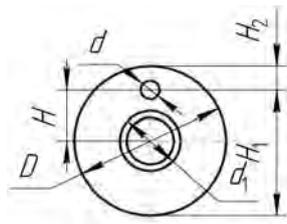
Таблица 3.1 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности базирования заготовки в приспособлении

Принцип базирования	Схема базирования	Выдерживаемый размер	Отношения семантической сети	Параметры сети
1	2	3	4	5
По наружной цилиндрической поверхности в призму		H	$0,5T_D \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) - \varepsilon_{\delta} = 0$ <p>при $H > 0,5D$</p>	ε_{δ} , T_D , α
			$0,5 \frac{T_D}{\sin \alpha} - \varepsilon_{\delta} = 0$ <p>при $H = 0,5D$</p>	

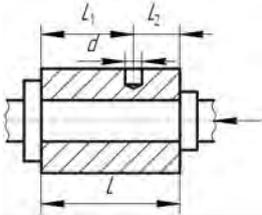
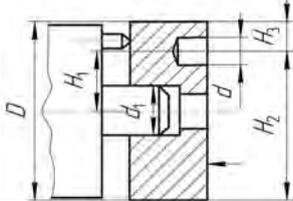
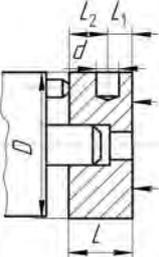
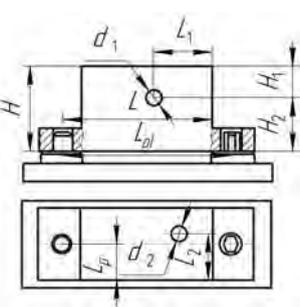
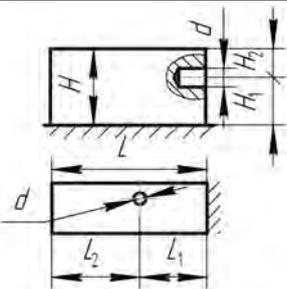
Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
			$0,5T_D \left(\frac{1}{\sin \alpha} + 1 \right) - \varepsilon_{\sigma} = 0$ при $H < 0,5D$	
		d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
В призме при обработке отверстия, расположенного перпендикулярно оси призмы и зажима		H_1, H_2	$0,5T_D - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_D$
		H_3, d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
В призме при обработке отверстия, расположенного под углом к оси призмы и зажима		β	$\arctg \frac{0,5T_D \sin \beta}{R \cos \alpha} - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_D, \beta, R, \alpha$
		R	$\frac{0,5T_D \cos \beta}{\sin \alpha} - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_D, \beta, \alpha$
		d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
В призме с упором в торец при обработке радиального отверстия		L_1, d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
		L_2	$T_L - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_L$
В призме без упора при обработке радиального отверстия		L_1, L_2	$T_L - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_L$
		d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
В самоцентрирующих призмах		d, X	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
По наружной цилиндрической поверхности на установочную плоскость с закреплением призмой		H	$0,5T_D - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_D$
		d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
По плоскости с центрированием подвижной призмой при обработке отверстия, расположенного на оси подвижной призмы		H_1, d	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}
		H_2	$T_D - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_D$
		H_3	$0,5T_D - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_D$
		d	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}
По наружной цилиндрической поверхности в самоцентрирующем устройстве		H	$0,5T_D - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_D$
		d, H_1, H_2	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}
По внутренней цилиндрической поверхности в самоцентрирующем устройстве при обработке осевого отверстия		d, H	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}
		H_1, H_2	$0,5T_D - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_D$
По внутренней цилиндрической поверхности без упора при обработке радиального отверстия		L_1, L_2	$T_L - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_L$
		d	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}
По внутренней цилиндрической поверхности с упором при обработке радиального отверстия		d, L_1	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}
		L_2	$T_L - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_L$
По внутренней цилиндрической поверхности во втулке		H_1, H_2	$T_D - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_D$
		d	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}
По внутренней цилиндрической поверхности на жесткой оправке при обработке осевого отверстия		H	$T_D - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_D$
		H_1, H_2	$0,5T_D + T_{d1} - \varepsilon_{\delta} = 0$	$\varepsilon_{\delta}, T_D, T_{d1}$
		d	$\varepsilon_{\delta} = 0$	ε_{δ}

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4	5
По внутренней цилиндрической поверхности на жесткой оправке при обработке радиального отверстия		d, L_1	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
		L_2	$T_L - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_L$
По внутренней цилиндрической поверхности на пальце при обработке осевого отверстия		H_1	$T_D - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_D$
		H_2, H_3	$0,5T_D + T_{d1} - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_D, T_{d1}$
		d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
По внутренней цилиндрической поверхности на пальце при обработке радиального отверстия		L_1	$T_L - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_L$
		L_2, d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
По двум цилиндрическим отверстиям на жесткий цилиндрический и срезанный пальцы		H_1	$T_H - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_H$
		H_2, d_1, d_2	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
		L_1	$S + T_L - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_L, S$
		L_2	$S + T_{Lp} + S \arctg \frac{S}{L_{pl}} - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_{Lp}, S, L_{pl}$
По плоскости при обработке отверстия		H_1, L_1, d	$\varepsilon_{\sigma} = 0$	ε_{σ}
		H_2	$T_H - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_H$
		L_2	$T_L - \varepsilon_{\sigma} = 0$	$\varepsilon_{\sigma}, T_L$

Таким образом, в качестве параметров семантической сети для расчета погрешности базирования заготовки в приспособлении выберем следующие параметры:

ε_{σ} – погрешность базирования заготовки, мм;

T_D, T_{d1} – допуски на диаметр заготовки D и диаметр цилиндрического пальца d_1 , мм;

T_L, T_H, T_{Lp} – допуски на линейные размеры, мм;

α – половина угла призмы;
 β – угол расположения обрабатываемого отверстия относительно оси призмы;

R – радиус расположения обрабатываемого отверстия, мм;

S – максимальный диаметральный зазор между базирующими отверстиями и жесткими цилиндрическими пальцами, мм;

L_{pl} – расстояние между опорными пластинами, мм.

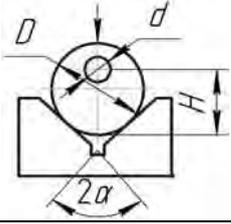
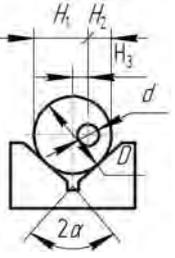
Из них в качестве управляемых выберем половину угла призмы α ; максимальный диаметральный зазор между базирующими отверстиями и жесткими цилиндрическими пальцами S ; расстояние между опорными пластинами L_{pl} .

3.1.2 Отношения семантической сети для оценки погрешности закрепления заготовки в приспособлении.

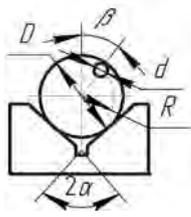
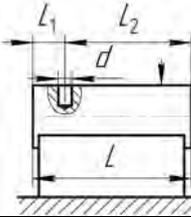
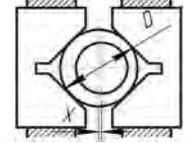
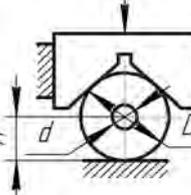
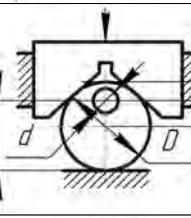
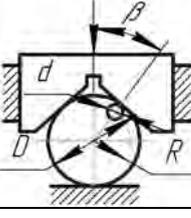
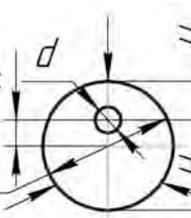
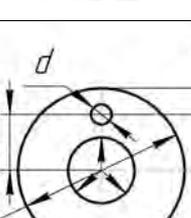
На погрешность закрепления наибольшее влияние оказывают следующие факторы: непостоянство сил закрепления; неодинаковая по величине шероховатость и волнистость базовых поверхностей заготовок; наличие стыков в направлении действующих сил закрепления [166; 167].

Отношения и параметры семантической сети для расчета погрешности закрепления заготовки в приспособлении представлены в таблице 3.2.

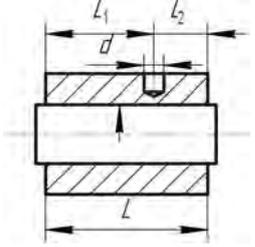
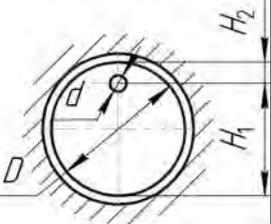
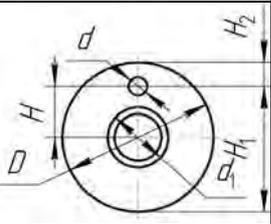
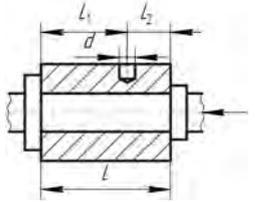
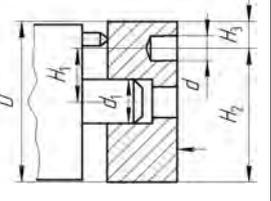
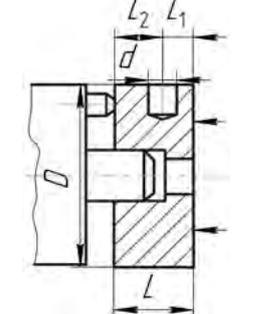
Таблица 3.2 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности закрепления заготовки в приспособлении

Схема базирования	Выдерживаемый размер	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
1	2	3	4
	H	$\left[\left(0,005Rz + \frac{15}{HB} \right) + 0,086 + \frac{8,4}{Dz} \right] \times$ $\times \left(\frac{W}{1,96l} \right)^{0,7} - \varepsilon_3 = 0$	$\varepsilon_3, Rz, HB,$ Dz, W, l
	$H_1, H_2,$ H_3, d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4
	β, R	$\left[\left(0,005Rz + \frac{15}{HB} \right) + 0,086 + \frac{8,4}{Dz} \right] \times$ $\times \left(\frac{W}{1,96l} \right)^{0,7} - \varepsilon_3 = 0$	$\varepsilon_3, Rz, HB, Dz, W, l$
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	L_1, L_2, d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	X, d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	H	$(0,08...0,25) - \varepsilon_3 = 0$	ε_3
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	H_1, H_2, H_3	$(0,08...0,25) - \varepsilon_3 = 0$	ε_3
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	β, R	$(0,08...0,25) - \varepsilon_3 = 0$	ε_3
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	H, H_1, H_2	$(0,08...0,26) - \varepsilon_3 = 0$	ε_3
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	H, H_1, H_2	$(0,005...0,09) - \varepsilon_3 = 0$	ε_3
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3

Окончание таблицы 3.2

1	2	3	4
	L_1, L_2, d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	H_1, H_2, d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	H, H_1, H_2, d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	L_1, L_2	$(0,005...0,09) - \varepsilon_3 = 0$	ε_3
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	H_1, H_2, H_3, d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3
	L_1, L_2	$\left[(K_{Rz} R_z + K_{HB} HB) + C_1 \right] \left(\frac{W}{9,8} \right)^n \times$ $\times \left(\frac{100}{F} \right)^m - \varepsilon_3 = 0$	$\varepsilon_3, R_z, HB, W, D$
	d	$\varepsilon_3 = 0$	ε_3

Таким образом, в качестве параметров семантической сети для расчета погрешности закрепления заготовки в приспособлении можно рассматривать следующие:

K_{Rz} , K_{HB} , n , m – коэффициенты, зависящие от типа опоры;

Rz – параметр шероховатости поверхности заготовки;

HB – твердость материала заготовки по Бринеллю;

W – сила, действующая по нормали к опоре, Н;

F – площадь контакта опоры с заготовкой, мм²;

D_z – диаметр заготовки, мм;

l – длина образующей, по которой происходит контакт, мм.

Из них в качестве управляемых выберем силу, действующую по нормали к опоре W ; площадь контакта опоры с заготовкой F ; длину образующей, по которой происходит контакт l .

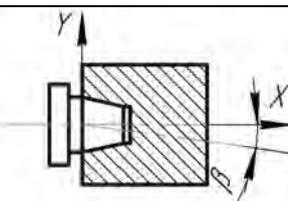
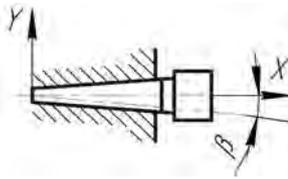
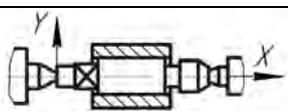
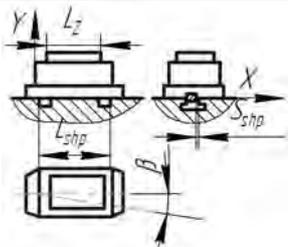
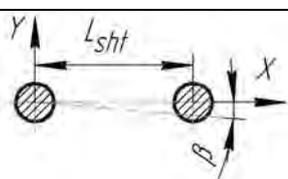
3.1.3 Отношения семантической сети для оценки погрешности установки приспособления на станке.

Погрешность установки приспособления на станке ε_y зависит от смещений или перекосов корпуса приспособления на столе, планшайбе или шпинделе станка. Смещения и перекосы возникают из-за зазоров между сопрягаемыми поверхностями приспособления и станка. В таблице 3.3 приведены зависимости для определения ε_y [22].

Таблица 3.3 – Классификация отношений семантической сети для оценки погрешности установки приспособления на станке

Принцип установки приспособления	Схема установки	Погрешность ε_y в направлении		
		оси X	оси Y	угла β
1	2	3	4	5
На горизонтальный шпиндель по торцу и центрирующему пояску		$\Delta T - \varepsilon_y = 0$	$S - \varepsilon_y = 0$	$2\arctg \frac{\Delta T}{d_p} - \varepsilon_y = 0$
На вертикальный стол по торцу и центрирующему пояску		$S - \varepsilon_y = 0$	$\Delta T - \varepsilon_y = 0$	$2\arctg \frac{\Delta T}{d_p} - \varepsilon_y = 0$

Окончание таблицы 3.3

1	2	3	4	5
На конус шпинделя		$(0,03...0,06) -$ $-\varepsilon_y = 0$	$\varepsilon_y = 0$	$\delta\alpha - \varepsilon_y = 0$
В шпиндель с конусом Морзе: № 0, 1, 2, 3 № 4, 5 № 6		$(0,01...0,2) -$ $-\varepsilon_y = 0$	$\varepsilon_y = 0$	$\delta\alpha - \varepsilon_y = 0$
В шпиндель с метрическим конусом: № 80 № 100		$(0,25...0,5) -$ $-\varepsilon_y = 0$		
В центрах		$(0,01...0,03) -$ $-\varepsilon_y = 0$	$\varepsilon_y = 0$	$\delta\alpha - \varepsilon_y = 0$
На горизонтальный стол по Т-образному пазу		$S_{shp} - \varepsilon_y = 0$	$\varepsilon_y = 0$	$\arctg \frac{L_z S_{shp}}{L_{shp}} -$ $-\varepsilon_y = 0$
По двум штифтовым отверстиям		$TL_{shf} + 0,25S_{shf} -$ $-\varepsilon_y = 0$	$\varepsilon_y = 0$	$\arctg \frac{L_z S_{shf}}{L_{shf}} -$ $-\varepsilon_y = 0$

Таким образом, у семантической сети для расчета погрешности установки приспособления на станке можно выделить следующие параметры:

ε_y – погрешность установки приспособления на станке, мм;

ΔT – торцевое биение опорной поверхности приспособления, которое принимается в пределах 0,01...0,04 мм;

S – максимальный зазор в сопряжениях базирующих поверхностей;

d_p – диаметр центрирующего пояска, мм;

$\delta\alpha$ – погрешность половины угла конуса α , которая принимается в пределах 2'...8';

S_{shp} – сумма максимальных зазоров между шпонками и Т-образными пазами станка, мм;

L_{shp} – расстояние между шпонками, мм;

L_z – длина обрабатываемой детали, мм;

S_{shf} – сумма максимальных зазоров между штифтами и отверстиями;

L_{shf} – расстояние между штифтовыми отверстиями, мм;

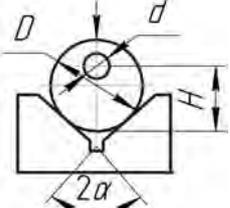
TL_{shf} – допуск на расположение координат штифтовых отверстий.

Из них в качестве управляемых выберем торцевое биение опорной поверхности приспособления ΔT ; максимальный зазор в сопряжениях базирующих поверхностей S ; погрешность половины угла конуса $\delta\alpha$; сумму максимальных зазоров между шпонками и Т-образными пазами станка S_{shp} ; расстояние между шпонками L_{shp} ; сумму максимальных зазоров между штифтами и отверстиями S_{shf} ; расстояние между штифтовыми отверстиями L_{shf} ; допуск на расположение координат штифтовых отверстий TL_{shf} .

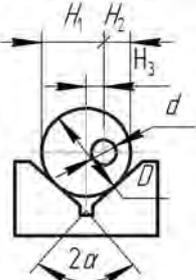
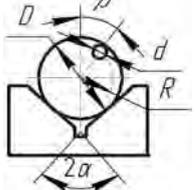
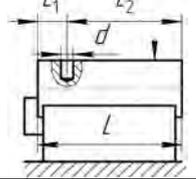
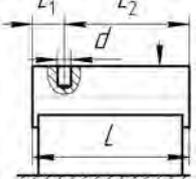
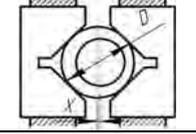
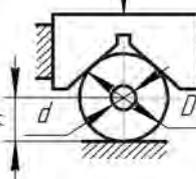
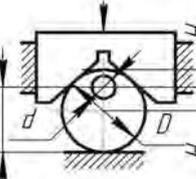
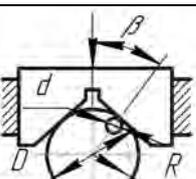
3.1.4 Отношения семантической сети для оценки погрешности обработки, связанной с износом элементов приспособления.

Отношения и параметры семантической сети для расчета погрешности обработки, связанной с износом элементов приспособления, представлены в таблице 3.4 [164].

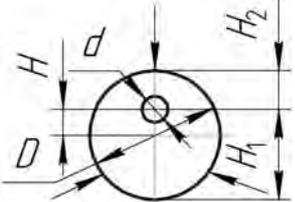
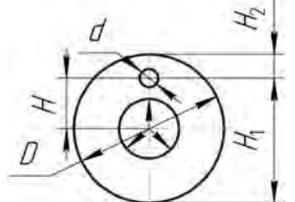
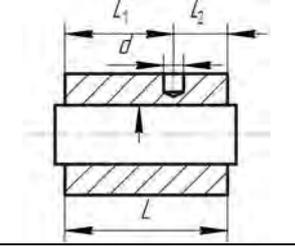
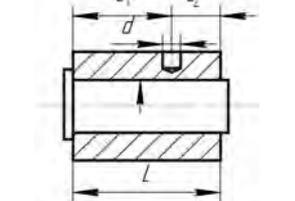
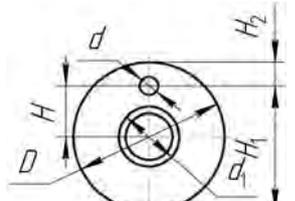
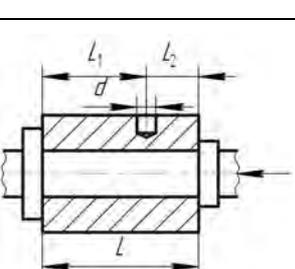
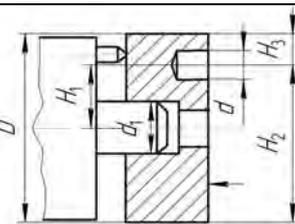
Таблица 3.4 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности обработки, связанной с износом элементов приспособления

Схема базирования	Выдерживаемый размер	Отношения семантической сети	Параметры сети
1	2	3	4
	H	$\frac{U}{\sin \alpha} - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U,$ $\alpha, U_0, K_1, K_2,$ K_3, K_4, N, N_0

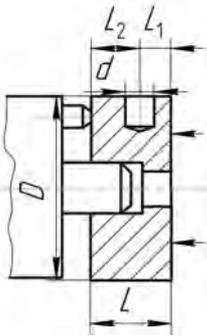
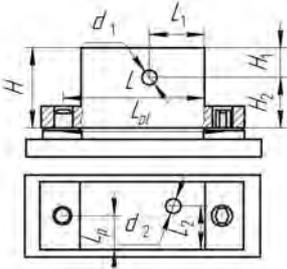
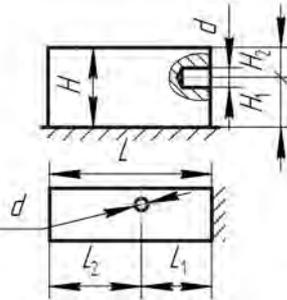
Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4
	$H_1, H_2,$ H_3	$\frac{U}{\sin \alpha} - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U,$ $\alpha, U_0, K_1, K_2,$ K_3, K_4, N, N_0
	β, R	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	L_1, L_2	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U,$ $U_0, K_1, K_2, K_3,$ K_4, N, N_0
	L_1, L_2	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	X	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	H	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	H_1	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	H_2, H_3	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1,$ $K_2, K_3, K_4, N,$ N_0
	β, R	$\varepsilon_u = 0$	ε_u

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4
	H, H_1, H_2	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	H, H_1, H_2	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	L_1, L_2	$\varepsilon_u = 0$	ε_u
	L_1, L_2	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1, K_2, K_3, K_4, N, N_0$
	H, H_1, H_2	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1, K_2, K_3, K_4, N, N_0$
	L_1, L_2	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1, K_2, K_3, K_4, N, N_0$
	H_1, H_2, H_3	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1, K_2, K_3, K_4, N, N_0$

Окончание таблицы 3.4

1	2	3	4
	L_1, L_2	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1, K_2, K_3, K_4, N, N_0$
	H_1, H_2, L_1, L_2	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1, K_2, K_3, K_4, N, N_0$
	H_1, H_2, L_1, L_2	$U - \varepsilon_u = 0$ $U_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{N}{N_0} - U = 0$	$\varepsilon_u, U, U_0, K_1, K_2, K_3, K_4, N, N_0$

В качестве параметров семантической сети для расчета погрешности обработки, связанной с износом элементов приспособления, можно рассматривать следующие:

ε_u – погрешность обработки, связанная с износом элементов приспособления, мм;

α – половина угла призмы;

U – износ установочных элементов приспособления, мм;

U_0 – средний износ установочных элементов для чугунной заготовки при усилии закрепления $W = 10$ кН и базовом числе установок $N_0 = 100000$, мм;

K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты, учитывающие влияние материала заготовки, оборудования, условий обработки и числа установок заготовки, если условия отличаются от принятых при определении U_0 ;

N – число установов.

Для расчета U будем принимать следующие значения среднего износа U_0 [164], представленные в таблице 3.5.

Коэффициенты выбираются в соответствии с приведенными далее рекомендациями [21].

$K_1 = 1$ – для чугуновых заготовок; $K_1 = 0,97$ – для незакаленной стали; $K_1 = 0,91$ – для закаленной стали.

$K_2 = 1,0$ – для универсального оборудования; $K_2 = 1,25$ – для специального оборудования; $K_2 = 1,57$ – для автоматических линий.

Для точения, фрезерования, сверления, зенкерования и других условий обработки лезвийными инструментами: стали с охлаждением $K_3 = 0,94$; стали без охлаждения $K_3 = 1,0$; чугуна без охлаждения $K_3 = 1,12$.

Коэффициент K_4 учитывает число установов N . Для числа установов $N \cdot 10^3$: при $N \leq 5$ $K_4 = 2,8$; при $N \leq 10$ $K_4 = 2,4$; при $N \leq 20$ $K_4 = 1,8$; при $N \leq 40$ $K_4 = 1,3$; при $N \leq 50 - 100$ $K_4 = 1$; при $N \leq 150$ $K_4 = 0,9$.

Из них в качестве управляемых выберем половину угла призмы α ; износ установочных элементов приспособления U ; число установов N .

Таблица 3.5 – Средний износ установочных элементов для чугунной заготовки при усилии закрепления $W = 10$ кН и базовом числе установов $N_0 = 100000$

Тип установочных элементов	Материал установочных элементов				
	Сталь 20 цементованная закаленная	Сталь 40X закаленная	Сталь У10А закаленная	Сталь 45 с хромовым покрытием	Твердый сплав ВК8
	Средний износ				
Постоянная опора со сферической головкой	170	155	145	70	–
Постоянная опора с плоской головкой	85	75	70	–	14
Постоянная опора с насеченной головкой	145	135	130	–	–
Опорные пластины гладкие	45	40	38	25	12
Опорные пластины с косыми срезами	50	45	42	28	–
Призмы	125	115	110	65	18
Срезанные установочные пальцы	100	90	85	50	–
Цилиндрические установочные пальцы	65	55	50	25	–
Цилиндрические оправки	60	50	45	25	–

3.1.5 Отношения семантической сети для оценки погрешности, обусловленной геометрическим смещением оси концевой инструмента.

Геометрическое смещение инструмента зависит от величины зазора в сопряжении «сменная втулка–инструмент», смещения осей шпинделя и постоянной втулки, радиального биения инструмента, величины зазора в сопряжении «постоянная–сменная втулки» и эксцентриситета сменной втулки [168].

Геометрическое смещение оси достигает наибольшего значения в концевом сечении инструмента. Схема образования данной погрешности представлена на рисунке 3.1.

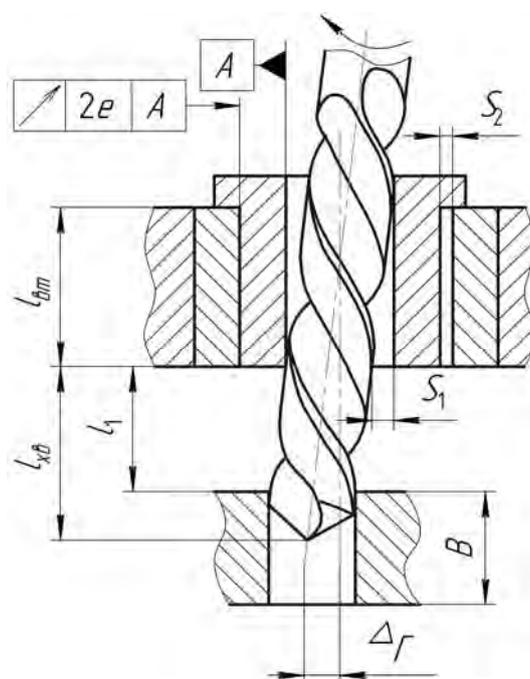


Рисунок 3.1 – Схема образования погрешности, обусловленной геометрическим смещением оси концевой инструмента

Величина геометрического смещения оси инструмента в период эксплуатации возрастает по сравнению с первоначальной величиной вследствие увеличения зазора от износа внутренней поверхности сменной втулки и соприкасающейся с ней направляющей части инструмента. Износу втулок способствуют неблагоприятные условия трения в связи с засоренностью поверхностей стружкой и кромочным контактом инструмента со втулкой вблизи ее торцовых сечений.

Из-за наличия у инструмента обратной конусности величина зазора существенно изменяется в зависимости от длины рабочего хода инструмента.

Суммарную величину зазора следует считать случайной, т. к. сочетание размеров отверстия втулки, инструмента и величины обратной конусности при установке на станок в момент наладки является случайным. Зазор, вызванный износом втулки, нужно рассматривать как закономерно изменяющуюся погрешность.

Влияние износа втулки на смещение оси отверстия показано на рисунке 3.2.

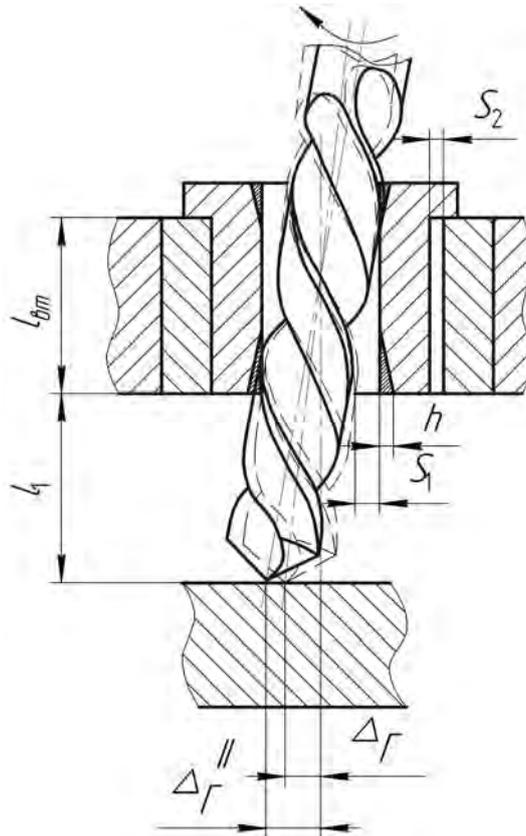


Рисунок 3.2 – Влияние износа втулки на смещение оси отверстия

Вместо геометрического смещения оси инструмента на величину Δ_r для новой втулки при наличии износа ось инструмента смещается на величину Δ_r'' .

В расчет принимается величина износа $h = h_1$ на выходном конце втулки, т. к. износ на выходном сечении оказывает большее влияние на Δ_r .

Отношения и параметры семантической сети для определения погрешности обработки от перекоса и смещения инструмента представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности от перекоса и смещения инструмента

Наименование отношений семантической сети	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
Геометрическое смещение оси инструмента	$\Delta_{\Gamma} - (h + \delta S_1) \left(0,5 + \frac{l_x}{l_{em}} \right) - 0,5S_2 - e = 0$	$\Delta_{\Gamma}, h, \delta S_1, l_x, l_{em}, S_2, e_c$
Поле рассеивания суммарного зазора в сопряжении «втулка–инструмент»	$\delta S_1 - \sqrt{\delta A^2 + \delta B^2 + \delta B_{o.k.}^2} - S_1 = 0$ $\delta S_1 - \sqrt{\delta A^2 + \delta B^2} - S_1 = 0$ (для развертывания)	$\delta S_1, \delta A, \delta B, \delta B_{o.k.}, S_1$

Таким образом, у семантической сети для расчета погрешности обработки, обусловленной перекосом и смещением инструмента, были выделены следующие параметры:

Δ_{Γ} – погрешность обработки от перекоса и смещений инструмента, мм;

h – износ сменной втулки, мм;

δS_1 – поле рассеивания суммарного зазора в сопряжении «втулка–инструмент», мм;

δA – поле допуска на размер отверстия сменной втулки, мм;

δB – поле допуска на размер направляющей части инструмента, мм;

$\delta B_{o.k.}$ – поле допуска на величину обратной конусности, мм;

S_1 – диаметральный зазор между кондукторной втулкой и инструментом, мм;

S_2 – зазор между сменной и постоянной втулками, мм;

e – несоосность наружной и внутренней поверхностей сменной втулки, мм;

l_x – вылет инструмента за торец втулки, мм;

l_{em} – длина кондукторной втулки, мм.

Из них в качестве управляемых выберем диаметральный зазор между сменной кондукторной втулкой и инструментом S_1 ; вылет инструмента за торец втулки l_x ; длину сменной кондукторной втулки l_{em} ; зазор между сменной и постоянной втулками S_2 ; несоосность наружной и внутренней поверхностей сменной втулки e .

3.1.6 Отношения семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной упругим смещением оси концевой инструмента.

При обработке инструментом, жестко закрепленным в шпинделе

станка и направляемым по кондукторным втулкам, величина упругих отжятий зависит от жесткости режущего инструмента, кондукторной плиты и заготовки. При этом в качестве основных факторов следует рассматривать упругие отжятия режущего инструмента и кондукторной плиты, а отжятия заготовки, вследствие относительно высокой ее жесткости, можно не учитывать.

Величина упругих смещений оси инструмента зависит от жесткости технологической системы. Существенное влияние на величину упругих отжятий оказывают такие производственные факторы, как неравномерность твердости материала обрабатываемой детали, неравномерность подачи инструмента и колебания температурных деформаций технологической системы. При наличии неравномерного припуска колебания упругих отжятий будут зависеть от параметров процесса резания: подачи, глубины и скорости резания.

Упругое смещение оси инструмента и кондукторной плиты вызывается влиянием неуравновешенных сил, действующих в диаметральном и осевом сечениях инструмента. Неуравновешенные силы появляются в результате неравномерной загрузки противоположащих зубьев осевого режущего инструмента при снятии ими неравномерного (эксцентричного) припуска (рисунок 3.3).

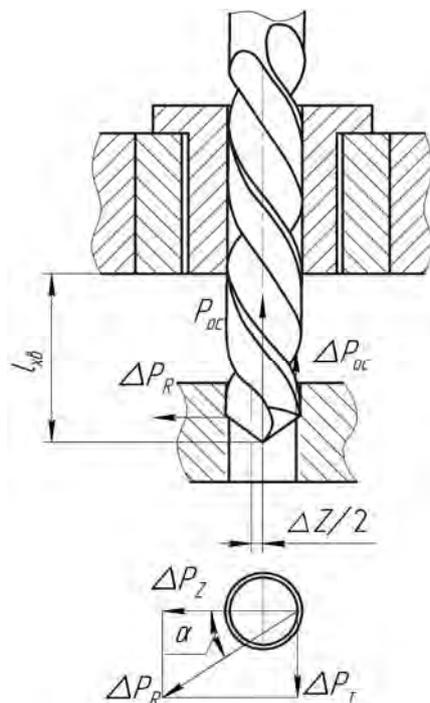


Рисунок 3.3 – Возникновение неуравновешенных сил

При обработке отверстий с эксцентрично расположенным припуском неуравновешенная радиальная сила направлена в сторону наименьшего припуска, а тангенциальная – перпендикулярно ей в сторону вращения шпинделя. Вектор равнодействующей неуравновешенных сил ΔP_R направлен под углом $\alpha = 41...45^\circ$ к плоскости смещения припуска [168].

Неравномерность припуска на обработку обуславливается смещением оси отверстия O_1 , подлежащего обработке, от оси инструмента O_2 перед обработкой (рисунок 3.4).

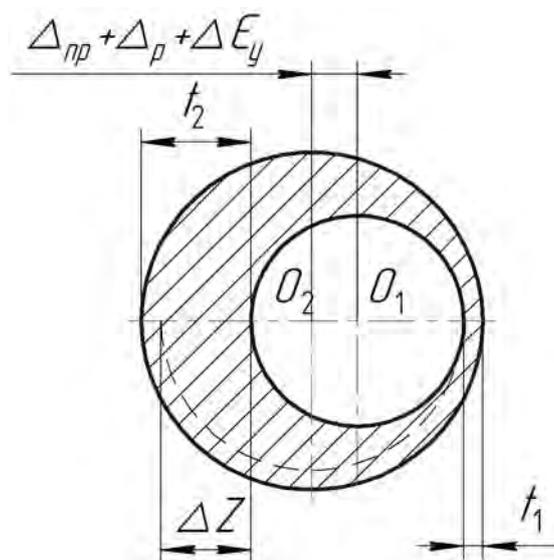


Рисунок 3.4 – Неравномерность припуска на обработку

Отношения и параметры семантической сети для определения погрешности обработки, обусловленной упругим смещением оси концевой инструмента, представлены в таблице 3.7.

Из них в качестве управляемых выберем длину вылета инструмента за торец втулки l_x ; погрешность размеров между осью шпинделя и базовыми элементами позиции $\Delta \rho$; погрешность установки заготовки ϵ ; подачу инструмента S ; глубину резания t .

Таблица 3.7 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной упругим смещением оси инструмента

Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
$n_3 \cdot \Delta_{yu} - \Delta_y = 0$	Δ_y – погрешность обработки, обусловленная упругим смещением оси инструмента, мм; n_3 – коэффициент, зависящий от жесткости инструментальной наладки [168]; Δ_{yu} – величина упругого отжатия инструмента, мм
$\Delta_{yu} - n_2 \frac{\Delta P_R l_x^3}{3EI} = 0$	Δ_{yu} – величина упругого отжатия инструмента, мм; n_2 – коэффициент, учитывающий влияние силы осевой подачи инструмента P_o и неуравновешенной осевой силы резания ΔP_o [168]; ΔP_R – равнодействующая неуравновешенных сил, Н; l_x – длина вылета инструмента за торец втулки, мм; E – модуль упругости первого рода, $E = 2 \cdot 10^7$ Н/мм ² ; I – осевой момент инерции поперечного сечения инструмента, мм ⁴
$I - cD^4 = 0$	I – осевой момент инерции поперечного сечения инструмента, мм ⁴ ; c – коэффициент, учитывающий тип инструмента (для сверл $c = 0,011$; для зенкеров трехзубых $c = 0,018$ и четырехзубых $c = 0,023$; для разверток $c = 0,026$) [168]; D – диаметр инструмента, мм
$\Delta P_R - 0,25k\Delta Z C_R = 0$	ΔP_R – равнодействующая неуравновешенных сил, Н; k – число зубьев режущего инструмента; C_R – коэффициент, учитывающий режимы обработки и материал обрабатываемой заготовки; ΔZ – величина неравномерности припуска на обработку, мкм
$2\sqrt{\Delta_{np}^2 + \Delta\rho^2 + \varepsilon^2} - \Delta Z = 0$	Δ_{np} – смещение оси отверстия от предшествующего перехода, мкм; $\Delta\rho$ – погрешность размеров между осью шпинделя и базовыми элементами приспособления, мкм; ε – погрешность установки заготовки, мкм; ΔZ – величина неравномерности припуска на обработку, мкм
$C_R - ((C_1 t^{x_1} S^{y_1} HB^{n_1})^2 - (C_2 t^{x_2} S^{y_2} HB^{n_2})^2)^{0,5} = 0$	$C_1, C_2, x_1, x_2, y_1, y_2, n_1, n_2$ – эмпирические коэффициенты; C_R – коэффициент, учитывающий режимы обработки и материал обрабатываемого материала; t – глубина резания, мм; S – подача инструмента, мм/об; HB – твердость обрабатываемого материала

3.1.7 Отношения семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной температурными деформациями.

При работе станка происходит постепенное нагревание всех элементов технологической системы. Это обусловлено потерями на трение в подвижных соединениях, а также интенсивным выделением тепла в зоне резания.

Значительно на точность обработки влияет нагревание шпиндельных бабок станков и самой детали. Нагрев шпиндельной бабки, сопровождающийся смещением оси шпинделя, продолжается 3...5 ч до стабилизации, и за это время происходит постепенное смещение оси. Оно невелико и достигает наибольшей величины 8...9 мкм (для сверлильного станка) [20]. Смещение оси шпинделя, связанное с нагревом шпиндельной бабки, представлено на рисунке 3.5.

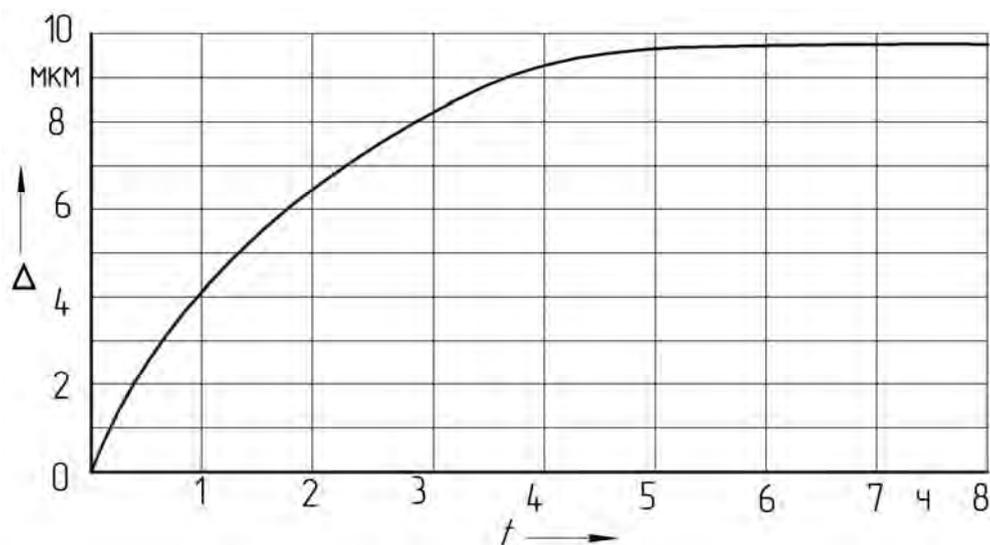


Рисунок 3.5 – Смещение оси шпинделя, связанное с нагревом шпиндельной бабки

Для описания теплового расширения будем использовать зависимость, отражающую переходный процесс динамического звена первого порядка, в условиях компьютерного расчета:

$$\Delta_{TC}(t) = \Delta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (3.1)$$

где Δ_{\max} – максимальное смещение оси шпинделя, мкм;
 t_c – время работы станка, ч;

T – постоянная времени, ч.

Распределение теплоты резания между стружкой, деталью, инструментом зависит от метода, условий обработки, материала обрабатываемой детали и инструмента. При сверлении до 60 % выделяемой теплоты переходит в деталь. В связи с этим более существенными являются тепловые деформации обрабатываемой детали.

Отношения и параметры семантической сети для определения погрешности обработки, обусловленной температурными деформациями, представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной температурными деформациями

Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
$\Delta_T - \Delta_{TC} - \Delta_{TD} = 0$	Δ_T – погрешность обработки, обусловленная температурными деформациями, мм; Δ_{TC} – погрешность обработки, обусловленная температурными деформациями узлов станка, мм; Δ_{TD} – погрешность обработки, обусловленная температурными деформациями детали, мм
$\Delta_{TD} - \alpha D \Delta \theta_D = 0$	Δ_{TD} – погрешность обработки, обусловленная температурными деформациями детали, мм; D – диаметр отверстия, мм; α – коэффициент линейного расширения материала детали, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\Delta \theta_D$ – изменение температуры детали, $^{\circ}\text{C}$
$Q - 0,0036VP_z = 0$	Q – тепловыделение [169], Дж; V – скорость резания, м/мин; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н
$\theta_{\max} - 27,6 \frac{Q\sqrt{\varpi}}{\lambda b\sqrt{V(b+l_1)}} = 0$	θ_{\max} – температура вдоль режущей кромки сверла [170], $^{\circ}\text{C}$; Q – тепловыделение, Дж; ϖ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; b – ширина среза, мм; V – скорость резания, м/мин; l_1 – длина контактной площадки ($l_1 = 0,2$ мм)
$b - \frac{t}{\sin \varphi} = 0$	b – ширина среза [171], мм; t – глубина резания, мм; φ – половина угла при вершине сверла
$\Delta \theta_D - k \Delta \theta_u = 0$	$\Delta \theta_D$ – изменение температуры детали, $^{\circ}\text{C}$; k – коэффициент, учитывающий глубину обрабатываемого отверстия; $\Delta \theta_u$ – изменение температуры инструмента, $^{\circ}\text{C}$

Из них в качестве управляемых выберем скорость резания V ; время работы станка t_c .

3.1.8 Отношения семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной диссимметрией режущей части инструмента.

При формообразовании отверстий концевыми мерными инструментами возникают также погрешности, обусловленные диссимметрией их режущей части, связанные с погрешностями заточки главных углов в плане φ_1 и φ_2 , осевого сдвига вершин τ и др.

На рисунке 3.6 приведена схема образования погрешности, обусловленной диссимметрией режущей части инструмента.

Из рисунка видно, что при диссимметрии режущей части инструмента форма отверстия в поперечном сечении формируется дугами различных радиусов

$$R_i(\psi + j\pi), \quad (3.2)$$

где ψ – текущий угол поворота инструмента вокруг своей оси.

Профиль отверстия в продольном сечении представляет собой ступенчатую поверхность, параметры которой зависят от разности заточки главных углов в плане φ_1 и φ_2 .

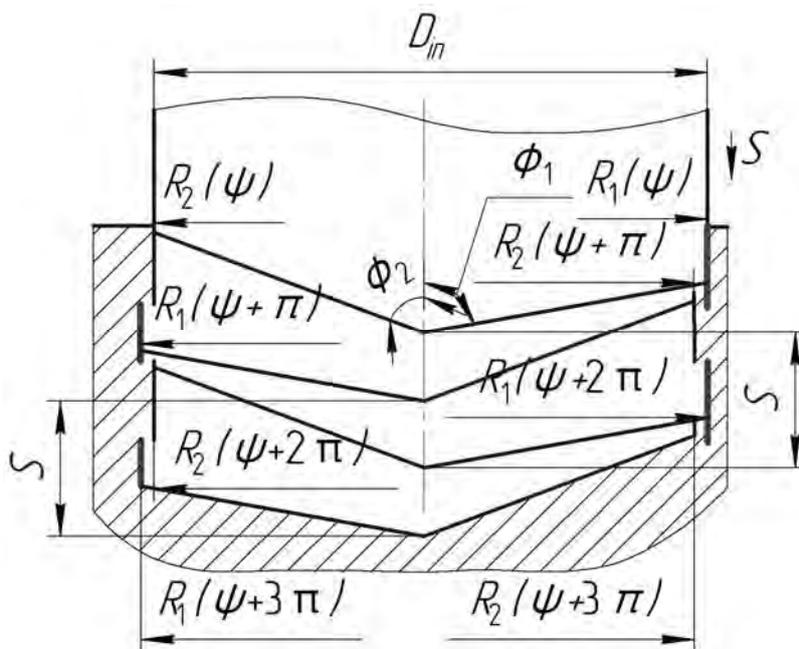


Рисунок 3.6 – Схема образования погрешности, обусловленной диссимметрией режущей части инструмента

Схема определения величин радиусов R_i показана на рисунке 3.7.

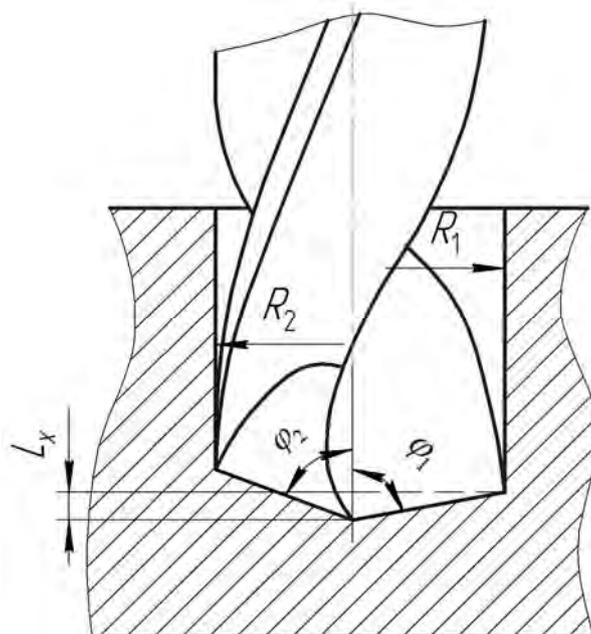


Рисунок 3.7 – Схема определения погрешности, обусловленной диссимметрией режущей части инструмента

$$R_1 = L_{x1} \operatorname{tg}(90 - \varphi_1); \quad (3.3)$$

$$R_2 = L_{x2} \operatorname{tg}(90 - \varphi_2). \quad (3.4)$$

Проекции длин режущих частей лезвий на ось инструмента [172]

$$L_{x1} = \frac{D - D_o}{2 \operatorname{tg} \varphi_1}; \quad (3.5)$$

$$L_{x2} = \frac{D - D_o}{2 \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (3.6)$$

где D – диаметр инструмента;

D_o – диаметр предварительно обработанного отверстия или при сверлении в сплошном металле – длина перемычки сверла.

Если $\varphi_1 > \varphi_2$, тогда погрешности обработки отверстий концевыми мерными инструментами, обусловленной диссимметрией режущей части инструмента, соответствует отношение

$$\Delta_{in} = \frac{D}{2} - R_1 = \frac{D}{2} - \frac{D - D_o}{2 \operatorname{tg} \varphi_1} \operatorname{tg}(90 - \varphi_1); \quad (3.7)$$

$$\Delta_{in} = R_1 - R_2 = \frac{D - D_o}{2} \left(\frac{\operatorname{tg}(90 - \varphi_1)}{\operatorname{tg} \varphi_1} - \frac{\operatorname{tg}(90 - \varphi_2)}{\operatorname{tg} \varphi_2} \right).$$

Отношения и параметры семантической сети для определения погрешности обработки, обусловленной диссимметрией режущей части инструмента, представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной диссимметрией режущей части инструмента

Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
$\Delta_{in} - \frac{D - D_o}{2} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}(90 - \varphi_1)}{\operatorname{tg} \varphi_1} - \frac{\operatorname{tg}(90 - \varphi_2)}{\operatorname{tg} \varphi_2} \right) = 0$	$\Delta_{in}, D, D_o, \varphi_1, \varphi_2$ (при $\varphi_1 > \varphi_2$)

Из них в качестве управляемых выберем главные углы в плане φ_1 и φ_2 .

3.1.9 Отношения семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной износом режущего инструмента.

В процессе механической обработки резанием происходит износ режущих кромок инструмента в результате трения их о стружку и обрабатываемую поверхность заготовки детали. За характеристику размерного износа принят относительный износ u_0 .

Величины относительного размерного износа концевых инструментов для обработки отверстий в литературе на данный момент не приводятся. В связи с этим относительный износ инструмента будем определять из максимально допустимого износа инструмента. Для сверл из быстрорежущей стали $\Delta_{дон} = 0,8 \dots 1,2$ мм, а для твердосплавных сверл – $0,4 \dots 1,1$ мм. За лимитирующий износ зенкеров из инструментальных сталей принимается износ $\Delta_{дон} = 1,2 \dots 1,5$ мм, а для зенкеров с пластинками твердых сплавов $\Delta_{дон} = 1 \dots 1,4$ мм. Максимально допустимая величина износа для разверток из инструментальных сталей $\Delta_{дон} = 0,6 \dots 0,8$ мм. Для разверток с пластинками твердых сплавов $\Delta_{дон} = 0,4 \dots 0,7$ мм [170].

Отношения и параметры семантической сети для определения погрешности обработки, обусловленной износом режущего инструмента, представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной износом режущего инструмента

Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
$\Delta_u - \frac{2u_0 l}{1000} = 0$	Δ_u – погрешность обработки, обусловленная износом режущего инструмента [18], мм; u_0 – интенсивность износа инструмента, мкм/км; l – путь резания, м
$l - \frac{\pi D L n}{1000 S} = 0$	l – путь резания [18], м; D – диаметр режущего инструмента, мм; L – расчетная длина обработки с учетом пути врезания и перебега режущего инструмента, мм; n – количество деталей в настроенной партии, обрабатываемой в период между подналадками станка; S – подача инструмента, мм/об
$u_0 - \frac{1000 \Delta_{\text{дон}}}{2L_T} = 0$	u_0 – интенсивность износа инструмента, мкм/км; $\Delta_{\text{дон}}$ – максимально допустимый износ инструмента, мкм; L_T – длина пути резания за период стойкости инструмента, м
$L_T - VT = 0$	L_T – длина пути резания за период стойкости инструмента [168], м; V – скорость резания, м/мин; T – период стойкости инструмента, мин

Из них в качестве управляемых выберем количество деталей в настроенной партии, обрабатываемых в период между подналадками станка n ; подачу инструмента S ; скорость резания V ; период стойкости инструмента T .

3.1.10 Отношения семантической сети для оценки погрешности обработки, обусловленной геометрической неточностью технологической системы.

При использовании традиционной методики обеспечения точности механической обработки погрешности станка и приспособления задаются численными значениями. При этом конструктивно-технологические параметры, закладываемые при проектировании и изготовлении технологического оборудования, влияющие на величину пространственного сме-

щения оси отверстия, не участвуют в управлении точностью. Не учитывается также и фактическое состояние технологического оборудования, изменяющееся в процессе его эксплуатации.

Следует также учитывать, что точность расположения оси обрабатываемых отверстий определяется геометрической точностью основных узлов технологической системы: узлов направления инструмента, узлов установки детали и их взаимного расположения между собой. Кроме того, она зависит от точности расположения осей инструментальных наладок относительно узлов направления инструмента, которая, в свою очередь, определяется геометрической точностью сверлильного станка.

Обеспечение точности размера A_{Δ} , определяющего положение отверстия относительно оси шпинделя станка, может базироваться на использовании размерной цепи A .

Геометрическая схема рассматриваемой технологической системы и ее размерная цепь приведены на рисунке 3.8.

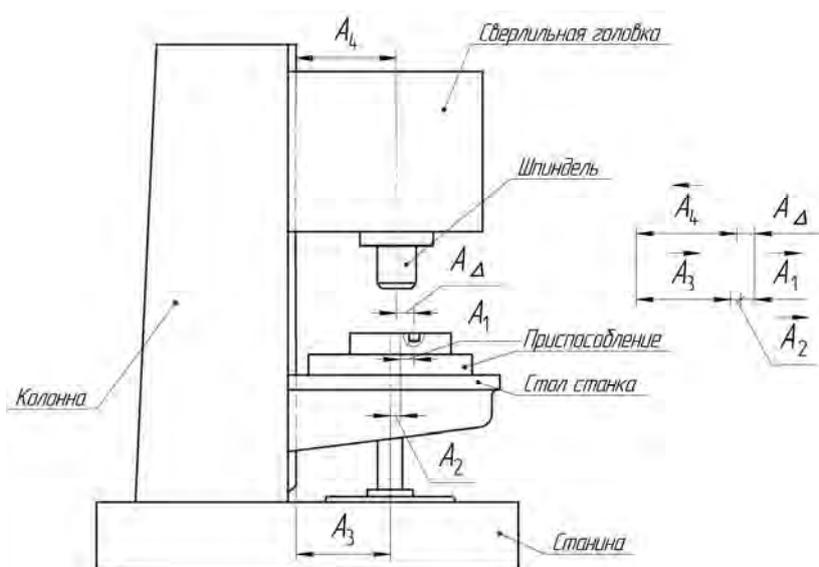


Рисунок 3.8 – Геометрическая схема технологической системы и ее размерная цепь

В этой цепи приняты обозначения: A_1 – расстояние от оси отверстия до оси приспособления; A_2 – отклонение от соосности оси стола и оси приспособления; A_3 – расстояние от оси стола станка до рабочей поверхности колонны; A_4 – расстояние от оси вращения шпинделя до рабочей поверхности колонны.

Из схемы видно, что увеличивающимися звеньями являются A_1 , A_2 , A_3 , а звено A_4 – уменьшающим. Тогда [173]

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 + A_3 - A_4. \quad (3.8)$$

В свою очередь, задача обеспечения перпендикулярности оси отверстия β_{Δ} относительно установочной базы детали решается с помощью размерной цепи, приведенной на рисунке 3.9.

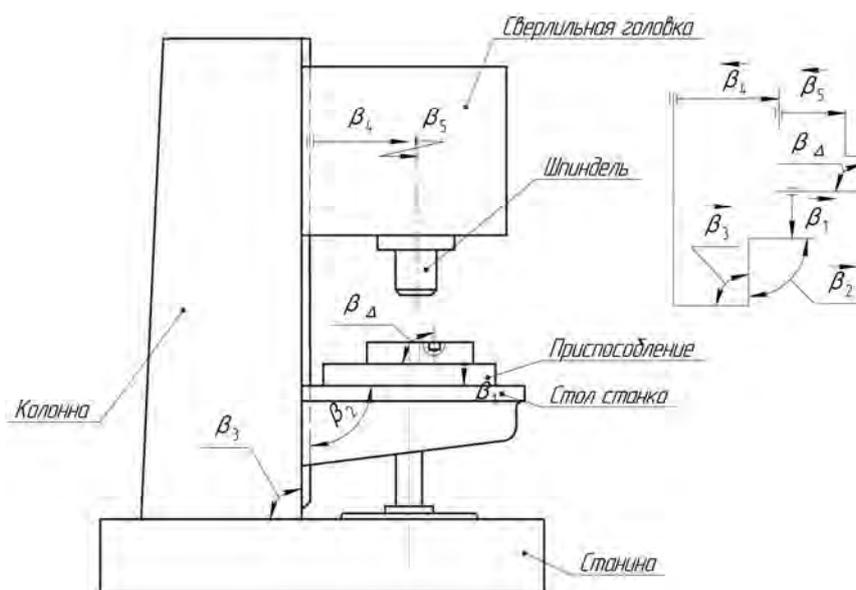


Рисунок 3.9 – Геометрическая схема технологической системы и ее размерная цепь

Составляющими звеньями данной цепи являются: β_1 – отклонение от параллельности плоскости приспособления относительно плоскости стола; β_2 – отклонение от перпендикулярности плоскости стола относительно боковой поверхности; β_3 – отклонение от перпендикулярности основания колонны относительно ее рабочей поверхности; β_4 – отклонение от параллельности оси сверлильной головки относительно рабочей поверхности колонны; β_5 – отклонение от параллельности оси вращения шпинделя относительно оси сверлильной головки.

Увеличивающими звеньями данной цепи являются β_1 , β_2 , β_3 , а звенья β_4 , β_5 – уменьшающими. Тогда

$$\beta_{\Delta} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_4 - \beta_5. \quad (3.9)$$

Наряду с погрешностью станка, существенным фактором точности расположения оси обрабатываемых отверстий служит также компоновка приспособления.

Точность расположения оси обрабатываемого отверстия зависит от точности координат направляющих втулок в кондукторных плитах, которая, в свою очередь, определяется погрешностями, вносимыми при обработке отверстий в кондукторной плите и при сборке ее с втулками. При запрессовке постоянных кондукторных втулок в плиту оси их отверстий получают смещение из-за неравномерности величины усадки втулок и натяга в сопряжении, а также из-за перекосов. Дополнительное смещение осей появляется вследствие эксцентricности наружной и внутренней поверхностей постоянных втулок [171].

Таким образом, погрешность узла направления инструмента возникает ввиду неточностей его изготовления и сборки и определяется теоретико-вероятностным расчетом размерных цепей.

Смещение оси отверстия от ее номинального положения можно найти при решении уравнения размерной цепи B приспособления (рисунок 3.10).

$$B_{\Delta} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 - B_7, \quad (3.10)$$

где B_1 – отклонение от соосности осей быстросменной и постоянной втулок;

B_2 – отклонение от соосности осей постоянной втулки и отверстия в плите;

B_3 – межцентровое расстояние между осями отверстий в плите;

B_4 – отклонение от соосности осей отверстия во втулке и отверстия в плите;

B_5 – отклонение от соосности осей отверстия во втулке и пальца;

B_6 – эксцентricность пальца;

B_7 – требуемое расположение оси обрабатываемого отверстия относительно оси пальца.

Кроме того, следует заметить, что размерные цепи A и B являются параллельно связанными [174], т. к. выполняется условие

$$A_1 = B_7; \quad TA_1 = TB_7. \quad (3.11)$$

Таким образом, решение задачи управления точности на семантической сети может основываться на комплексном подходе и обеспечивать многофакторную оптимизацию как параметров технологического процесса, так и технологического оборудования.

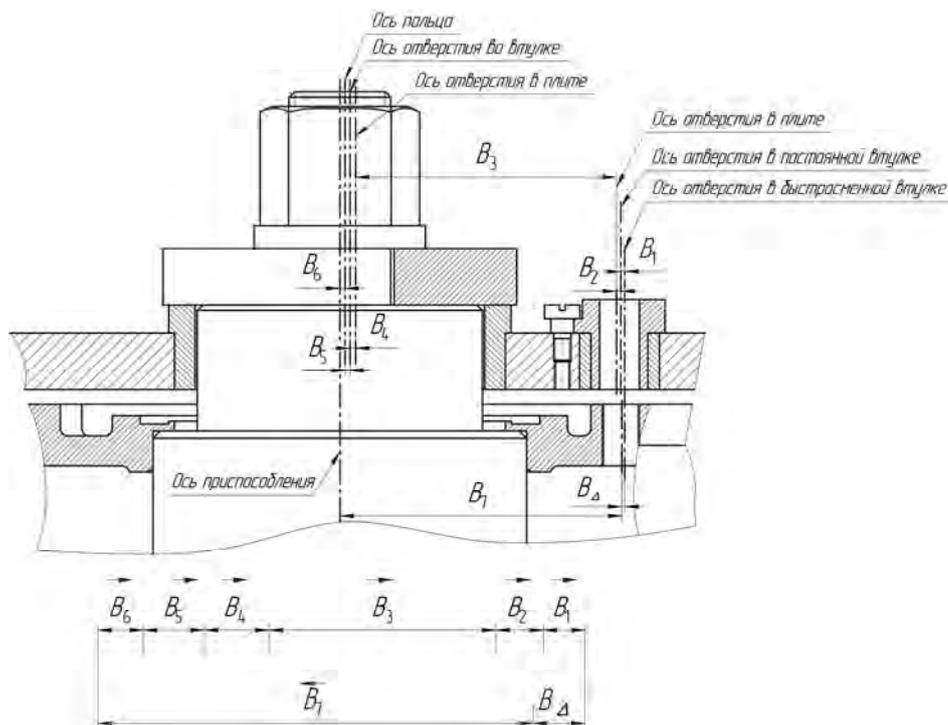


Рисунок 3.10 – Схемы взаимодействия элементов приспособления и его размерная цепь

3.2 База знаний интеллектуальной системы для расчета станочных приспособлений

В разделе 2 было показано, что задача обеспечения точности механической обработки должна в обязательном порядке включать подзадачу управления точностью используемого станочного приспособления.

Построение базы знаний для решения этой подзадачи имеет свою специфику и учитывает следующее.

При проектировании приспособлений поиск оптимального решения включает несколько последовательных этапов:

- в соответствии с технологическим процессом уточняют способ базирования заготовки в приспособлении и выбирают конструкцию установочных элементов;
- решают задачу о закреплении заготовки и выборе зажимных элементов;
- выполняют силовой расчет приспособления, на основе которого выбирают привод зажимных устройств и ведут расчет деталей приспособлений на прочность и жесткость, осуществляют окончательный выбор их размеров;

– выполняют расчет приспособления на точность, при котором выбирают расчетный параметр и определяют его величину.

В результате проведенного анализа данных этапов были определены параметры и математические отношения, на основе которых строятся семантические сети для силового расчета приспособления и сети для управления точностью изготовления приспособлений.

Далее проанализированы параметры для построения отношений функциональной семантической сети для расчета станочных приспособлений.

Результаты приведенного анализа позволяют выделить два типа параметров станочного приспособления и технологического процесса – неуправляемые, которые в семантической сети фиксируются на некотором неизменном уровне, и управляемые, образующие пространство поиска интеллектуальной системы.

3.2.1 Отношения семантической сети для оценки силы закрепления заготовки при обработке концевым инструментом.

Отношения и параметры семантической сети для обработки концевым инструментом представлены в таблице 3.11.

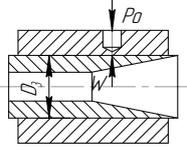
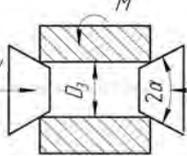
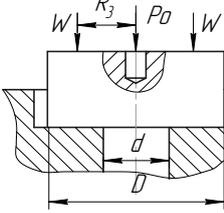
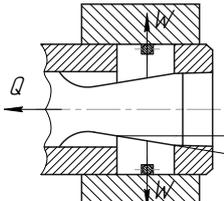
Таблица 3.11 – Классификация отношений и параметров семантической сети для оценки силы закрепления при обработке заготовки концевым инструментом

Принцип установки заготовки	Схема	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
1	2	3	4
При обработке осевого отверстия призматической заготовки [22]		$\frac{KP_o}{f_3 + f_o} - W = 0$	W, K, P_o, f_3, f_o
При обработке радиального отверстия призматической заготовки [23]		$\frac{KM}{lf} - W = 0$	W, K, M, l, f
В призме при обработке осевого отверстия [19]		$\frac{KP_o \sin \alpha}{f_o + f_3 \sin \alpha} - W = 0$	$W, K, P_o, f_3, f_o, \alpha$
В призме при обработке радиального отверстия		$\frac{KM}{Lf \sin \alpha} - W = 0$	W, K, M, L, f, α

Продолжение таблицы 3.11

1	2	3	4
В самоцентрирующих призмах [22]		$\frac{KM}{D_3 f} \sin \alpha - W = 0$	W, K, M, D_3, f, α
В цанговом зажимном механизме при обработке осевого отверстия [21]		$\frac{K}{f} \sqrt{\frac{4M^2}{D_3^2} + P_0^2} - W = 0$	W, K, M, D_3, P_0, f
В кулачковом патроне [19]		$\frac{2KM}{D_3 Z f} - W = 0$	W, K, M, D_3, Z, f
На цилиндрическом пальце с зазором, а также по торцу на трех точечных опорах при обработке радиального отверстия [19]		$\frac{KM}{f_3 R_3 + f_0 R_0} - W = 0$	$W, K, M, R_3, R_0, f_3, f_0$
На цилиндрическом пальце с зазором, а также по торцу на трех точечных опорах при обработке осевого отверстия		$\frac{K_1 M - K_2 P_0 f_0 R_0}{f_3 R_3 + f_0 R_0} - W = 0$	$W, K_1, K_2, M, P_0, R_3, R_0, f_3, f_0$
На жесткой цилиндрической оправке с зазором при обработке радиального отверстия		$\frac{KM}{f_3 R_3 + f_0 R_0} - W = 0$ $\frac{1}{3} \frac{D_b^3 - D_3^3}{D_b^2 - D_3^2} - R_0 = 0$ $\frac{1}{3} \frac{D_p^3 - D_3^3}{D_p^2 - D_3^2} - R_3 = 0$	$W, K, M, R_3, R_0, f_3, f_0, D_b, D_3, D_p$
На жесткой оправке с зазором при обработке осевого отверстия [22]		$\frac{K_1 M - K_2 P_0 f_0 R_0}{f_3 R_3 + f_0 R_0} - W = 0$ $\frac{1}{3} \frac{D_b^3 - D_3^3}{D_b^2 - D_3^2} - R_0 = 0$ $\frac{1}{3} \frac{D_p^3 - D_3^3}{D_p^2 - D_3^2} - R_3 = 0$	$W, K_1, K_2, M, P_0, R_3, R_0, f_3, f_0, D_b, D_3, D_p$

Окончание таблицы 3.11

1	2	3	4
На цанговой оправке [19]		$\frac{2KM}{D_3 Z f} - W = 0$	W, K, M, D_3, Z, f
На оправке с креплением двумя конусами [22]		$\frac{2KM}{D_3 f} \sin \alpha - W = 0$	W, K, M, D_3, α, f
Во втулке [22]		$\frac{K_1 M - K_2 P_0 f_0 R_0}{f_3 R_3 + f_0 R_0} - W = 0$ $\frac{1}{3} \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} - R_0 = 0$	$W, K_1, K_2, M, P_0, R_3, R_0, f_3, f_0, D, d$
На разжимной оправке с выдвигаемыми радиальными кулачками [19]		$\frac{2KM}{D_3 Z f} - W = 0$	W, K, M, D_3, Z, f

Таким образом, у семантической сети для расчета силы закрепления при обработке заготовки концевым инструментом выделены следующие параметры:

W – сила закрепления, Н;

K, K_1, K_2 – коэффициенты запаса;

P_0 – сила резания, Н;

M – момент сил резания, Н·м;

f – коэффициент трения;

l – расстояние между осью обрабатываемого отверстия и точкой приложения силы закрепления, м;

α – половина угла призмы или конуса втулки;

L – длина заготовки, м;

D_3 – диаметр закрепляемой поверхности, м;

Z – количество кулачков или лепестков цанговой оправки;

R_3 – расстояние от оси вращения заготовки до точки приложения силы закрепления, м;

R_0 – расстояние от оси вращения заготовки до центра опоры, м;

f_3 – коэффициент трения в стыке заготовки с зажимом;

f_o – коэффициент трения в стыке заготовки с опорами;

D_b – диаметр бурта оправки, м;

D_p – диаметр прижимной шайбы, м;

D – наружный диаметр заготовки, м;

d – диаметр отверстия приспособления, м;

φ – угол трения на поверхности контакта оправки с разрезной втулкой.

Из них в качестве управляемых выберем силу закрепления W ; силу резания P_o ; момент сил резания M ; расстояние между осью обрабатываемого отверстия и точкой приложения силы закрепления l ; половину угла призмы или конуса втулки α ; количество кулачков или лепестков цанговой оправки Z ; расстояние от оси вращения заготовки до точки приложения силы закрепления R_3 ; расстояние от оси вращения заготовки до центра опоры R_o ; диаметр бурта оправки D_b ; диаметр прижимной шайбы D_p ; диаметр отверстия приспособления d .

3.2.2 Расчет зажимных механизмов станочных приспособлений.

Силовые механизмы обычно выполняют роль усилителя. Наряду с изменением величины исходного усилия, силовой механизм может также изменять его направление, разлагать на составляющие и совместно с контактными элементами обеспечивать приложение зажимного усилия в заданной точке. Иногда силовые механизмы выполняют роль самотормозящего элемента, препятствуя раскреплению заготовки при внезапном выходе из строя привода.

Силовые механизмы делятся на элементарные, комбинированные зажимные и установочно-зажимные.

Элементарные зажимные механизмы состоят из одного элементарного механизма – винтового, эксцентрикового, рычажного, клинового или клиноплунжерного.

Комбинированные представляют собой комбинацию нескольких (обычно двух) элементарных зажимных механизмов.

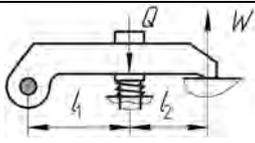
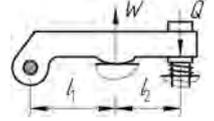
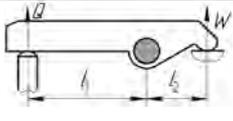
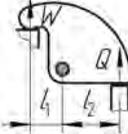
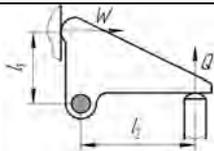
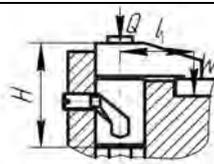
Установочно-зажимные (самоцентрирующие зажимы) выполняют одновременно функции установочных и зажимных элементов. Их применяют для установки с высокой точностью заготовок по наружным и внутренним цилиндрическим поверхностям.

3.2.2.1 *Отношения семантической сети для расчета рычажных механизмов.* Рычажные механизмы используются обычно в сочетании с

другими элементарными зажимами, образуя сложные зажимные системы. С помощью выбора длины и формы рычагов изменяют величину и направление передаваемой силы [20; 24; 29].

Отношения и параметры семантической сети для расчета станочных приспособлений, имеющих в своем составе рычажные механизмы, представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Отношения и параметры семантической сети для расчета рычажных механизмов

Схема рычага	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
	$W \frac{l_1 + l_2}{l_1 \eta} - Q = 0$	W, Q, l_1, l_2, η
	$W \frac{l_1}{(l_1 + l_2) \eta} - Q = 0$	W, Q, l_1, l_2, η
	$W \frac{l_2}{l_1 \eta} - Q = 0$	W, Q, l_1, l_2, η
	$W \frac{l_1}{l_2 \eta} - Q = 0$	W, Q, l_1, l_2, η
	$W \frac{l_1}{l_2 \eta} - Q = 0$	W, Q, l_1, l_2, η
	$(Q - q_{np}) \left(1 - \frac{3l_1 f}{H} \right) \eta - W = 0$	$W, Q, q_{np}, l_1, H, f, \eta$

Таким образом, у семантической сети для расчета рычажных механизмов были выделены следующие параметры:

W – сила закрепления заготовки, Н;

Q – сила зажима заготовки, Н;

l_1 – расстояние между точками приложения сил зажима и закрепления заготовки, мм;

l_2 – расстояние от опоры рычажного механизма до точки приложения силы закрепления, мм;

q_{np} – сила сопротивления пружины, Н;

H – высота прихвата, мм;

f – коэффициент трения на направляющей поверхности прихвата;

η – КПД зажимного механизма.

Из них в качестве управляемых выберем силу закрепления W ; силу зажима заготовки Q ; расстояние между точками приложения сил зажима и закрепления заготовки l_1 ; расстояние от опоры рычажного механизма до точки приложения силы закрепления l_2 ; силу сопротивления пружины q_{np} ; высоту прихвата H .

3.2.2.2 Отношения семантической сети для расчета клиновых механизмов. Клиновые механизмы используются в качестве промежуточного звена в сложных зажимных системах. Они просты в изготовлении, компактны, позволяют увеличивать и изменять направление передаваемой силы зажима. Главным конструктивным элементом клинового зажимного механизма является угол скоса клина α . С уменьшением угла α увеличивается выигрыш в силе, но одновременно увеличивается проигрыш в перемещениях [27].

Отношения и параметры семантической сети при использовании клиновых механизмов в зажимных системах представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Отношения и параметры семантической сети для расчета клиновых механизмов

Вид клинового механизма	Схема	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
1	2	3	4
С трением скольжения на обеих поверхностях клина		$\frac{W(\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + \operatorname{tg}\varphi_2)}{\eta} - Q = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, d, D, \eta$
С роликом на наклонной поверхности и с трением скольжения на горизонтальной поверхности клина		$\frac{W(\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg}\varphi_2)}{\eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg}\left(\frac{d}{D}\right)\operatorname{tg}\varphi_1 - \varphi_{np} = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_{np}, d, D, \eta$

Окончание таблицы 3.13

1	2	3	4
С двумя роликами		$\frac{W(\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) + \operatorname{tg} \varphi_{2np})}{\eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_1 - \varphi_{np} = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_2 - \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\varphi_1, \varphi_2,$ $\varphi_{np}, \varphi_{2np},$ d, D, η
С роликом на горизонтальной поверхности и с трением скольжения на наклонной поверхности клина		$\frac{W(\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_{2np})}{\eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_2 - \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\varphi_1, \varphi_2,$ $\varphi_{2np}, d, D,$ η

Таким образом, у семантической сети для расчета клиновых механизмов были выделены следующие параметры:

Q – сила зажима заготовки, Н;

W – сила закрепления заготовки, Н;

α – угол скоса клина;

φ_1 – угол трения на наклонной поверхности клина;

φ_2 – угол трения на горизонтальной поверхности клина;

φ_{np} – приведенный угол трения на наклонной поверхности клина;

φ_{2np} – приведенный угол трения на горизонтальной поверхности клина;

η – КПД зажимного механизма;

d – внутренний диаметр ролика, мм;

D – наружный диаметр ролика, мм.

Из них в качестве управляемых выберем силу закрепления W ; силу зажима заготовки Q ; угол скоса клина α ; внутренний диаметр ролика d ; наружный диаметр ролика D .

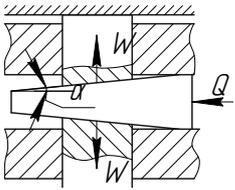
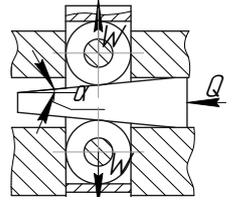
3.2.2.3 Отношения семантической сети для расчета клиноплунжерных механизмов. Клиноплунжерные механизмы используются в качестве усилителей приводов зажимных механизмов или в качестве центрирующих механизмов патронов и оправок [30].

Отношения и параметры семантической сети при применении клиноплунжерных зажимных механизмов в станочных приспособлениях представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Отношения и параметры семантической сети для расчета клиноплунжерных зажимных механизмов

Вид механизма	Схема	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
1	2	3	4
С двухопорным плунжером без роликов		$W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_3}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2 \eta} - Q = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \eta$
С одноопорным плунжером без роликов		$W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_3}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_{2np} \eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{3l}{a} \right) \operatorname{tg} \varphi_2 - \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_{2np}, l, a, \eta$
С двухопорным плунжером с роликом		$W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) + \operatorname{tg} \varphi_3}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) \operatorname{tg} \varphi_2 \eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_1 - \varphi_{1np} = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_{1np}, d, D, \eta$
С одноопорным плунжером с роликом		$W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) + \operatorname{tg} \varphi_3}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) \operatorname{tg} \varphi_{2np} \eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_1 - \varphi_{1np} = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{3l}{a} \right) \operatorname{tg} \varphi_2 - \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_{1np}, \varphi_{2np}, l, a, d, D, \eta$
С двухопорным плунжером и двумя роликами		$W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) + \operatorname{tg} \varphi_{3np}}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) \operatorname{tg} \varphi_2 \eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_1 - \varphi_{1np} = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_3 - \varphi_{3np} = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_{1np}, \varphi_{3np}, d, D, \eta$
С одноопорным плунжером и двумя роликами		$W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) + \operatorname{tg} \varphi_{3np}}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) \operatorname{tg} \varphi_{2np} \eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_1 - \varphi_{1np} = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{3l}{a} \right) \operatorname{tg} \varphi_2 - \varphi_{2np} = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_3 - \varphi_{3np} = 0$	$Q, W, \alpha, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_{1np}, \varphi_{2np}, \varphi_{3np}, l, a, d, D, \eta$

Окончание таблицы 3.14

1	2	3	4
Двухплунжерный самоцентрирующий механизм без роликов		$2W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_{2np} \eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{3l}{a} \right) \operatorname{tg} \varphi_2 - \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\varphi_1, \varphi_2,$ $\varphi_{2np}, l, a,$ η
Двухплунжерный механизм с роликами на наклонных поверхностях клина		$2W \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np})}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{1np}) \operatorname{tg} \varphi_{2np} \eta} - Q = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{d}{D} \right) \operatorname{tg} \varphi_1 - \varphi_{1np} = 0$ $\operatorname{arctg} \left(\frac{3l}{a} \right) \operatorname{tg} \varphi_2 - \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\varphi_1, \varphi_2,$ $\varphi_{1np}, \varphi_{2np},$ l, a, d, D, η

Таким образом, у семантической сети для расчета клиноплунжерных механизмов были выделены следующие параметры:

Q – сила зажима заготовки, Н;

W – сила закрепления заготовки, Н;

α – угол скоса клина;

φ_1 – угол трения на наклонной поверхности клина;

φ_2 – угол трения двухопорного плунжера;

φ_3 – угол трения на горизонтальной поверхности клина;

φ_{1np} – приведенный угол трения на наклонной поверхности клина;

φ_{2np} – приведенный угол трения консольного плунжера;

φ_{3np} – приведенный угол трения на горизонтальной поверхности

клина;

η – КПД зажимного механизма;

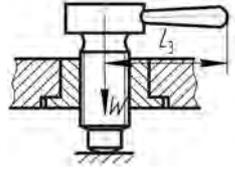
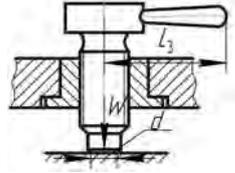
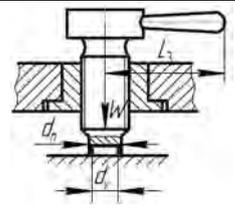
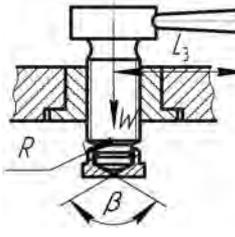
d – внутренний диаметр ролика, мм;

D – наружный диаметр ролика, мм.

Из них в качестве управляемых выберем силу закрепления W ; силу зажима заготовки Q ; угол скоса клина α ; внутренний диаметр ролика d ; наружный диаметр ролика D .

3.2.2.4 Отношения семантической сети для расчета винтовых механизмов. Винтовые механизмы обеспечивают значительную величину силы закрепления при сравнительно небольшом моменте на приводе [15]. При использовании винтового зажимного механизма отношения и параметры семантической сети для расчета станочных приспособлений представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Отношения и параметры семантической сети для расчета винтовых зажимных механизмов

Вид механизма	Схема	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
Со сферическим торцом		$W \frac{d_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{2l_3 \eta} - Q = 0$	$Q, W, \alpha, d_{cp}, l_3, \varphi, \eta$
С плоским торцом		$W \frac{d_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + 1/3 f d}{2l_3 \eta} - Q = 0$	$Q, W, \alpha, d_{cp}, l_3, d, f, \varphi, \eta$
С кольцевой поверхностью плоского торца		$W \frac{d_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + 1/3 f b}{2l_3 \eta} - Q = 0;$ $\frac{d_n^3 - d_v^3}{d_n^2 - d_v^2} - b = 0$	$Q, W, \alpha, d_{cp}, l_3, d, f, \varphi, \eta, b, d_n, d_v$
Со сферическим опорным торцом и наконечником		$W \frac{d_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + R f \operatorname{ctg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2l_3 \eta} - Q = 0$	$Q, W, \alpha, d_{cp}, l_3, d, f, \varphi, \eta, \beta, R$

Таким образом, у семантической сети для расчета винтовых механизмов были выделены следующие параметры:

Q – сила зажима заготовки, Н;

W – сила закрепления заготовки, Н;

d_{cp} – номинальный диаметр резьбы, мм;

α – угол подъема резьбы;

φ – угол трения в резьбе;

l_3 – плечо приложения силы Q , мм;

η – КПД зажимного механизма;

f – коэффициент трения между заготовкой и винтом;

d – диаметр цилиндрического конца винта, мм;

d_n – наружный диаметр опорного торца винта, мм;

d_v – внутренний диаметр опорного торца винта, мм;

R – радиус сферы конца винта, мм;

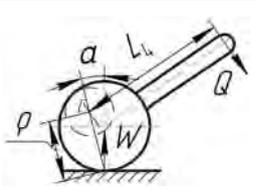
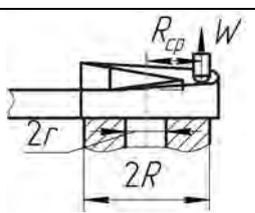
β – угол конусного углубления наконечника.

Из них в качестве управляемых выберем силу закрепления W ; силу зажима заготовки Q ; номинальный диаметр резьбы d_{cp} ; угол подъема резьбы α ; плечо приложения силы зажима заготовки l_3 ; диаметр цилиндрического конца винта d ; наружный диаметр опорного торца винта d_n ; внутренний диаметр опорного торца винта d_v ; радиус сферы конца винта R ; угол конусного углубления наконечника β .

3.2.2.5 *Отношения семантической сети для расчета эксцентриковых механизмов.* Эксцентриковые механизмы являются самотормозящими и развивают силу зажима в 10...15 раз больше, чем сила на приводе приспособления. Различают три типа эксцентриковых кулачков: круглые с цилиндрической рабочей поверхностью, реальная ось вращения которой имеет эксцентриситет с осью симметрии; криволинейные, рабочие поверхности которых очерчены по спирали Архимеда (реже – по эвольвенте или по логарифмической спирали); торцовые [26].

Отношения и параметры семантической сети для расчета приспособлений, в состав которых входят эксцентриковые зажимные механизмы, представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Отношения и параметры семантической сети для расчета эксцентриковых механизмов

Вид механизма	Схема	Отношения семантической сети	Параметры сети
Круглый эксцентриковый механизм		$W \frac{\rho}{l_4 \eta} (\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_2) - Q = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\varphi_1, \varphi_2,$ ρ, l_4, η
Торцевой эксцентриковый механизм		$\frac{W}{l_4 \eta} (R_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + \frac{2}{3} f \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}) - Q = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\varphi_1, R_{cp}, l_4,$ η, f, R, r

Таким образом, у семантической сети для расчета эксцентриковых механизмов были выделены следующие параметры:

Q – сила зажима заготовки, Н;

W – сила закрепления заготовки, Н;

ρ – расстояние от оси вращения эксцентрика до точки его соприкосновения с поверхностью, мм;

l_4 – плечо приложения силы Q , мм;

α – угол подъема кривой эксцентрика;

φ_1 – угол трения на поверхности воздействия эксцентрика на заготовку, $\varphi_1 = 5^\circ$;

φ_2 – угол трения на оси вращения эксцентрика;

η – КПД зажимного механизма;

R_{cp} – средний радиус, проведенный из центра вращения эксцентрика в точку его контакта с прихватами, рычагами, плунжерами, мм;

f – коэффициент трения;

R – наружный радиус эксцентрика, мм;

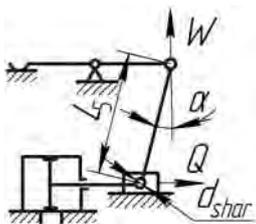
r – внутренний радиус эксцентрика, мм.

Из них в качестве управляемых выберем силу закрепления W ; силу зажима заготовки Q ; расстояние от оси вращения эксцентрика до точки его соприкосновения с поверхностью ρ ; плечо приложения силы зажима заготовки l_4 ; угол подъема кривой эксцентрика α ; средний радиус, проведенный из центра вращения эксцентрика в точку его контакта с прихватами, рычагами, плунжерами R_{cp} ; наружный R и внутренний r радиусы эксцентрика.

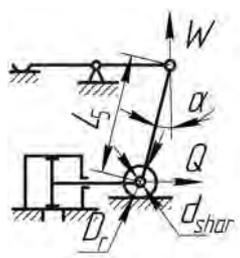
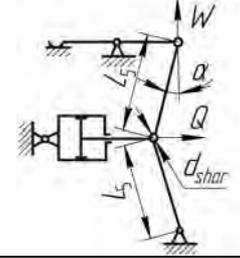
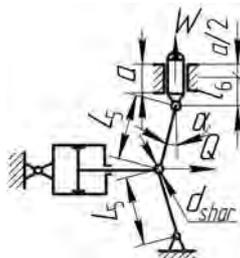
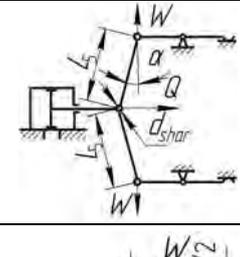
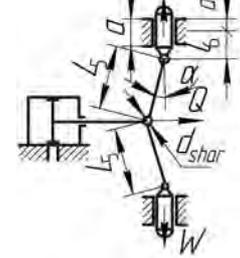
3.2.2.6 *Отношения семантической сети для расчета рычажно-шарнирных механизмов.* Рычажно-шарнирные механизмы используют как быстродействующие немеханизированные зажимные механизмы или как усилители в механизированных приводах [28].

Отношения и параметры семантической сети для расчета приспособлений, в состав которых входят рычажно-шарнирные механизмы, представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Отношения и параметры семантической сети для расчета рычажно-шарнирных механизмов

Вид механизма	Схема	Отношения семантической сети	Параметры сети
1	2	3	4
Однорычажный с ползуном		$W(\operatorname{tg}(\alpha + \beta) + \operatorname{tg}\varphi_1) / \eta - Q = 0$ $\frac{d_{shar}}{L_5} \arcsin f - \beta = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\beta, \varphi_1, \eta,$ d_{shar}, L_5, f

Окончание таблицы 3.17

1	2	3	4
Однорычажный с роликом		$W(\operatorname{tg}(\alpha + \beta) + \operatorname{tg} \varphi_{1np}) / \eta - Q = 0$ $\frac{d_{shar}}{L_5} \arcsin f - \beta = 0$ $\frac{d_{shar}}{D_r} \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_{1np} = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\beta, \varphi_{1np},$ $\eta, d_{shar},$ $L_5, f, D_r,$ φ_1
Двухрычажный одностороннего действия		$2W \operatorname{tg}(\alpha + \beta) / \eta - Q = 0$ $\frac{d_{shar}}{L_5} \arcsin f - \beta = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\beta, \eta,$ d_{shar}, L_5, f
Двухрычажный одностороннего действия с плунжером		$0,5W \left(\frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} - \operatorname{tg} \varphi_{2np} \right) / \eta - Q = 0$ $\frac{d_{shar}}{L_5} \arcsin f - \beta = 0$ $\frac{3l_6}{a} \operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\beta, \varphi_{2np},$ $\eta, d_{shar},$ $L_5, f, l_6,$ a, φ_2
Двухрычажный двустороннего действия		$2W \operatorname{tg}(\alpha + \beta) / \eta - Q = 0$ $\frac{d_{shar}}{L_5} \arcsin f - \beta = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\beta, \eta,$ d_{shar}, L_5, f
Двухрычажный двустороннего действия с плунжерами		$2W \left(\frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} - \operatorname{tg} \varphi_{2np} \right) / \eta - Q = 0$ $\frac{d_{shar}}{L_5} \arcsin f - \beta = 0$ $\frac{3l_6}{a} \operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_{2np} = 0$	$Q, W, \alpha,$ $\beta, \varphi_{2np},$ $\eta, d_{shar},$ $L_5, f, l_6,$ a, φ_2

Таким образом, у семантической сети для расчета рычажно-шарнирных механизмов были выделены следующие параметры:

Q – сила зажима заготовки, Н;

W – сила закрепления заготовки, Н;

α – угол наклона рычага;

β – дополнительный угол, учитывающий потери на трение в шарнирах;

φ_1 – угол трения на поверхности шарнира;

φ_2 – угол трения в плунжерной паре;

φ_{1np} – приведенный угол трения на поверхности шарнира;

φ_{2np} – приведенный угол трения в плунжерной паре;

η – КПД зажимного механизма;

d_{shar} – диаметр шарнира, мм;

L_5 – длина рычага, мм;

f – коэффициент трения в шарнирах;

D_r – наружный диаметр ролика, мм;

l_6 – расстояние от оси шарнира до середины направляющей плунжера, мм;

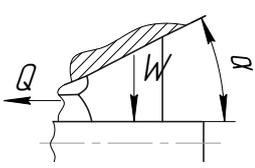
a – длина направляющей плунжера, мм.

Из них в качестве управляемых выберем силу закрепления W ; силу зажима заготовки Q ; угол наклона рычага α ; диаметр шарнира d_{shar} ; длину рычага L_5 ; наружный диаметр ролика D_r ; расстояние от оси шарнира до середины направляющей плунжера l_6 ; длину направляющей плунжера a .

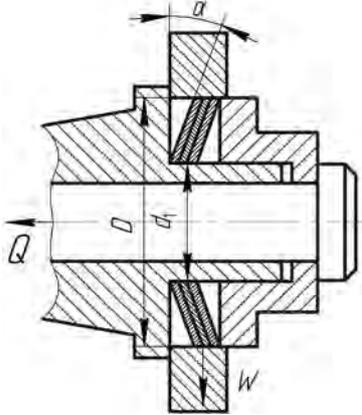
3.2.2.7 *Отношения семантической сети для расчета установочно-зажимных механизмов.* Установочно-зажимные механизмы в своем составе не имеют силового механизма, а используемые в них приводы не вызывают перемещений элементов зажимного устройства, а лишь создают зажимное усилие W .

Отношения и параметры семантической сети для расчета установочно-зажимных механизмов представлены в таблице 3.18.

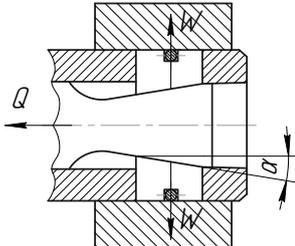
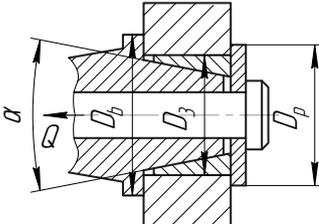
Таблица 3.18 – Отношения и параметры семантической сети для расчета установочно-зажимных механизмов

Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
1	2
<p>Цанговые зажимные устройства [21; 26]</p>  <p>$W' + W'' - W = 0$</p>	<p>W' – сила закрепления заготовки, Н; W'' – сила, необходимая для сжатия лепестков цанги до выборки зазора между поверхностью заготовки и цанги [26], Н; E – модуль упругости материала цанги, МПа; I – момент инерции сечения лепестка цанги в месте его заделки [26], мм⁴; y – прогиб лепестка, мм; n – число лепестков цанги;</p>

Продолжение таблицы 3.18

1	2
$\frac{3EIyn}{l^3} - W'' = 0$ $\frac{D^3 S}{8} (\alpha_1 + \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 - 2 \sin^2 \alpha_1 / \alpha_1) - I = 0$ $W \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) / \eta - Q = 0$	<p>l – длина лепестка цанги от места заделки до середины конуса, мм; D – наружный диаметр лепестка цанги в месте заделки, мм; S – толщина стенки лепестка, мм; α_1 – половина угла сектора лепестка; W – радиальная сила зажима, Н; α – угол конуса цанги; φ – угол трения между цангой и втулкой; φ_1 – угол трения между цангой и заготовкой; φ_2 – угол трения между цангой и упорной гайкой; β – угол конуса упорной гайки, $\beta = 10 \dots 12^\circ$; k – коэффициент, зависящий от жесткости упора, $k = 0,3 \dots 1,0$; Q – сила зажима заготовки [21], Н; η – КПД зажимного механизма</p>
<p>Оправка с тарельчатыми пружинами [19]</p>  $Q_1 + Q_2 - Q = 0$ $\frac{4E\delta\lambda}{(1-\mu^2)D^2 A} \times \left((h-\lambda)(h-\lambda/2) + \delta^2 \right) - Q_1 = 0$ $l(\sin \beta - \sin \beta_1) - \lambda = 0$ $\frac{D_1 - d_1}{2l} - \cos \beta_1 = 0$ $W \operatorname{tg} \beta_1 - Q_2 = 0$	<p>Q_1 – сила, необходимая для выборки зазора между тарельчатыми пружинами и заготовкой, Н; Q_2 – сила, обеспечивающая закрепление заготовки для передачи необходимого момента, Н; Q – сила зажима заготовки, Н; E – модуль упругости материала пружины, МПа; μ – коэффициент Пуассона материала пружины; δ – толщина пружины, мм; λ – осадка пружины, мм; h – высота пружины, мм; D – наружный диаметр пружины, мм; A – коэффициент, зависящий от отношения $\frac{D}{d} = m$; d – внутренний диаметр пружины, мм; l – длина образующей конуса пружины, мм; β – угол наклона образующей в свободном состоянии; β_1 – угол наклона образующей после деформации пружины; D_1 – диаметр базы заготовки, мм; d_1 – диаметр оправки, на которую насажены пружины, мм; l – длина образующей конуса пружины, мм; W – сила закрепления заготовки, Н</p>

Окончание таблицы 3.18

1	2
<p>Разжимная оправка с выдвижными радиальными кулачками [19]</p>  $(W + W_1) \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_3}{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2} - Q = 0$	<p>W – сила закрепления заготовки, Н; W_1 – сила, с которой пружина стягивает сухари, Н; α – угол скоса клина штока; φ_1 – угол трения на наклонной поверхности клина; φ_3 – угол трения на горизонтальной поверхности клина; φ_2 – угол трения на поверхности кулачка; Q – сила зажима заготовки, Н</p>
<p>Оправка с разрезной втулкой [23]</p>  $\frac{2KM}{f D_3} [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + f] - Q = 0$	<p>Q – сила зажима заготовки, Н; W – сила закрепления, Н; K – коэффициент запаса; M – момент сил резания, Н·м; f – коэффициент трения в стыке заготовки с опорами; α – угол конуса втулки; D_3 – диаметр закрепляемой поверхности, м; φ – угол трения на поверхности контакта оправки с разрезной втулкой</p>

Из них в качестве управляемых параметров при расчете цанговых зажимных устройств выберем число лепестков цанги n ; силу закрепления W' ; силу зажима заготовки Q ; длину лепестка цанги от места заделки до середины конуса l ; наружный диаметр лепестка цанги в месте заделки D ; толщину стенки лепестка S ; половину угла сектора лепестка α_1 ; угол конуса цанги α .

Для оправки с тарельчатыми пружинами выберем толщину пружины δ ; высоту пружины h ; наружный диаметр пружины D ; внутренний диаметр пружины d ; длину образующей конуса пружины l ; угол наклона образующей в свободном состоянии β ; угол наклона образующей после деформации пружины β_1 ; диаметр базы заготовки D_1 ; диаметр оправки, на которую насажены пружины d_1 ; длину образующей конуса пружины l ; силу зажима заготовки Q ; силу закрепления заготовки W .

Для разжимной оправки с выдвижными радиальными кулачками выберем силу закрепления заготовки W ; силу, с которой пружина стяги-

вает сухари, W_1 ; силу зажима заготовки Q ; угол скоса клина штока α .

Для оправки с разрезной втулкой выберем силу закрепления W ; момент сил резания M ; угол конуса втулки α ; силу зажима заготовки Q ; диаметр закрепляемой поверхности D_3 .

3.2.2.8 Отношения семантической сети для расчета комбинированных зажимных механизмов. Комбинированные зажимные механизмы включают в свою конструкцию несколько простых механизмов.

Для комбинированных зажимных механизмов отношение семантической сети для определения передаточного отношения сил имеет вид [19]:

$$i_1 i_2 i_3 \dots i_k - i = 0, \quad (3.12)$$

где k – номер простого зажимного механизма;

$i_1 \dots i_k$ – передаточные отношения соответствующих простых механизмов;

i – передаточное отношение комбинированного зажимного механизма.

Для определения передаточного отношения простого зажимного механизма отношение семантической сети имеет вид:

$$\frac{W}{Q} - i = 0, \quad (3.13)$$

где W – сила закрепления заготовки, Н;

Q – сила зажима, Н;

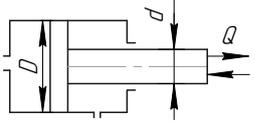
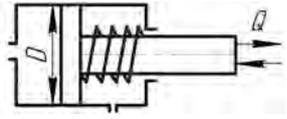
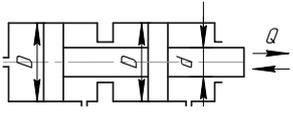
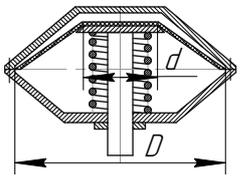
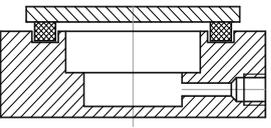
i – передаточное отношение простого механизма.

3.2.3 Отношения семантической сети для расчета привода станочного приспособления.

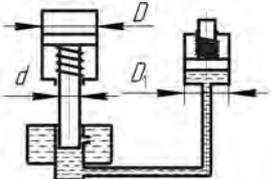
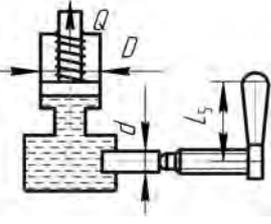
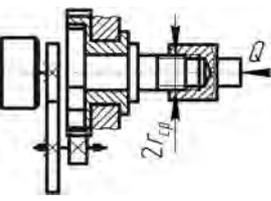
Привод станочного приспособления обеспечивает воздействие зажимных элементов приспособления на закрепляемую заготовку с заданной силой в определенном направлении.

Отношения и параметры семантической сети для расчета приводов механизированных приспособлений представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Отношения и параметры семантической сети для расчета приводов механизированных приспособлений

Вид привода	Отношения семантической сети	Параметры семантической сети
1	2	3
<p>Пневматический или гидравлический привод двустороннего действия [15]</p> 	<p>Толкающая сила на штоке</p> $\frac{\pi D^2}{4} p \eta - Q = 0.$ <p>Тянущая сила на штоке</p> $\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} p \eta - Q = 0$	<p>Q – сила зажима заготовки, Н; D – диаметр цилиндра, мм; d – диаметр штока привода, мм; p – давление в цилиндре, МПа; η – КПД привода</p>
<p>Пневматический или гидравлический привод одностороннего действия [19]</p> 	$\frac{\pi}{4} D^2 p \eta - P_{np} - Q = 0$	<p>Q – сила зажима заготовки, Н; D – диаметр цилиндра, мм; p – давление в цилиндре, МПа; η – КПД привода; P_{np} – сила сопротивления возвратной пружины при крайнем рабочем положении поршня, Н</p>
<p>Сдвоенный пневмо- или гидропривод [15]</p> 	<p>Толкающая сила на штоке</p> $\frac{\pi(2D^2 - d^2)}{4} p \eta - Q = 0.$ <p>Тянущая сила на штоке</p> $\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} p \eta - Q = 0$	<p>Q – сила зажима заготовки, Н; D – диаметр цилиндра, мм; d – диаметр штока привода, мм; p – давление в цилиндре, МПа; η – КПД привода</p>
<p>Пневматический диафрагменный привод [19]</p> 	$\left(0,696 - 0,06 \frac{D}{d}\right) p D^2 - Q = 0$	<p>Q – сила зажима заготовки, Н; D – диаметр диафрагмы, мм; d – диаметр опорной шайбы, мм; p – давление в цилиндре, МПа</p>
<p>Вакуумный привод [28]</p> 	$(p_a - p_o) F k - W = 0$	<p>p_a – атмосферное давление, МПа; p_o – остаточное давление в камере после разрежения, МПа; F – активная площадь вакуумной камеры, мм²; W – сила закрепления заготовки, Н; k – коэффициент герметичности вакуумной системы</p>

Окончание таблицы 3.19

1	2	3
Пневмогидравлический привод [26] 	$p \frac{\pi D_1^2}{4} \left(\frac{D}{d} \right)^2 \eta - Q = 0$	Q – сила зажима заготовки, Н; D_1 – диаметр пневмоцилиндра, мм; D – диаметр гидроцилиндра, мм; d – диаметр штока пневматического привода, мм; p – давление в цилиндре, МПа; η – КПД привода
Механогидравлический привод [23] 	$\frac{2WL_5}{d_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \frac{D^2}{d^2} \eta - P - Q = 0$	W – сила закрепления заготовки, Н; Q – сила зажима заготовки, Н; L_5 – плечо приложения силы W , мм; d_{cp} – номинальный диаметр резьбы, мм; α – угол подъема резьбы; φ – угол трения в резьбе; D – диаметр поршня гидроцилиндра, мм; d – диаметр плунжера, мм; P – сила сопротивления пружины, Н; η – КПД привода
Электромеханический привод [23] 	$71620 \frac{2N\eta i}{nd_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} - Q = 0$	Q – сила зажима заготовки, Н; N – мощность двигателя, кВт; i – передаточное отношение редуктора; d_{cp} – номинальный диаметр резьбы, мм; α – угол подъема резьбы; φ – угол трения в резьбе; n – число оборотов двигателя в минуту; η – КПД привода

В качестве управляемых параметров для пневмо- или гидропривода выберем силу зажима заготовки Q ; диаметр цилиндра D ; диаметр штока привода d ; давление в цилиндре p .

Для пневматического диафрагменного привода выберем силу зажима заготовки Q ; диаметр диафрагмы D ; диаметр опорной шайбы d ; давление в цилиндре p .

Для вакуумного привода выберем активную площадь вакуумной камеры F ; силу закрепления заготовки W .

Для механогидравлического привода выберем силу закрепления W ; силу зажима заготовки Q ; плечо приложения силы закрепления L_5 ; номинальный диаметр резьбы d_{cp} ; угол подъема резьбы α ; диаметр поршня гидроцилиндра D ; диаметр плунжера d .

Для электромеханического привода выберем силу зажима заготовки Q ; мощность двигателя N ; передаточное отношение редуктора i ; номинальный диаметр резьбы d_{cp} ; угол подъема резьбы α ; число оборотов двигателя в минуту n .

3.2.4 Классификация этапов расчета на точность станочных приспособлений для обработки концевым инструментом.

Известно, что точность обработки заготовок в приспособлении зависит от точности изготовления приспособления, жесткости и точности его установки на станке, а также износа установочных элементов.

Точность изготовления приспособления характеризуется величиной выбранного расчетного параметра, которая составляет некоторую часть допуска выполняемого размера при обработке заготовки в данном приспособлении. При этом суммарная погрешность обработки Δ не должна превышать допуск выдерживаемого размера T [16–18].

Тогда допуск на изготовление приспособления T_{np} , при котором обеспечивается необходимая точность выполнения линейных размеров, будет определяться зависимостью

$$T_{np} = T - K_T \sqrt{(K_{T1}\varepsilon_{\bar{\sigma}})^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_u^2 + \varepsilon_n^2 + (K_{T2}\omega)^2}, \quad (3.14)$$

где T – допуск выполняемого на данной операции размера, мм;

K_T – коэффициент, учитывающий отклонение рассеяния случайных погрешностей от закона нормального распределения, $K_T = 1 \dots 1,2$;

K_{T1} – коэффициент, учитывающий возможность уменьшения погрешности базирования при работе на настроенных станках, $K_{T1} = 0,8 \dots 0,85$;

$\varepsilon_{\bar{\sigma}}$ – погрешность базирования заготовки, мм (см. п. 3.1.1);

ε_3 – погрешность закрепления заготовки, мм (см. п. 3.1.2);

ε_y – погрешность установки приспособления на станке, мм (см. п. 3.1.3);

ε_u – погрешность, связанная с износом элементов приспособления, мм (см. п. 3.1.4);

ε_n – погрешность от перекоса и смещения инструмента, мм (см. п. 3.1.5);

K_{T2} – коэффициент, учитывающий долю погрешности обработки, вызванную факторами, не зависящими от приспособления, $K_{T2} = 0,6 \dots 0,8$;

ω – экономическая точность обработки [26].

Таким образом, при расчете станочных приспособлений на точность управляемыми параметрами являются погрешность базирования заготовки ε_b ; погрешность закрепления заготовки ε_3 ; погрешность установки приспособления на станке ε_y ; погрешность, связанная с износом элементов приспособления, ε_u ; погрешность от перекоса и смещения инструмента ε_n ; экономическая точность обработки ω , а также допуск на изготовление приспособления T_{np} и допуск выполняемого на данной операции размера T .

4 Интеллектуальная система для обеспечения точности механической обработки на базе семантических сетей

4.1 Интеллектуальная система для обеспечения точности механической обработки на основе использования семантических сетей

Для реализации подхода, базирующегося на технологиях функциональных семантических сетей, была создана интеллектуальная система SEMANTIC, осуществляющая управление точностью механической обработки и проектирования станочных приспособлений.

4.1.1 Структура и принципы функционирования интеллектуальной системы SEMANTIC.

Интеллектуальная система SEMANTIC состоит из двух расчетных модулей:

- модуля расчета точности механической обработки [175];
- модуля расчета станочных приспособлений [176].

Система SEMANTIC предполагает взаимодействие с двумя категориями пользователей:

- проектировщиками технологической оснастки, которые описывают узлы конкретного приспособления, без привлечения специалистов в области программирования;
- пользователями, которым необходимо найти решение задачи в данной предметной области.

При эксплуатации такой системы применяются два вида информации:

- условно-постоянная, характеризующая объекты, сведения о которых могут быть использованы в процессе проектирования и которые известны в начале разработки системы;
- переменная, изменяющаяся при проектировании конкретного технологического процесса или конструкции.

Общая структура системы и схема ее взаимодействия с конечным пользователем показаны на рисунке 4.1.

В состав системы входят следующие модули [177]:

- пользовательский интерфейс;
- подсистема управления базами знаний;
- база знаний;

– МЕХАНИЗМ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА.

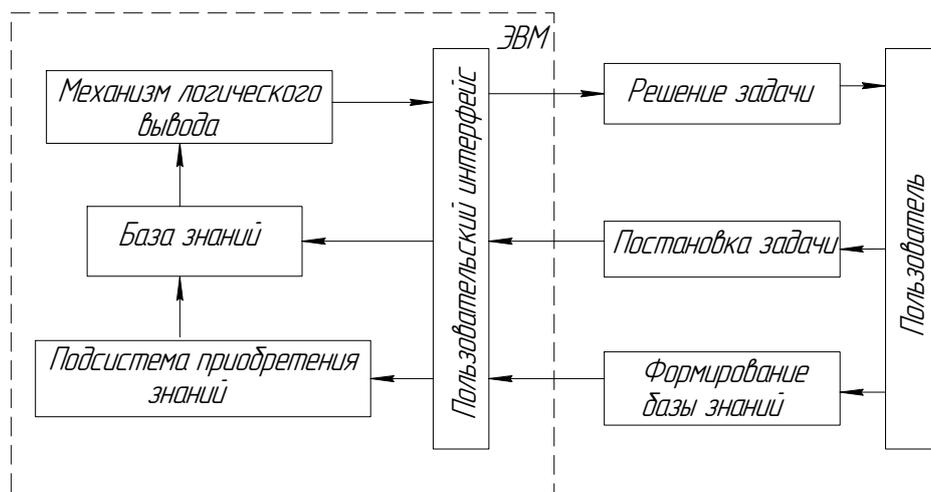


Рисунок 4.1 – Структура системы и ее взаимодействие с конечным пользователем

Интерфейс системы, представленный на рисунке 4.2, ориентирован на диалог пользователя с системой как на стадии ввода исходной информации, так и при получении готового решения поставленной задачи.

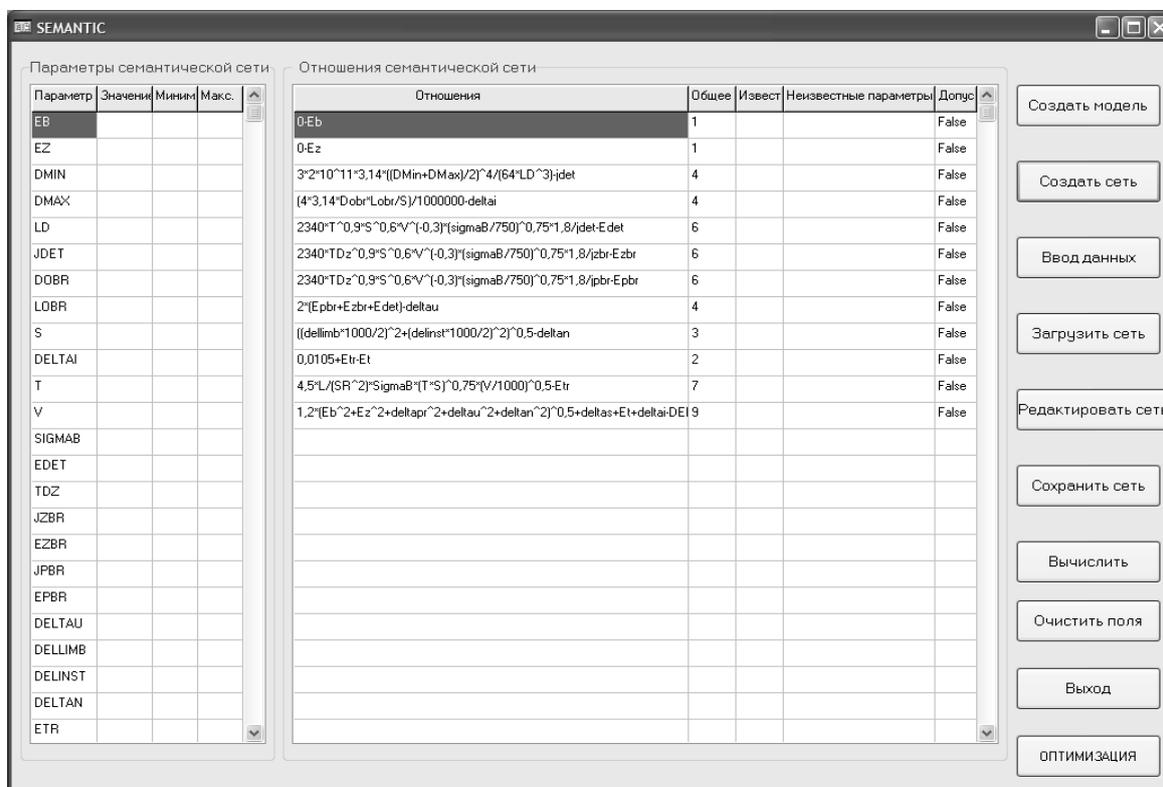


Рисунок 4.2 – Интерфейс системы

Подсистема управления базами знаний включает три модуля:

- модуль создания базы знаний;
- модуль загрузки ранее созданной базы знаний;
- модуль редактирования и сохранения базы знаний.

Модуль создания базы знаний выполнен на основе диалоговых окон, с помощью которых осуществляется построение технической модели проектируемого станочного приспособления [178].

Модуль загрузки базы знаний позволяет системе работать с уже готовыми базами знаний, которые хранятся в файлах текстового типа.

Модуль сохранения дает возможность сохранять как созданную базу знаний, так и изменения, внесенные в уже готовую базу с помощью процедуры *Сохранить СС* (рисунок 4.2).

Система включает техническую и математическую модели, а также алгоритмы решения задач. Эти блоки связаны с базами знаний на всех трех уровнях тремя процессорами формирования соответствующих моделей (рисунок 4.3).

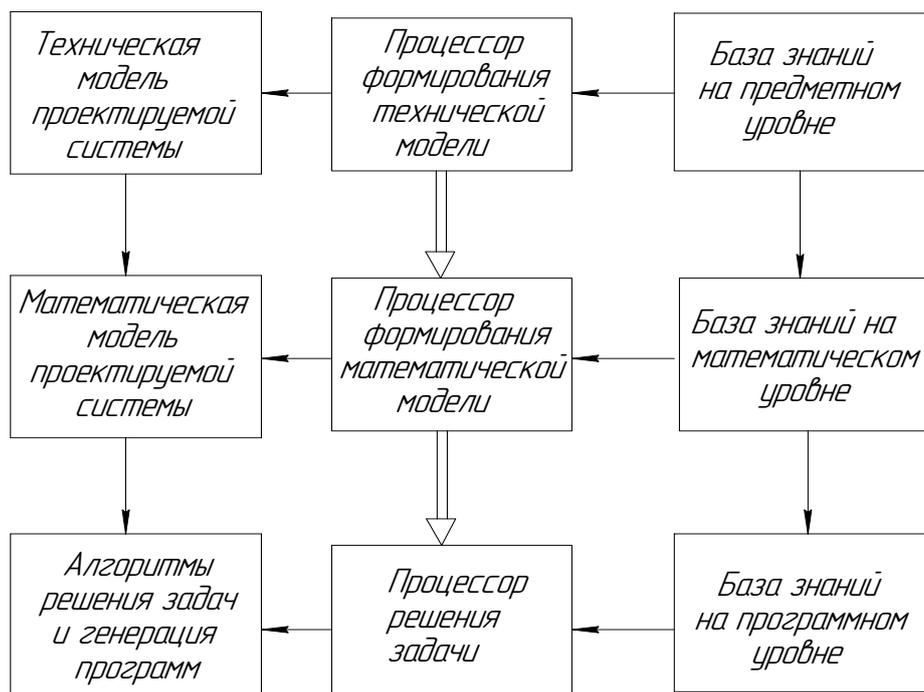


Рисунок 4.3 – Архитектура системы

Процессор формирования технической модели строит ее полное описание. Он содержит набор диалоговых окон, с помощью которых последовательно выбираются характеристики проектируемых технологи-

ческих процессов и станочных приспособлений [176].

Процессор формирования математической модели устанавливает соответствие между компонентами технической модели и моделирующими их математическими отношениями, а также формирует математическую модель объекта в виде функциональной семантической сети.

Функционирование нижних уровней связано с формулировкой пользователем расчетных задач. В расчетной задаче указываются входные и выходные параметры, при этом на некоторые из них могут накладываться интервальные ограничения.

Процессор решения задач осуществляет планирование вычислений на семантических сетях, заключающееся в синтезе алгоритма решения задачи, и формирует программу, выполняемую системой логического вывода.

Переход от предметного уровня к математическому, когда по описанию системы проектировщиком сначала строится полная техническая модель системы, а затем и математическая, решается в данной системе путем представления ее с помощью фреймов характеристик обработки или узлов станочных приспособлений, объединенных в единую структуру.

При выборе определенных характеристик обработки или узлов приспособления фреймы-прототипы преобразуются в фреймы-экземпляры и объединяются в сеть фреймов, которая и представляет собой техническую модель.

По сообщенным пользователем данным автоматически строится математическая модель в виде функциональной семантической сети.

Переход от математического уровня к программному производится в процессе постановки задачи при нахождении минимально замкнутой системы отношений, построение которой позволяет указать, какие разрешения должны быть у каждого из отношений сети и из каких программных модулей образуется цепочка рабочей программы.

Организацию и управление вычислительным процессом осуществляет механизм логического вывода на основе сформированной программы решения задачи [179].

Рассмотрим процедуру поиска на семантической сети.

Поиск выполняется при помощи механизма логического вывода, состоящего из трех основных модулей:

- модуля, осуществляющего семантический анализ строкового выражения, содержащего функциональную зависимость;
- модуля, который производит чтение заданного текста и форми-

рует так называемую польскую запись;

– модуля, осуществляющего расчет выражения по сформированной польской записи.

Модуль, осуществляющий семантический анализ строкового выражения, поочередно считывает символы строки и определяет его принадлежность или к числовой константе, переменной, символу операции, или к имени функции.

По результатам семантического анализа строкового выражения, содержащего функциональную зависимость, создается обратная польская запись, представляющая собой массив управляющих команд, выполнение которых обеспечивает требуемую последовательность вычислений [177].

Пусть, например, требуется вычислить выражение $\frac{KM}{0,001lf} - W$,

позволяющее определить силу закрепления при обработке отверстия концевым инструментом. Тогда с учетом приоритета операций последовательность вычислений может быть, например, такой:

- 1) вычислить $X = KM$;
- 2) вычислить $Y = 0,01l$;
- 3) вычислить $Z = Yf$;
- 4) вычислить $J = \frac{X}{Z}$;
- 5) вычислить $H = J - W$.

Именно подобную последовательность команд обеспечивает обратная польская запись [180].

При вычислении по польской записи создается стек, в который заносятся промежуточные результаты вычислений. В итоге выполнения всех команд в стеке остается единственное число, являющееся конечным результатом.

Польская запись включает в себя команды трех типов:

- $K_1(X)$: выбрать число по заданному имени X и занести его в вершину стека;
- $K_2(O)$: выполнить указанную операцию O над одним или двумя числами в вершине стека; удалить операнды из стека и занести на их место результат вычисления;
- $K_3(F)$: выполнить указанную функцию F с аргументами, равными последнему или двум последним числам в вершине стека; удалить аргументы из стека и занести на их место результат вычисления.

Обратная польская запись для выражения $\frac{KM}{0,001l} - W$ включает

в себя последовательность команд, приведенную в первом столбце таблицы 4.1. Во втором и третьем столбцах отражены состояния стека до и после выполнения соответствующей команды.

Как видно из таблицы 4.1, в итоге выполнения всех команд в стеке остается одно число, являющееся результатом вычисления заданного выражения.

Рассмотрим алгоритм, обеспечивающий формирование обратной польской записи.

Алгоритм использует массив PZ , в котором формируется польская запись, и вспомогательный стек $TrStack$. Из строки, содержащей заданное арифметическое выражение, последовательно читается очередная лексема: числовая константа или переменная, символ операции или имя функции.

Таблица 4.1 – Формирование стека обратной польской записи

Команда	Состояние стека до выполнения команды	Состояние стека после выполнения команды
$K_1(K)$	Пусто	K
$K_1(M)$	K	M
$K_2(\times)$	K, M	$X = KM$
$K_1(0,001)$	X	$X; 0,001$
$K_1(l)$	$X; 0,001$	$X; 0,001; l$
$K_2(\times)$	$X; 0,001; l$	$X;$ $Y = 0,001l$
$K_1(f)$	$X; Y$	$X; Y; f$
$K_2(\times)$	$X; Y; f$	$X; Y$ $Z = Y f$
$K_2(/)$	$X; Z$	$J = \frac{X}{Z}$
$K_1(W)$	J	$J; W$
$K_2(-)$	$J; W$	$H = J - W$

Обозначим эту лексему через L . Она сравнивается с последней лексемой, содержащейся в стеке $TrStack$ (обозначим ее через C), и в зависимости от результатов этого сравнения выполняется одна из

следующих процедур.

Proc0. Отвести в памяти место под хранение значения константы или переменной L . Занести в конец PZ команду $K_1(L)$. Читать из строки следующую лексему.

Proc1. Занести L в вершину стека $TrStack$. Читать из строки следующую лексему.

Proc2. Занести в конец PZ команду $K_2(C)$ или $K_3(C)$ в зависимости от того, является ли лексема C в вершине стека $TrStack$ операцией или именем функции. Удалить C из стека $TrStack$. Занести L в вершину стека $TrStack$. Читать из строки следующую лексему.

Proc3. Занести в конец PZ команду $K_2(C)$ или $K_3(C)$ в зависимости от того, является ли лексема C в вершине стека $TrStack$ операцией или именем функции. Удалить C из стека $TrStack$. Если L – не функция, то повторить выполнение очередной процедуры с той же самой лексемой L .

Proc4. Удалить C из стека $TrStack$. Если в вершине стека функция, то занести соответствующую команду в конец PZ и удалить функцию из стека. Читать из строки следующую лексему (эта процедура используется только в том случае, если L – закрывающаяся скобка).

Выбор той или иной из описанных процедур после чтения из входной строки очередной лексемы L производится в соответствии с таблицей 4.2. В ней строки относятся к введенной лексеме, а столбцы – к вершине стека $TrStack$.

Смысл выбора процедур, описанного в таблице 4.2, следующий. Если из стека выбирается идентификатор переменной, или числовая константа, то под нее отводится память, а в польскую запись заносится команда извлечения из памяти и пересылки в стек выполнения. Если приходит символ какой-то операции, а последний символ, хранящийся в стеке $TrStack$, отвечает началу выражения или открытой скобке, то соответствующая команда в польскую запись не заносится, поскольку еще не введен второй операнд операции. Поэтому символ данной операции сохраняется во вспомогательном стеке $TrStack$. Перед этим сохранением анализируется символ предыдущей операции, хранящийся в стеке $TrStack$.

Если предыдущая операция имеет более низкий приоритет, чем текущая, то прежняя операция сохраняется в стеке, т. к. она будет выполняться после текущей. Следом за ней в стеке помещается текущая операция с помощью процедуры *Proc1*.

Если предыдущая операция имеет тот же приоритет, что и текущая, то она выполняется прежде текущей, т. к. в польской записи операции

одного старшинства выполняются слева направо. Поэтому предыдущая операция заносится в польскую запись, а текущая помещается в стек с помощью процедуры *Proc2*.

Если предыдущая операция имеет более высокий приоритет, чем текущая, то она также выполняется раньше текущей. Поэтому соответствующая ей команда включается в польскую запись. В то же время перед ней могут анализироваться другие хранящиеся в стеке операции, которые также должны выполняться ранее текущей. В связи с этим после удаления из стека предыдущей операции продолжается анализ операций, хранящихся в стеке. Эти функции осуществляет процедура *Proc3*.

Аналогичные действия по включению в польскую запись серии хранящихся в стеке операций совершаются, если в выражении рассматривается закрывающая скобка (при этом надо выполнить все операции, указанные в скобках) или если строка, содержащая обрабатываемое арифметическое выражение, закончена.

Описанные переходы представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Правила формирования обратной польской записи

Переход обратной польской записи	Начало	(+	×, /)	Функция
Конец выражения	Конец	<i>Proc3</i>	<i>Proc3</i>	<i>Proc3</i>	<i>Proc3</i>	Ошибка
(<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>
+, -	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc3</i>	<i>Proc3</i>	Ошибка
×, /	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc2</i>	<i>Proc3</i>	Ошибка
	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc2</i>	Ошибка
Функция	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	<i>Proc1</i>	Ошибка
)	Ошибка	<i>Proc4</i>	<i>Proc3</i>	<i>Proc3</i>	<i>Proc3</i>	<i>Proc3</i>
Константа, переменная	<i>Proc0</i>	<i>Proc0</i>	<i>Proc0</i>	<i>Proc0</i>	<i>Proc0</i>	<i>Proc0</i>

Пример трансляции выражения $\frac{KM}{0,001l f} - W$ приведен в таблице 4.3.

В первом столбце таблицы показана очередная прочитанная лексема заданного выражения; в третьем столбце – стек *TrStack* после выполнения процедуры, указанной во втором столбце. Эта процедура выбирается в результате сравнения пришедшей лексеммы с последним элементом стека в предшествующей строке (т. е. последним элементом в момент прихода

очередной лексемы). В четвертом столбце приведена формируемая польская запись.

Таблица 4.3 – Процесс трансляции выражения

Пришло	Процедура	Стек	Польская запись
1	2	3	4
Начало		0	Пусто
K	$Proc0$	0	$K_1(K)$
\times	$Proc1$	0, \times	$K_1(K)$
M	$Proc0$	0, \times	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times)$
$/$	$Proc1$	0, $/$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times)$
0,001	$Proc0$	0, $/$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001)$
\times	$Proc1$	0, $/, \times$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001)$
l	$Proc0$	0, $/, \times$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001), K_1(l)$
\times	$Proc1$	0, $/, \times$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001), K_1(l), K_2(\times)$
f	$Proc0$	0, $/, \times$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001), K_1(l), K_2(\times), K_1(f)$
$-$	$Proc1$	0, $-$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001), K_1(l), K_2(\times), K_1(f), K_2(\times), K_2(/)$
W	$Proc0$	0, $-$	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001), K_1(l), K_2(\times), K_1(f), K_2(\times), K_2(/), K_1(W)$
Конец	$Proc3$	0 Конец	$K_1(K), K_1(M), K_2(\times), K_1(0,001), K_1(l), K_2(\times), K_1(f), K_2(\times), K_2(/), K_1(W), K_2(-)$

Таким образом, в отличие от принятого в традиционном программировании подхода, программа формируется не пользователем, а самой системой. При этом жесткий алгоритм отсутствует и вырабатывается системой в процессе решения. Это существенно упрощает и ускоряет процесс поиска решения.

4.1.2 Обеспечение точности механической обработки интеллектуальной системой SEMANTIC.

Система SEMANTIC осуществляет оптимизацию параметров технологических процессов с целью обеспечения заданной точности механической обработки. Для работы с системой необходимо построение технической модели управляемого технологического процесса, которое происходит в несколько этапов.

Для формирования математической модели проектируемой системы в виде функциональной семантической сети нужно создать техническую

модель, описывающую технологический процесс.

На первом этапе построения модели указывается схема базирования заготовки в приспособлении. Конкретной схеме базирования соответствует некоторое множество допустимых схем установки заготовки, т. е. совокупность данных [181]

$$\{П, СБ, УЭ\}, \quad (4.1)$$

где $П$ – базовые поверхности заготовки;

$СБ$ – схема базирования;

$УЭ$ – установочные элементы.

На рисунке 4.4 показана классификационная схема для выбора схемы установки заготовки в приспособлении при обработке концевым инструментом.

На втором этапе определяется способ установки приспособления на станке; на третьем – выбирается тип применяемой кондукторной втулки.

Далее приводятся сведения о материале заготовки, инструмента и установочных элементов приспособления, а также время работы станка.

Переход от построенной технической модели к математической решается путем представления ее с помощью фреймов характеристик технологического процесса, объединенных в единую структуру.

Базовые поверхности	Наружная цилиндрическая поверхность	Внутренняя цилиндрическая поверхность	2 отверстия и перпендикулярная плоскость	Плоские поверхности
Схема базирования	По наружной цилиндрической поверхности с упором в торец	По внутренней цилиндрической поверхности с упором в торец	По 2 цилиндрическим отверстиям и перпендикулярной плоскости	По трем плоскостям
Установочные элементы	Патрон	Цилиндрическая оправка	Цилиндрические пальцы	Плоские опоры
	Призма			
	Цанговое зажимное устройство	Срезанный палец	Выдвижные конические пальцы	Рифленные опоры
	Втулка	Выдвижной конический палец		

Рисунок 4.4 – Классификационная схема для выбора схемы установки заготовки в приспособлении

Так, например, на рисунке 4.5 показана структура предметного уровня знаний системы, служащая для выбора способа базирования заготовки в приспособлении.

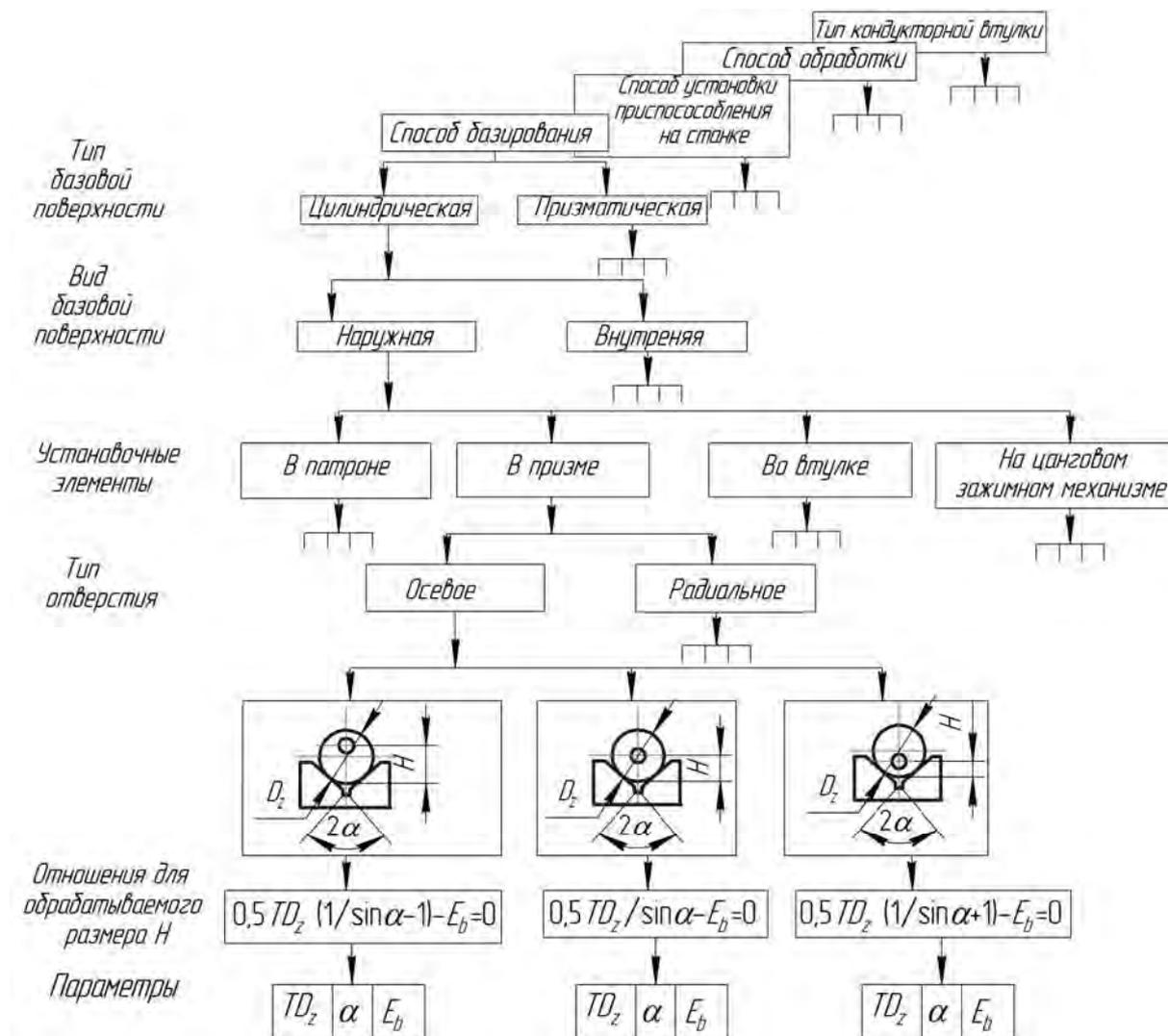


Рисунок 4.5 – Выбор способа базирования заготовки в приспособлении

Структура представляет собой И/ИЛИ граф, описывающий различные варианты способов базирования. По уровням структуры указаны возможные варианты базирования, соответствующие им расчетные математические отношения и их характеристики, используемые при управлении точностью.

Таким образом, по сообщенным пользователем данным автоматически строится математическая модель в виде функциональной семантической сети.

При решении оптимизационных задач системой анализируются отношения сети и определяются те из них, использование которых позволяет рассчитать величины параметров технологического процесса и технологической оснастки. Эти отношения преобразовываются в соответствующие функции, на основе которых механизмом логического вывода системы осуществляется поиск решения.

Для работы с математической моделью необходимо задать исходные данные, а также интервальные ограничения на параметры технологического процесса и технологической оснастки [182].

В число факторов, учитываемых или управляемых системой, входит множество параметров: вид обработки, допуск на обработку, способ базирования и закрепления, материал заготовки и режущей части инструмента, глубина и скорость резания, подача, длина обработки, высота кондукторной втулки, геометрические параметры режущего инструмента, время работы станка и ряд других.

Изменение параметров сети позволяет вести управление суммарной погрешностью обработки. Практически изменять можно только ряд параметров. Так, например, сила резания зависит от твердости заготовки, глубины резания, подачи, материала инструмента, его геометрии. Очевидно, что для управления силой резания из этих параметров могут быть изменены только подача и глубина резания. Однако изменение глубины резания повлечет за собой ухудшение точности обработки. Поэтому наиболее целесообразным способом компенсации силы резания применительно к условиям обработки отверстий является изменение подачи. Похожий анализ для других составляющих общей погрешности учитывался при выборе управляемых параметров системы.

Таким образом, на основе анализа множества параметров функциональной семантической сети были выделены подмножества управляемых и неуправляемых параметров.

Неуправляемые параметры включают входные данные и параметры технологического процесса, значения которых фиксированы (например, допуск размера, шероховатость обрабатываемой поверхности). Доступ к изменению этих параметров компьютерной системой закрыт.

Управляемые параметры включают, как правило, внутренние параметры технологического процесса, которые могут изменяться с учетом конкретных производственных условий (подача, скорость резания и т. д.), в связи с чем их величины корректируются системой в пределах заданных ограничений.

В качестве управляемых параметров используются количество деталей в настроечной партии, обрабатываемых в период между подналадками станка n ; подача инструмента S ; скорость резания V ; площадь контакта опоры с заготовкой F ; длина образующей, по которой происходит контакт заготовки с приспособлением l ; износ установочных элементов приспособления U ; число установов N заготовок в приспособление; максимальный диаметральный зазор между кондукторной втулкой и инструментом S_{\max} ; расстояние от поверхности заготовки до кондукторной втулки m ; время работы станка t_c ; длина вылета инструмента за торец втулки l_x и др.

В системе задача управления точностью сводится к многокритериальной оптимизации, целью которой является обеспечение максимального запаса точности, т. е.

$$T - \Delta_{\Sigma}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) \rightarrow \max, \quad (4.2)$$

где T – допуск на обработку, мм;

$\Delta_{\Sigma}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ – суммарная погрешность обработки, учитывающая π_n параметров технологического процесса и технологической оснастки, мм.

Для этого системой предлагается ряд оптимизируемых параметров, изменением значений которых можно управлять суммарной погрешностью обработки. Исходя из производственных возможностей специалистом-технологом данные параметры принимаются или отвергаются.

Важной деталью системы являются процедуры разрешения конфликтов. Известно, что влияние отдельных параметров на общую погрешность противоречиво. Например, увеличение подачи приводит к снижению составляющей погрешности, связанной с износом режущего инструмента. С другой стороны, увеличение подачи влечет за собой увеличение составляющей, связанной с упругими смещениями оси концевого инструмента. Таким образом, снижение одной погрешности приводит к росту другой, причем их величины имеют существенно отличающиеся значения в зависимости от условий обработки. В связи с этим система задает последовательно ряд значений оптимизируемого фактора (подачи) из области его изменения и вычисляет для каждого значения величину суммарной погрешности Δ_{Σ} . В качестве окончательной (оптимальной) величины подачи фиксируется то значение, которое минимизирует величину Δ_{Σ} .

Если возможности управления величинами некоторых составляющих исчерпаны и при этом значение остаточной погрешности $\Delta_{\Sigma_{ост}}$, вычисленное по формуле (2.1), превышает допуск обработки T , то никакие дальнейшие меры не позволят обеспечить условие точности обработки ($T > \Delta_{\Sigma}$), о чем и сообщит система.

4.1.3 Проектирование технологической оснастки на основе использования интеллектуальной системы SEMANTIC.

При проектировании станочных приспособлений с помощью системы SEMANTIC можно проводить выбор как оптимальных параметров элементов, так и оптимальной структуры приспособления [181].

При определении оптимальных параметров элементов станочного приспособления задается его структура исходя из функционального назначения, а также накладываются интервальные ограничения на величины параметров системы.

В основу автоматизации проектирования станочных приспособлений с использованием системы SEMANTIC положен метод их синтеза, т. к. конструкции приспособлений отличаются большим многообразием, многокомпонентностью и иерархичностью структур, сложной геометрией составляющих элементов и широким диапазоном изменения размеров.

Синтез структуры проектируемого приспособления происходит в несколько этапов, каждый из которых соответствует построению одной из функциональных групп конструктивных элементов приспособления и состоит из трех стадий.

На первой стадии выбирается и анализируется информация, характеризующая схему установки или зажима; на второй – осуществляется выбор схемы конструкции функциональной группы; на третьей – ее конструктивное воплощение.

При выборе схемы конструкции функциональной группы определяется совокупность наименований конструктивных элементов, выполняющих в приспособлении ту или иную рабочую функцию. Например, схему конструкции функциональной группы установочных элементов (схему установки) могут образовывать цилиндрический и ромбический пальцы вместе с плоскостью в приспособлении. Примером схемы зажима является, в частности, зажим заготовки отводным прихватом с прижимом боковыми винтами.

На первом этапе синтеза конструкции станочного приспособления указываются схема базирования заготовки в приспособлении и сово-

купность данных (4.1).

На втором этапе осуществляется синтез зажимных механизмов приспособления и рассматривается совокупность данных

$$\{TЗЭ, ЗЭ_i\}_{i=1}^p, \quad (4.3)$$

где $TЗЭ$ – тип i -го зажимного механизма;

$ЗЭ_i$ – i -й зажимный механизм;

p – количество зажимных механизмов, входящих в состав конструкции приспособления.

На третьем этапе выбираются тип применяемого привода и его размерные характеристики.

После завершения синтеза конструкции проектируемого приспособления системой формируется техническая модель, от которой переход к математической модели решается путем представления ее с помощью фреймов узлов станочных приспособлений, объединенных в единую структуру.

Так, например, на рисунке 4.6 показана структура предметного уровня знаний системы, служащая для выбора зажимных механизмов.

Задача, связанная с нахождением оптимальной структуры станочного приспособления, решается при условии, что заданы параметры проектируемой системы и требуется найти из множества допустимых вариантов структурных схем такую схему, при которой обеспечивается экстремум критерия оптимальности [183].

Для этого выполняется расчет различных вариантов структурных схем приспособлений, а затем определяются те из них, которые соответствуют лучшим проектным характеристикам или обеспечивают их допустимые значения.

Система использует следующие критерии для выбора оптимальной структуры приспособления:

- точность установки заготовки в приспособлении;
- развиваемая силовым механизмом сила закрепления заготовки;
- коэффициент усиления силового механизма;
- развиваемая приводом сила.

Если критериями выбора оптимальной схемы являются ее точностные показатели (погрешности базирования и закрепления), то погрешность установки в этом случае должна быть минимальной, т. е. $\varepsilon_y \rightarrow \min$.

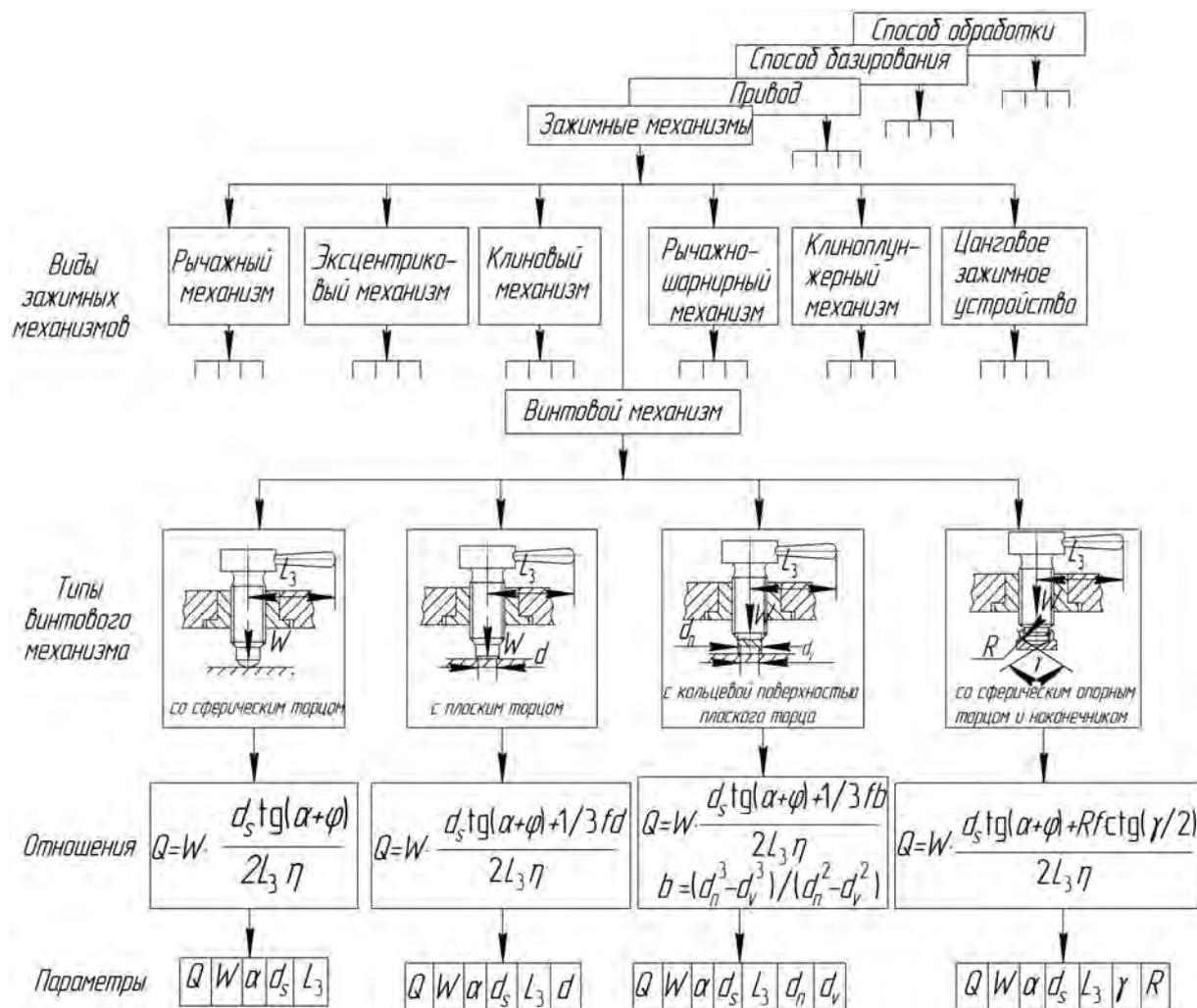


Рисунок 4.6 – Выбор зажимных механизмов

При использовании второго критерия системой определяется требуемая сила закрепления заготовки W_{tr} в зависимости от сил резания, коэффициента усиления i рассматриваемого силового механизма, развиваемой приводом силы Q и развиваемой силовым механизмом силы закрепления заготовки W_r . Оптимальное сочетание силового механизма с приводом можно найти из условия $W_{tr} \leq W_r = iQ$, при этом $W_r - W_{tr} \rightarrow \min$.

При использовании в качестве критерия коэффициента усиления система осуществляет сравнение соответствующих коэффициентов рассматриваемых схем и выбирает наилучшую из них.

Функцией анализатора является выполнение условия обеспечения надежного закрепления заготовки

$$i_r \geq i_{tr} = \frac{W_{tr}}{Q}, \text{ при этом } i_r - i_{tr} \rightarrow \min, \quad (4.4)$$

где i_r – требуемый коэффициент усиления.

В результате выбора оптимальной структуры приспособления формируется информационная модель, отражающая элементный состав конструкции. Согласно данной модели конструкция – это множество метрически определенных конструктивных элементов [184].

Обозначив информационную модель конструкции через \overline{K} , можно отметить, что она определяется множеством мощностью n [177]

$$\overline{K} = \{\overline{KЭ_1}, \overline{KЭ_2}, \dots, \overline{KЭ_n}\} = \{\overline{KЭ_i}\}_{i=1}^n, \quad (4.5)$$

где $\overline{KЭ_i}$ – метрическая определенность i -го конструктивного элемента;

n – число элементов в конструкции приспособления.

Метрическая определенность i -го конструктивного элемента описывается парой

$$\overline{KЭ_i} = (KЭ_i, \overline{v_i}), \quad (4.6)$$

где $KЭ_i$ – код i -го конструктивного элемента приспособления;

$\overline{v_i}$ – вектор размерных характеристик i -го конструктивного элемента.

Вектор размерных характеристик i -го конструктивного элемента имеет вид:

$$\overline{v_i} = (v_1, \dots, v_q), \quad (4.7)$$

где q – число размеров, характеризующих i -й конструктивный элемент приспособления.

Таким образом, несмотря на многообразие структур и геометрических форм существующих и проектируемых конструкций приспособлений, все они могут быть представлены множеством пространственно упорядоченных и метрически определенных конструктивных элементов. Это свойство позволяет описывать конструкции с помощью унифицированной информационной модели, отражающей как их элементный состав, так и структурные взаимосвязи внутри нее.

4.2 Практическое использование интеллектуальной системы SEMANTIC

4.2.1 Обеспечение точности обработки концевым инструментом на основе использования интеллектуальной системы SEMANTIC.

Рассмотрим пример решения задачи, определяющей суммарную погрешность расположения оси обрабатываемого отверстия (см. рисунок 3.10).

Исходными данными для этой задачи являются: допуск на обработку $T_{obr} = 0,25$ мм; допуск базовой поверхности заготовки $TD_Z = 0,043$ мм; число установов $N = 50$; твердость материала заготовки по Бринеллю $241 HB$; диаметр инструмента $DIN = 12,8$ мм; подача инструмента $S = 0,28$ мм/об; поле допуска на величину обратной конусности $TK = 0,06$ мм; поле допуска на размер отверстия сменной втулки $TSV = 0,011$ мм; поле допуска на размер направляющей части инструмента $TNI = 0,027$ мм; погрешность размеров между осью шпинделя и базовыми элементами приспособления $DELTA R = 0,081$ мм; высота кондукторной втулки $LVT = 12$ мм; максимальный зазор между шпонкой и T -образным пазом станка $SSHP = 0,163$ мм; допуск на отклонение от соосности осей быстросменной и постоянной втулок $TB_1 = 0,006$ мм; допуск на отклонение от соосности осей постоянной втулки и отверстия в плите $TB_2 = 0,02$ мм; допуск на межцентровое расстояние между осями отверстий в плите $TB_3 = 0,03$ мм; допуск на отклонение от соосности осей отверстия во втулке и отверстия в плите $TB_4 = 0,04$ мм; допуск на отклонение от соосности осей отверстия во втулке и пальца $TB_5 = 0,036$ мм; допуск на эксцентricность пальца $TB_6 = 0,003$ мм; допуск на требуемое расположение оси обрабатываемого отверстия относительно оси пальца $TB_7 = 0,02$ мм и др.

Для расчета точности необходимо сформировать функциональную семантическую сеть. Для этого пользователь должен указать характеристики процесса обработки и ввести исходные данные [185].

При расчете точности обработки концевым инструментом системой используется модуль расчета точности механической обработки, выбор которого показан на рисунке 4.7.

Характеристики процесса обработки вводятся пользователем в диалоговом режиме, при этом указываются способ обработки заготовки лезвийным инструментом, материал обрабатываемой заготовки и инструмента, размеры инструмента, тип заготовки, способ ее базирования, время работы станка, принцип установки приспособления на станке, а также тип применяемой кондукторной плиты (рисунок 4.8).

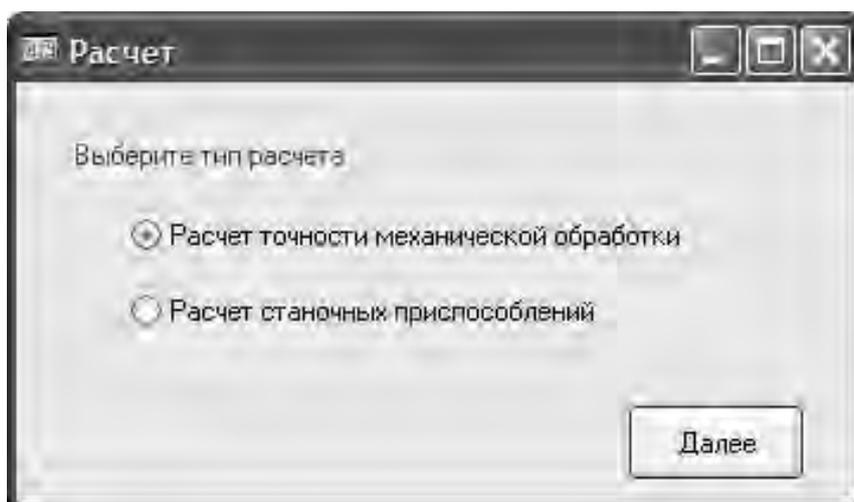


Рисунок 4.7 – Диалоговое окно выбора типа расчета системой

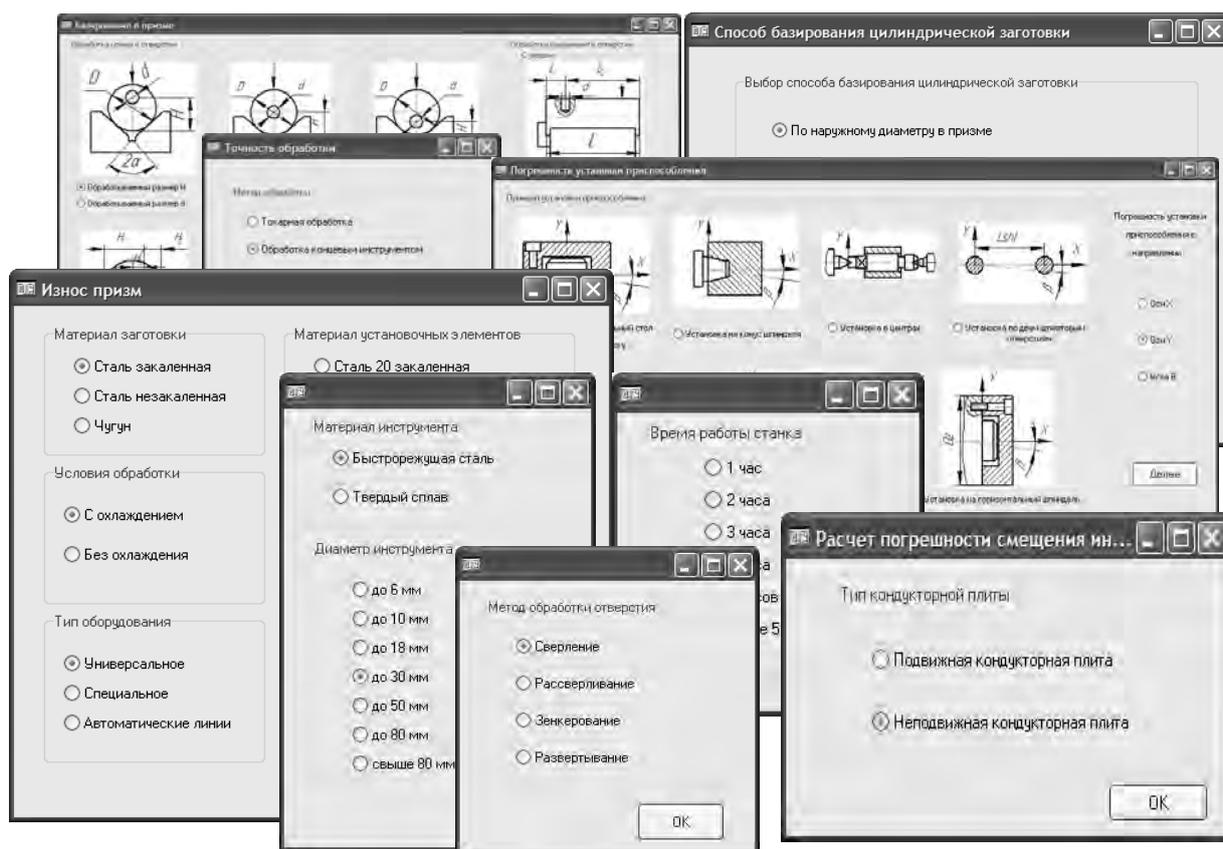


Рисунок 4.8 – Диалоговые окна выбора исходных данных

После выбора агрегатного состава проектируемой системы автоматически определяются математические отношения, которые будут использоваться при расчете точности обработки концевым инструментом (рисунок 4.9).

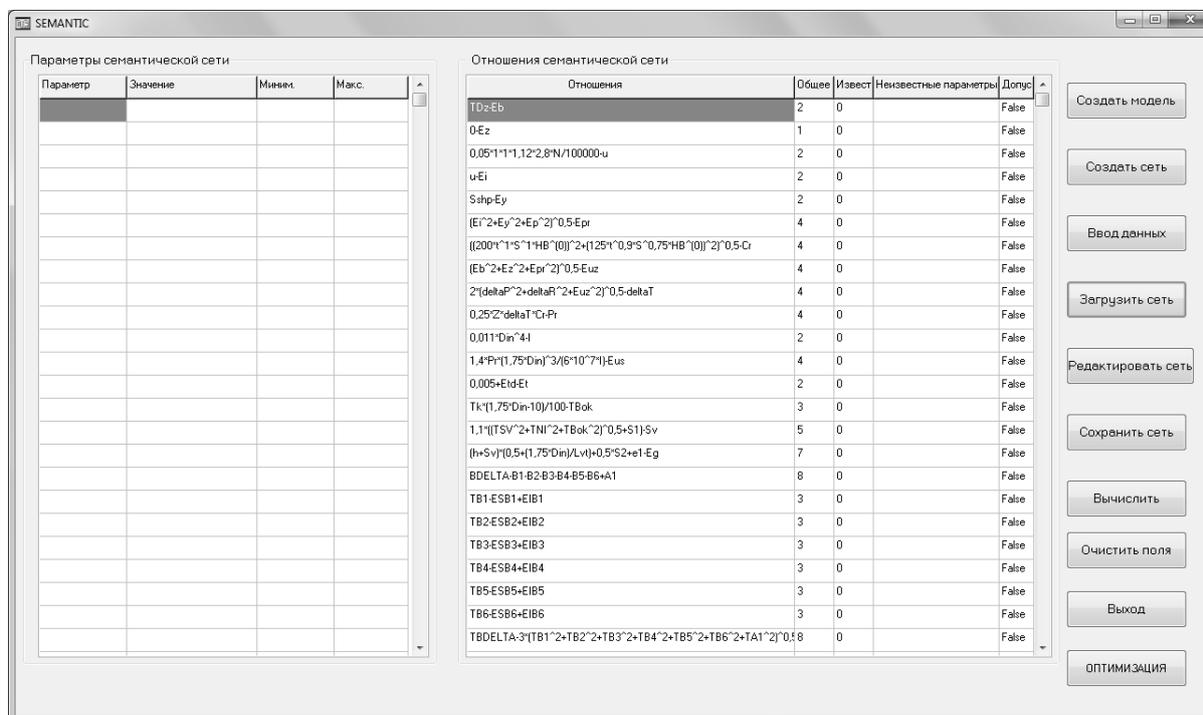


Рисунок 4.9 – Отображение математических отношений системы

Далее с помощью процедуры *Создать СС* (см. рисунок 4.9) анализируются полученные математические зависимости и определяются параметры, входящие в состав этих отношений.

В результате была сформирована математическая модель проектируемой системы в виде функциональной семантической сети, представленной в таблицах диалогового окна (рисунок 4.10).

После ввода исходных данных и ограничений параметров сети (рисунок 4.11) заполняются все поля таблиц главного диалогового окна (рисунок 4.12).

В первой таблице указаны параметры проектируемой системы, их величины, а также интервал значений для поиска решений.

В таблице *Отношения семантической сети* представлены отношения, которые используются при расчете точности обработки концевым инструментом. Для каждого из них указано общее количество параметров (столбец *Общее*), число известных параметров в данном отношении

(столбец *Извест.*), а также приведен список неизвестных параметров (столбец *Неизвестные параметры*), которые должны быть определены.

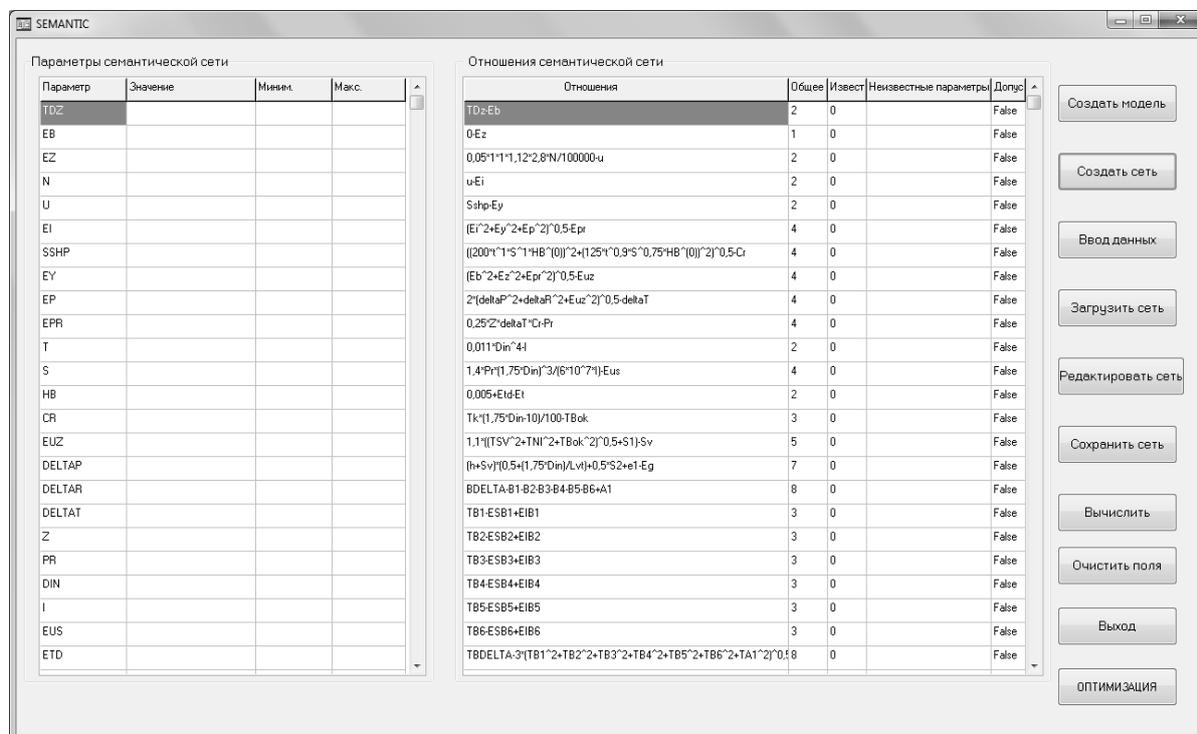


Рисунок 4.10 – Функциональная семантическая сеть для расчета точности

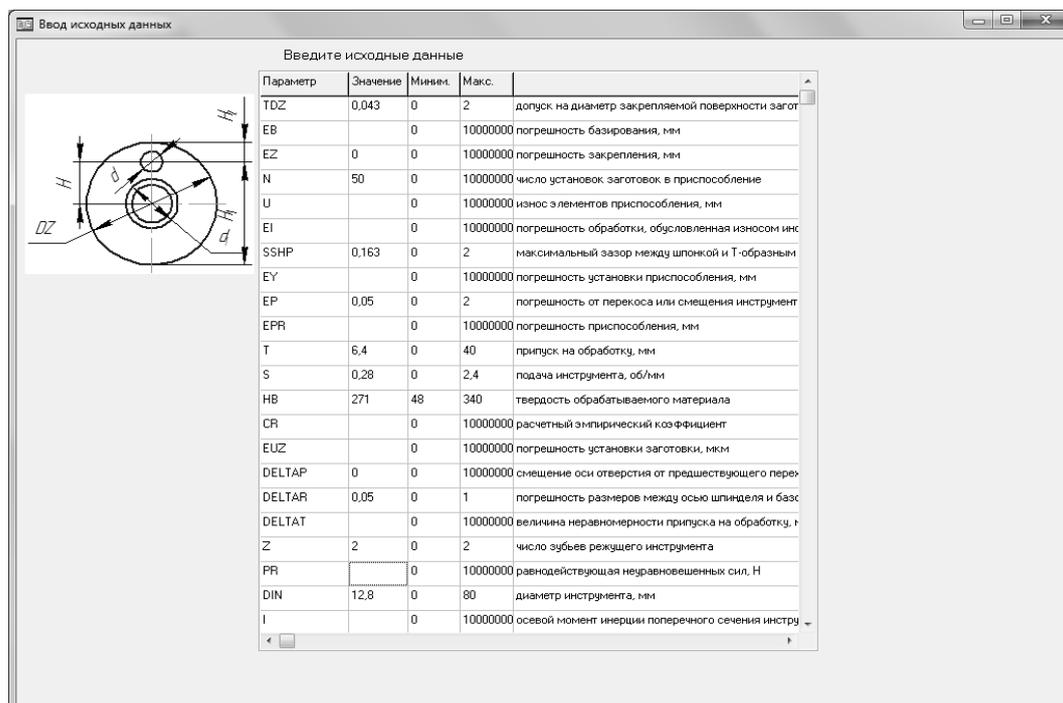


Рисунок 4.11 – Диалоговое окно ввода исходных данных

Далее системе указывается параметр, который необходимо определить, например, суммарную погрешность обработки, т. е. параметр *DELTAOBR* (рисунок 4.13).

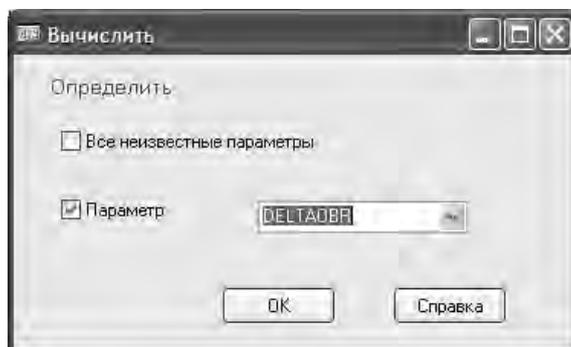


Рисунок 4.13 – Диалоговое окно выбора рассчитываемого параметра

Так, при приведенных исходных данных на основе методики традиционного решения задачи с использованием справочного материала была определена суммарная погрешность обработки, равная 0,472 мм (рисунок 4.14).

Сравнивая полученную погрешность обработки с точностью заданного размера ($T_{obr} = 0,25$ мм), можно сделать вывод о том, что в данных условиях требуемая точность обработки не будет обеспечена, т. к. $DELTAOBR > T_{obr}$.

Рисунок 4.14 – Результат решения задачи системой

С целью получения максимального запаса точности система на основе использования метода случайного поиска с возвратом на семантической сети позволяет осуществлять многофакторную оптимизацию параметров сети.

Определим оптимальные подачу инструмента S , высоту кондукторной втулки LVT , минимальный гарантированный зазор посадки «втулка–инструмент» S_1 , зазор между шпонками и T -образными пазами станка $SSHP$, а также допуск на межцентровое расстояние между осями отверстий в кондукторной плите приспособления TB_3 (см. рисунок 3.10), обеспечивающих наименьшую суммарную погрешность обработки отверстия, с помощью процедуры «Оптимизация».

Для этого укажем в диалоговом окне, представленном на рисунке 4.15, управляемые параметры, которые будут оптимизированы.

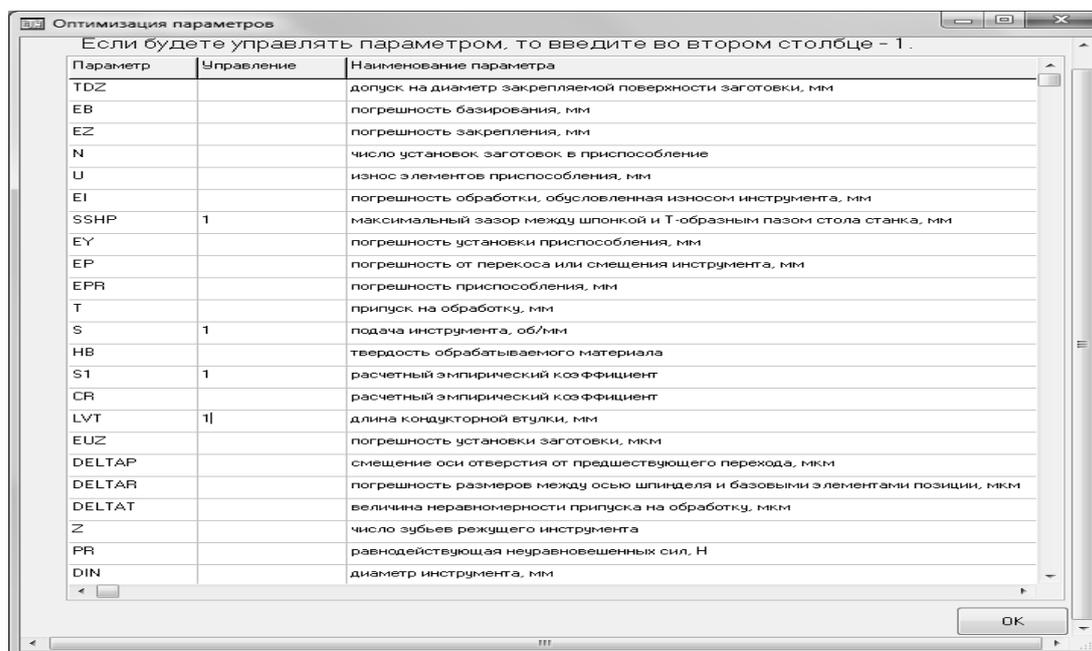


Рисунок 4.15 – Выбор управляемых параметров

В результате системой были найдены оптимальные значения подачи инструмента $S = 0,125$ мм/об, высоты кондукторной втулки $LVT = 32$ мм, максимальный зазор между шпонкой и T -образным пазом станка $SSHP = 0,025$ мм, минимальный гарантированный зазор посадки «втулка–инструмент» $S_1 = 0$, допуск на межцентровое расстояние между осями отверстий в плите приспособления $TB_3 = 0,01$ мм, погрешность приспособления $EP = 0,042$ мм, при которых обеспечивается наименьшая

погрешность обработки концевым инструментом при указанных исходных данных, равная $DELTA_{OBR} = 0,210$ мм (рисунок 4.16).

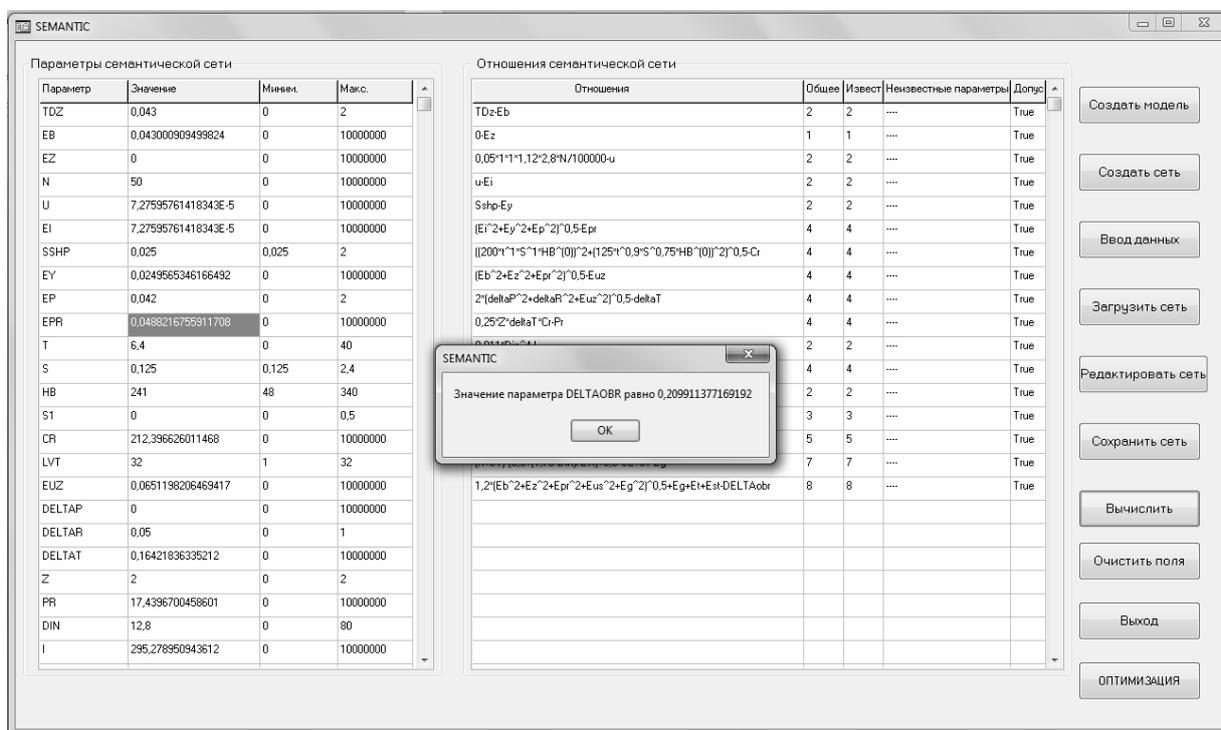


Рисунок 4.16 – Результат оптимизации системой

Сравнивая полученную погрешность обработки с точностью заданного размера ($T_{obr} = 0,25$ мм), можно сделать вывод о том, что в данных условиях требуемая точность обработки будет обеспечена, т. к. $DELTA_{OBR} < T_{obr}$.

Таким образом, по сравнению с традиционным методом, погрешность была снижена на 0,262 мм и, соответственно, точность обработки повышена на 55 %.

Тестирование системы показало, что, оперируя управляемыми параметрами сети, можно увеличить точность механической обработки до 60 %.

При этом достигаемый результат не связан с применением какой-либо специальной технологической оснастки, а обеспечивается исключительно организационными мерами. Так, могут использоваться менее форсированные (или, наоборот, более форсированные) режимы обработки, скрытые функциональные взаимосвязи между ее параметрами, а также учитываться фактическое состояние технологического оборудования.

4.2.2 Расчет станочных приспособлений системой SEMANTIC.

4.2.2.1 Силовой расчет станочного приспособления на основе использования интеллектуальной системы SEMANTIC. Рассмотрим силовой расчет станочного приспособления, используемого при обработке заготовок концевым инструментом и предназначенного для полного базирования заготовок по трем плоскостям и закрепления силами, направленными по нормали к опорной плоскости. Закрепление заготовки осуществляется с помощью пневмоцилиндра. Усилие зажима передается на прихват через клиновый механизм (рисунок 4.17).

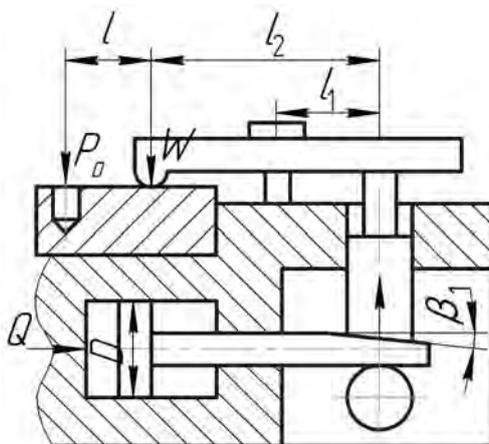


Рисунок 4.17 – Схема к расчету проектируемого станочного приспособления

Исходными данными поставленной задачи являются: диаметр инструмента $DIN = 20$ мм; подача инструмента $S = 0,14$ мм/об; предел прочности обрабатываемого материала $SIGMA_B = 750$ МПа; размер $L = 150$ мм; размер $L_1 = 150$ мм; размер $L_2 = 400$ мм; угол скоса клина $BETA_1 = 30^\circ$; давление в пневмоцилиндре $P = 0,63$ МПа.

Для силового расчета рассматриваемого приспособления необходимо сформировать функциональную семантическую сеть. Для этого пользователь должен указать агрегатный состав станочного приспособления и ввести исходные данные. При силовом расчете станочных приспособлений системой используется модуль силового расчета, осуществляющего расчет силы закрепления заготовки, а также расчет зажимных механизмов и привода приспособления.

Характеристики процесса обработки и проектируемого приспособления вводятся пользователем в диалоговом режиме, при этом указываются способ обработки заготовки лезвийным инструментом, материал обрабатываемой заготовки и инструмента, вид зажима, площадь контакта

заготовки с опорным элементом приспособления, тип заготовки и обрабатываемого отверстия, а также агрегатный состав проектируемой системы (рисунок 4.18).

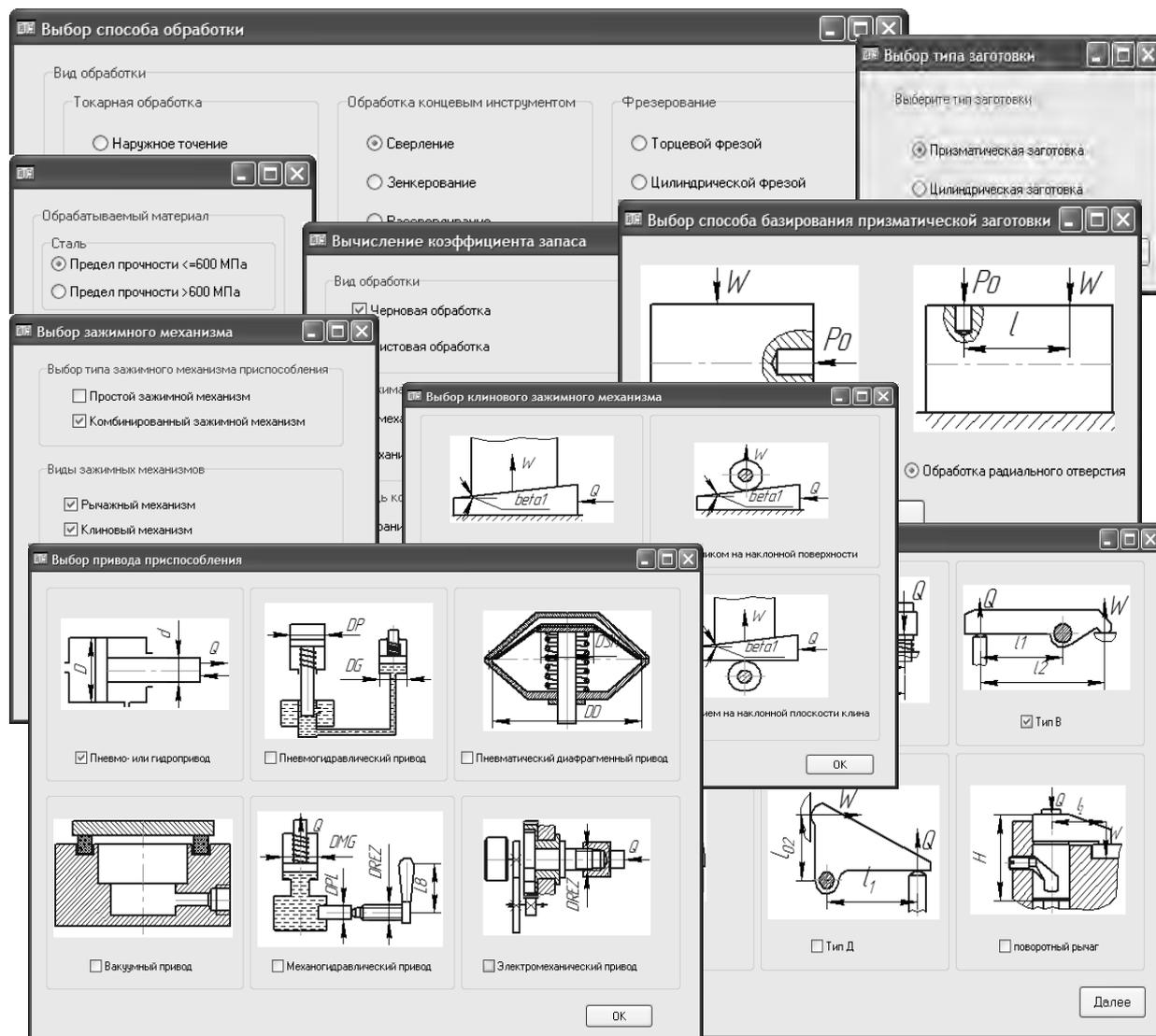


Рисунок 4.18 – Диалоговые окна выбора исходных данных

Выбора агрегатного состава проектируемой системы и ввода исходных данных (рисунок 4.19) достаточно для того, чтобы по ним была автоматически сформирована модель системы в виде функциональной семантической сети.

Для проверки условия надежного закрепления заготовки в приспособлении необходимо определить силу закрепления (рисунок 4.20).

Так, при приведенных исходных данных системой были определены требуемая W_{TR} и развиваемая W_R силы закрепления, равные соответст-

венно 2370 и 911 Н (рисунок 4.21). В связи с тем, что $W_{TR} > W_R$, рассматриваемое приспособление не обеспечивает надежного закрепления заготовки.

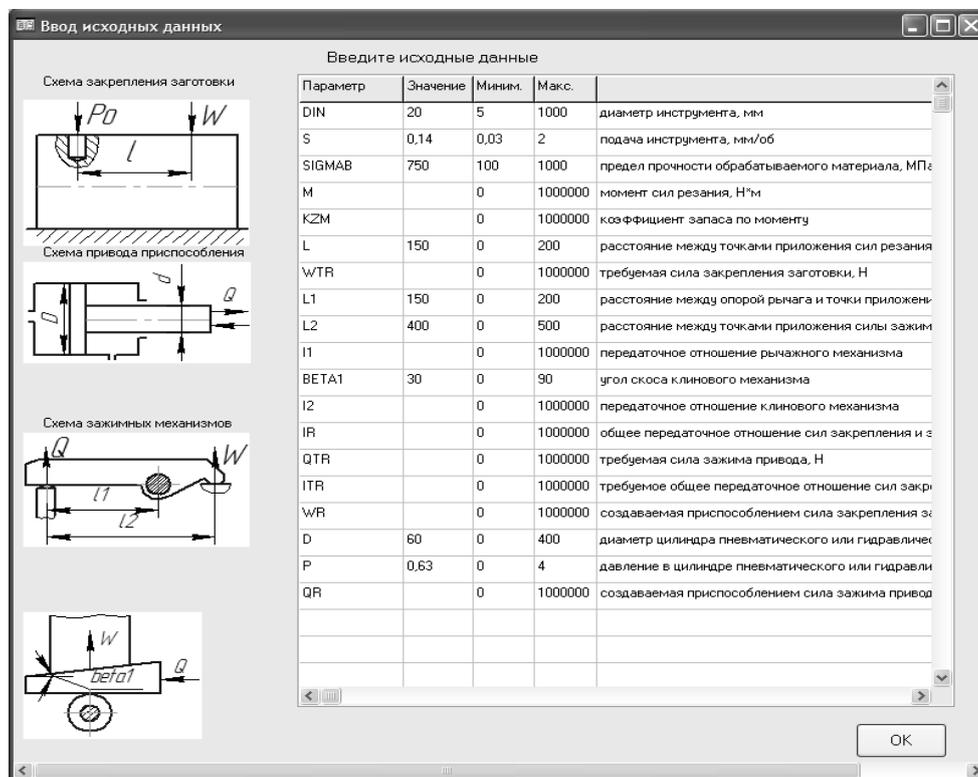


Рисунок 4.19 – Диалоговое окно ввода исходных данных

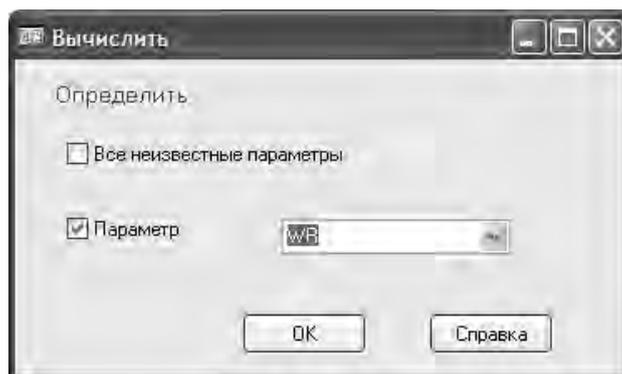


Рисунок 4.20 – Диалоговое окно выбора рассчитываемого параметра

Таким образом, системе необходимо найти такие параметры приспособления, при которых выполнялось бы условие закрепления заготовки. В качестве такого параметра система использует диаметр штока пневмоцилиндра проектируемого приспособления D (рисунок 4.22).

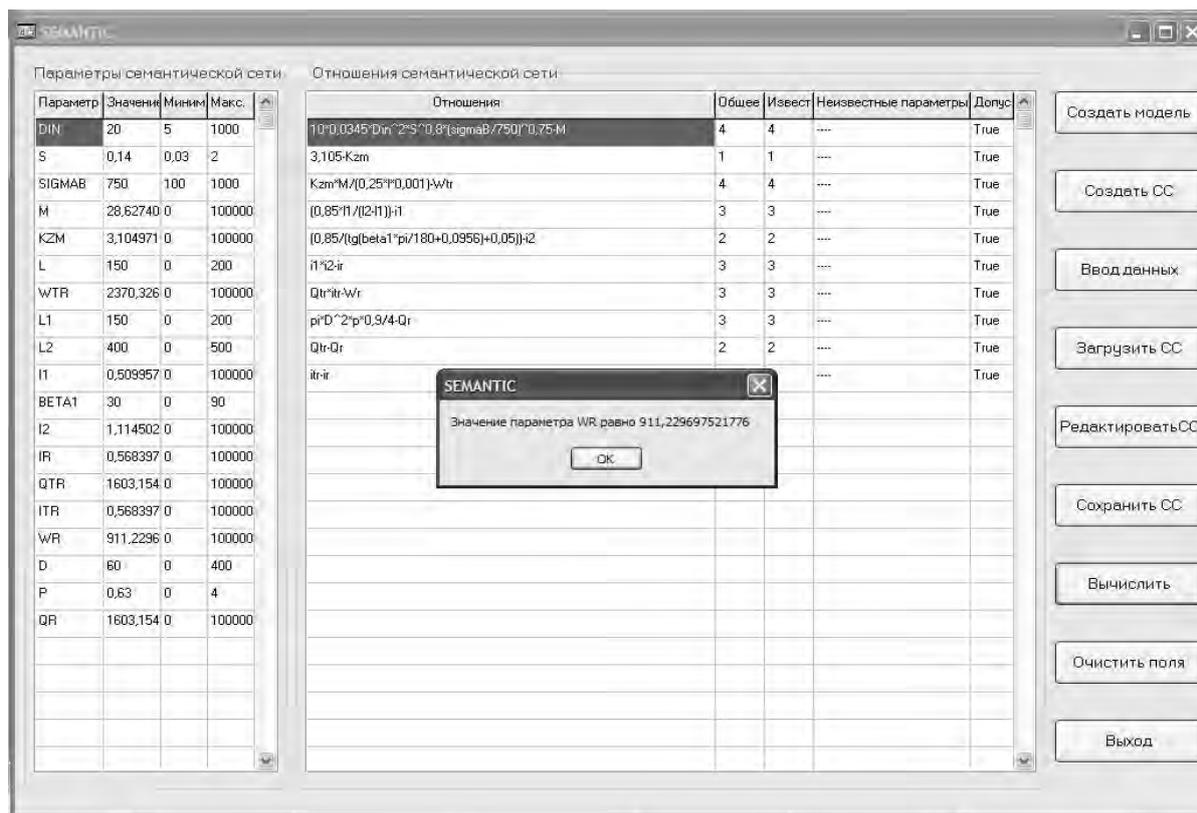


Рисунок 4.21 – Результат решения системой задачи по нахождению силы закрепления заготовки

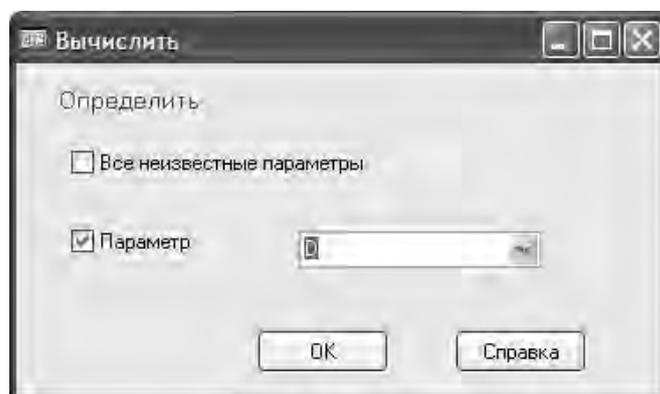


Рисунок 4.22 – Диалоговое окно выбора рассчитываемого параметра

В результате поиска решения системой был определен диаметр штока пневмоцилиндра проектируемого приспособления D , равный 96,77 мм, который округляется далее до величины 100 мм, выбранной из ряда стандартных значений диаметров пневмоцилиндров. При этом система последовательно вычислила все неизвестные параметры, от которых зависит данная величина (рисунок 4.23).

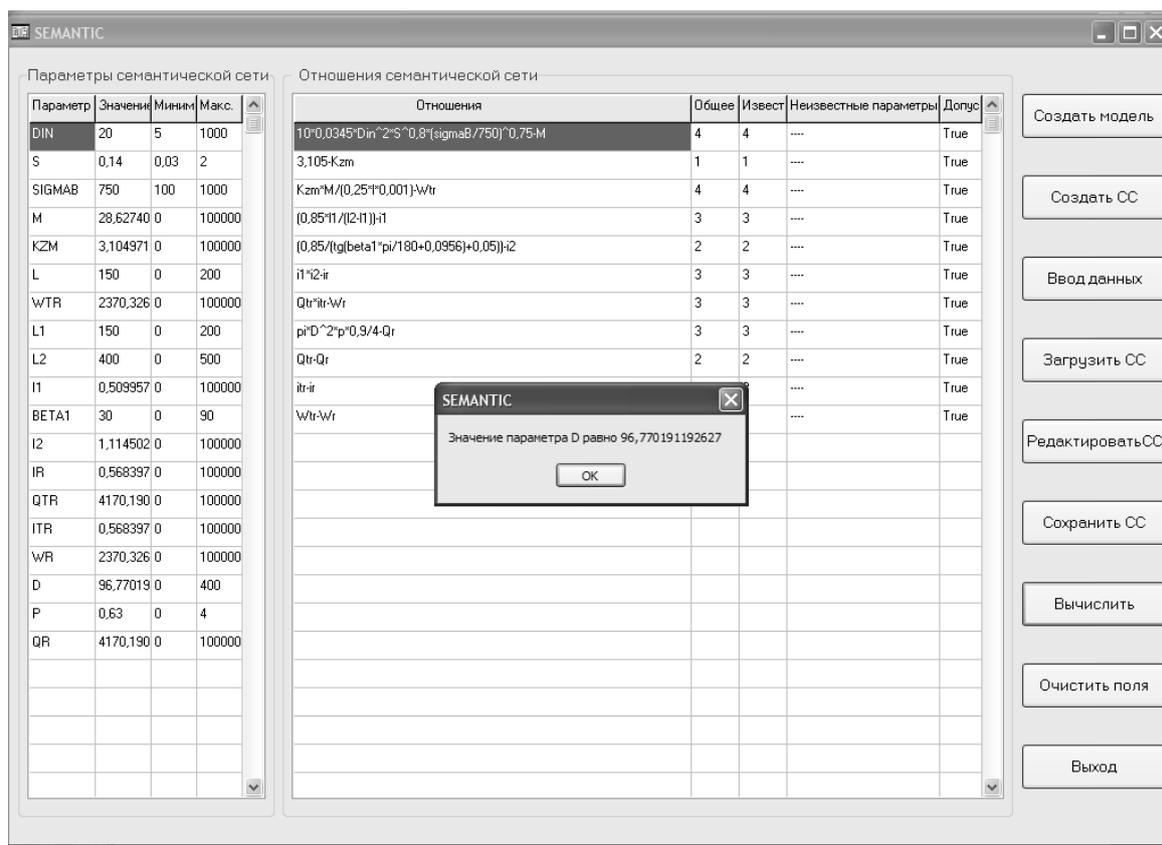


Рисунок 4.23 – Результат решения системой задачи по нахождению диаметра штока пневмоцилиндра

Далее представлены значения этих параметров: момент сил резания $M = 28,63$ Н/м; сила закрепления $W = 2370$ Н; передаточное отношение рычажного механизма $I_1 = 0,51$; передаточное отношение клинового механизма $I_2 = 1,11$; общее передаточное отношение $I = 0,57$; сила на штоке поршневого пневмоцилиндра $Q = 4170$ Н.

4.2.2.2 Расчет станочного приспособления на точность. Расчет станочных приспособлений на точность осуществляется модулем системы, предназначенным для нахождения допустимой погрешности изготовления приспособления [186].

Рассмотрим решение задачи, определяющей допустимую погрешность, связанную с износом элементов станочного приспособления, изображенного на рисунке 4.24.

Исходными данными поставленной задачи являются: величина допуска $TOTV = 0,52$ мм выполняемого на данной операции размера; допуск на изготовление приспособления $TPR = 0,15$ мм; экономическая точность обработки $F = 0,13$ мм; допуск размера базовой поверхности

заготовки $TDZ = 0,08$ мм; половина угла призмы $ALFA = 45^\circ$; параметр шероховатости поверхности заготовки $Rz = 40$ мкм; твердость материала заготовки по Бринеллю $HB = 190$; диаметр заготовки $D_z = 40$ мм; сила, действующая по нормали к опоре, $W = 1500$ Н; длина образующей, по которой происходит контакт заготовки с приспособлением, $LK = 100$ мм; максимальный диаметральный зазор между кондукторной втулкой и инструментом $SV = 0,155$ мм; расстояние от поверхности заготовки до кондукторной втулки $LZV = 10$ мм; длина кондукторной втулки $LVT = 35$ мм; длина обрабатываемого отверстия $LOTV = 20$ мм.

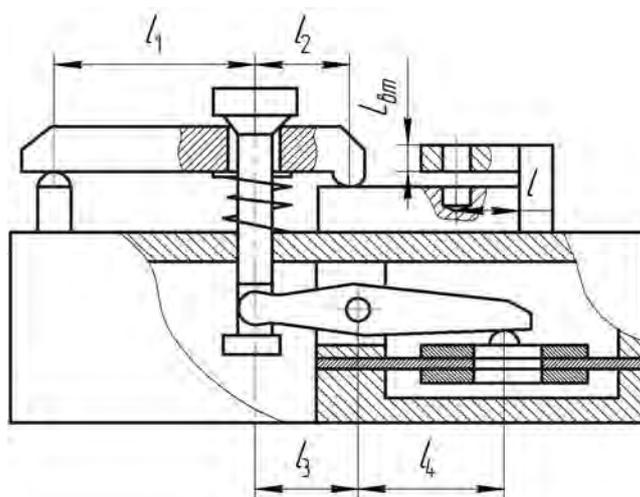


Рисунок 4.24 – Схема базирования заготовки

Для формирования математической модели проектируемой системы в виде функциональной семантической сети необходимо создать техническую модель, описывающую свойства и структуру станочного приспособления.

Для этого в диалоговом режиме указываются тип заготовки, способ ее базирования, принцип установки проектируемого станочного приспособления на станке, тип применяемой кондукторной плиты и др. (рисунок 4.25).

Выбора агрегатного состава проектируемой системы и ввода исходных данных (рисунок 4.26) достаточно для того, чтобы по ним автоматически была построена математическая модель системы в виде функциональной семантической сети, представленной на рисунке 4.27.

Далее указывают параметр, который необходимо рассчитать (в данном случае параметр $EIDOP$) (см. рисунок 4.27).

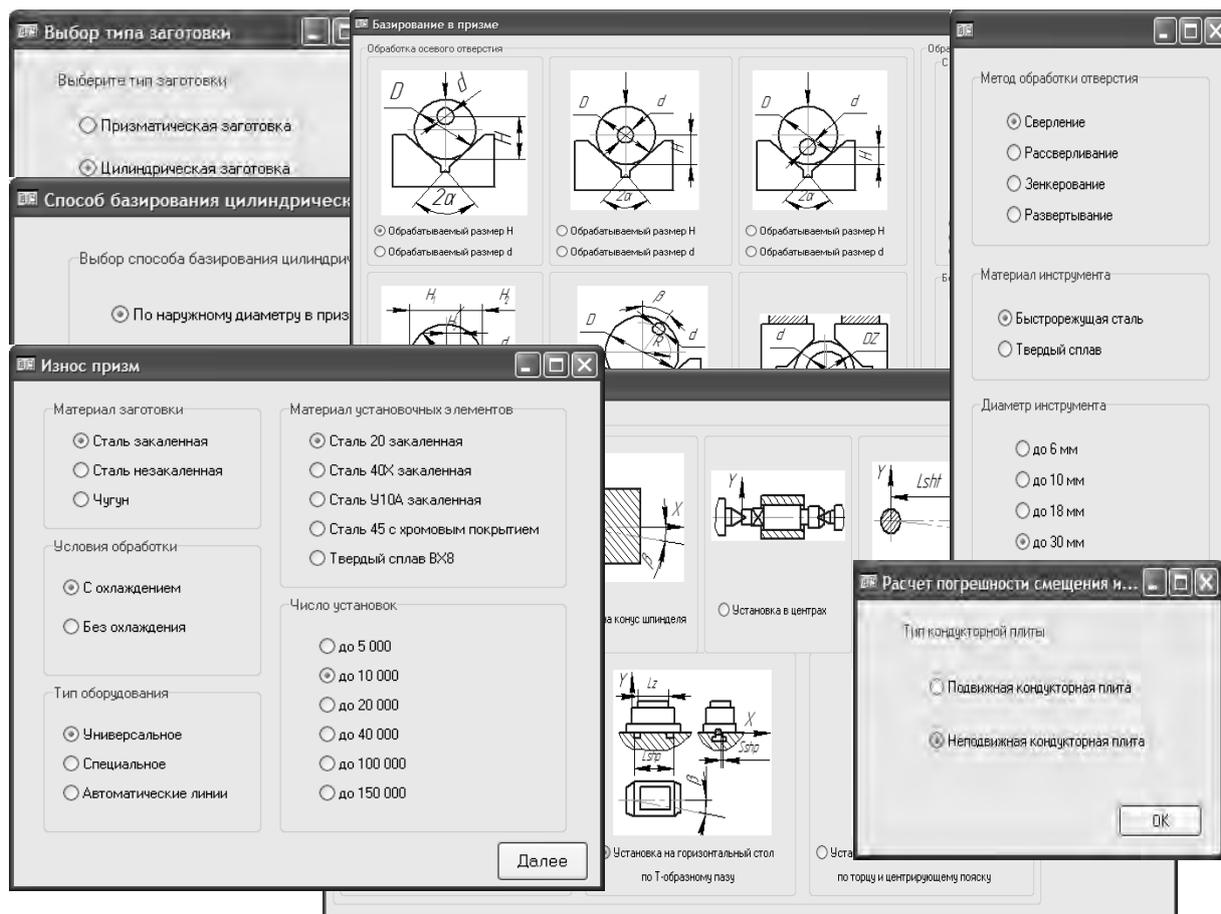


Рисунок 4.25 – Диалоговое окно выбора типа заготовки

Ввод исходных данных

Введите исходные данные

Параметр	Значение	Миним.	Макс.	
TDZ	0,08	0	0,1	допуск на диаметр закрепляемой поверхности заготовки, мм
ALFA	45	0	90	половина угла призмы
EB		0		погрешность базирования, мм
RZ	40	10	350	шероховатость базовой поверхности заготовки, мкм
HB	190	100	300	твердость обрабатываемого материала
DZ	40	10	100	диаметр закрепляемой поверхности заготовки, мм
W	1500	0	1000000	сила закрепления заготовки, Н
LK	100	5	500	длина контакта заготовки и приспособления, мм
EZ		0	10000000	погрешность закрепления, мм
N		0	10000000	число установок заготовок в приспособление
U		0	10000000	износ элементов приспособления, мм
EID		0	10000000	действительная погрешность износа элементов приспособления, мм
EY		0	10000000	погрешность установки приспособления, мм
SV	0,155	0,1	1	максимальный диаметральный зазор между кондукторной втулкой и инструментом, мм
LZV	10	0	40	расстояние от поверхности заготовки до кондукторной втулки, мм
LVT	35	1	100	длина кондукторной втулки, мм
LOTV	20	1	100	длина обрабатываемого отверстия, мм
EP		0	10000000	погрешность от перекоса или смещения инструмента, мм
TOTV	0,52	0,05	0,1	допуск на обработку отверстия, мм
EIDOP		0	10000000	допустимая погрешность износа элементов приспособления, мм
F	0,13	0,05	0,3	экономическая точность обработки, мм
TPR	0,15	0,05	0,6	допуск на изготовление приспособления, мм

OK

Рисунок 4.26 – Диалоговое окно ввода исходных данных

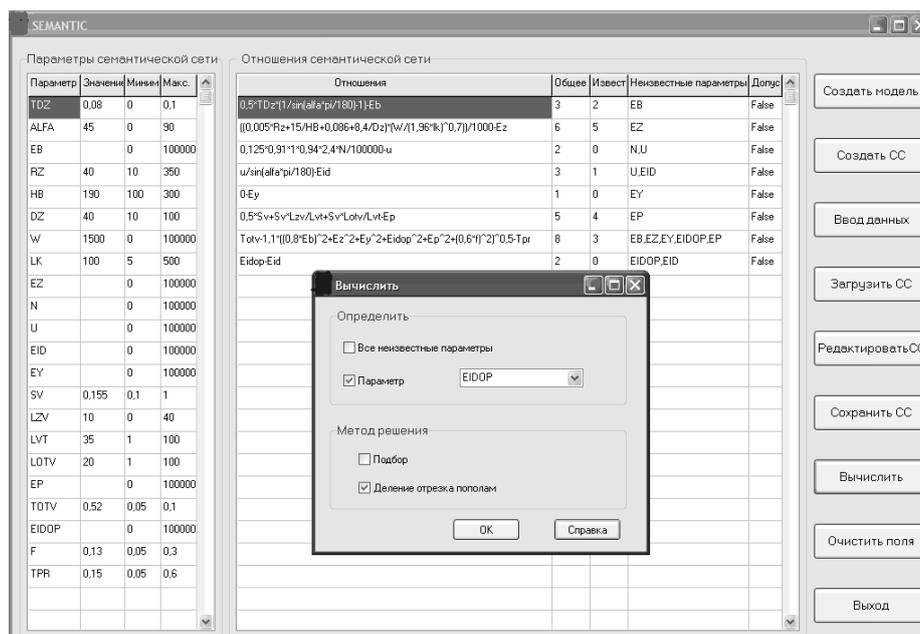


Рисунок 4.27 – Диалоговое окно выбора рассчитываемого параметра

В результате определения допустимой погрешности, обусловленной износом элементов станочного приспособления, система последовательно вычислила неизвестные параметры, от которых зависит данная величина (рисунок 4.28).

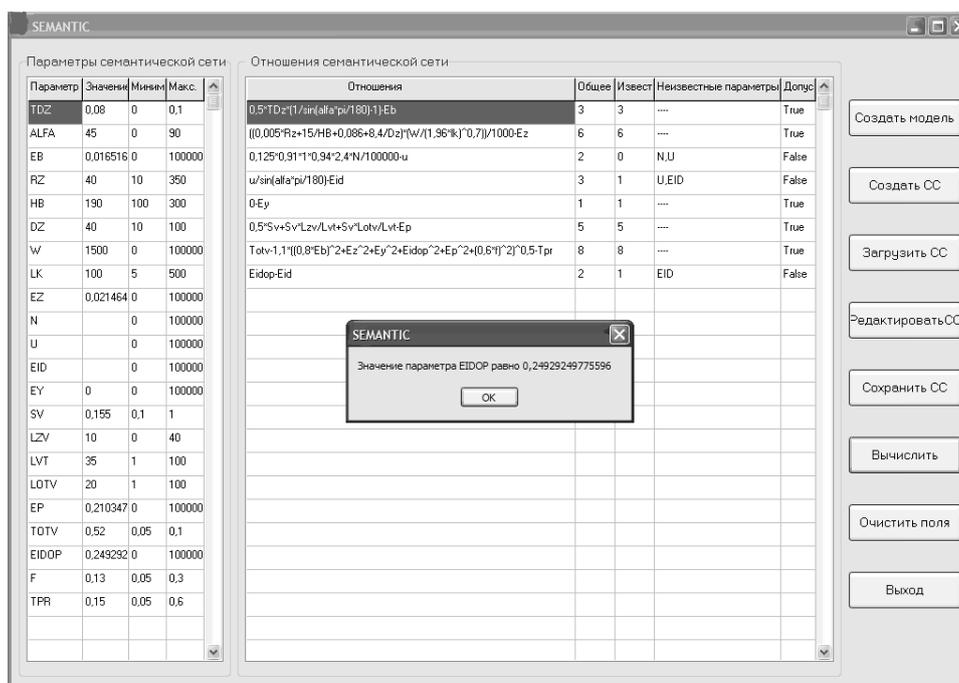


Рисунок 4.28 – Диалоговое окно системы с вычисленными параметрами

Значения этих параметров:

- погрешность базирования заготовки в приспособлении $EB = 0,0165$ мм;
- погрешность закрепления заготовки в приспособлении $EZ = 0,0215$ мм;
- погрешность установки приспособления $EY = 0$ мм;
- погрешность перекоса инструмента $EP = 0,210$ мм;
- допустимая погрешность износа элементов приспособления $EIDOP = 0,249$ мм.

4.2.2.3 Пример оптимизации структуры станочного приспособления. Моделирование средств технологической оснастки с помощью разработанной системы позволяет осуществлять поиск оптимальных вариантов конструктивных схем станочных приспособлений и получить наиболее высокие показатели функционирования выбранного приспособления.

Рассмотрим выбор оптимальной структуры приспособления, предназначенного для установки призматической заготовки при ее обработке концевым инструментом.

Поиск осуществляется на множестве структурных схем, примеры которых приведены на рисунке 4.29, среди приспособлений, предназначенных для полного базирования заготовок по трем плоскостям и закрепления силами, направленными по нормали к опорной плоскости. Заготовка закрепляется с помощью диафрагменного пневмоцилиндра 3. Усилие зажима передается на прихват 1 через рычажный механизм 2.

Исходными данными являются:

- диаметр инструмента $D_{in} = 15$ мм;
- подача $S = 0,14$ мм/об;
- предел прочности обрабатываемого материала $\sigma_B = 750$ МПа;
- размеры $l = 150$ мм, $l_1 = 250$ мм, $l_2 = 50$ мм, $l_3 = 200$ мм;
- для приспособления, изображенного на рисунке 4.29, а, $l_4 = 100$ мм;
- для приспособления, изображенного на рисунке 4.29, б, $l_4 = 350$ мм;
- давление в пневмоцилиндре $p = 0,63$ МПа;
- диаметр диафрагмы пневмоцилиндра $D = 60$ мм.

В качестве критерия выбора используется коэффициент усиления механизма.

Для выбора оптимальной структуры приспособления проектировщик с помощью пользовательского интерфейса вводит в систему описание технической модели и формулирует задачу, т. е. указывает вид обработки, тип заготовки, а также перечисляет агрегатный состав проектируемой

системы. На рисунке 4.30 показан пример выбора зажимных механизмов станочного приспособления, изображенного на рисунке 4.29, а.

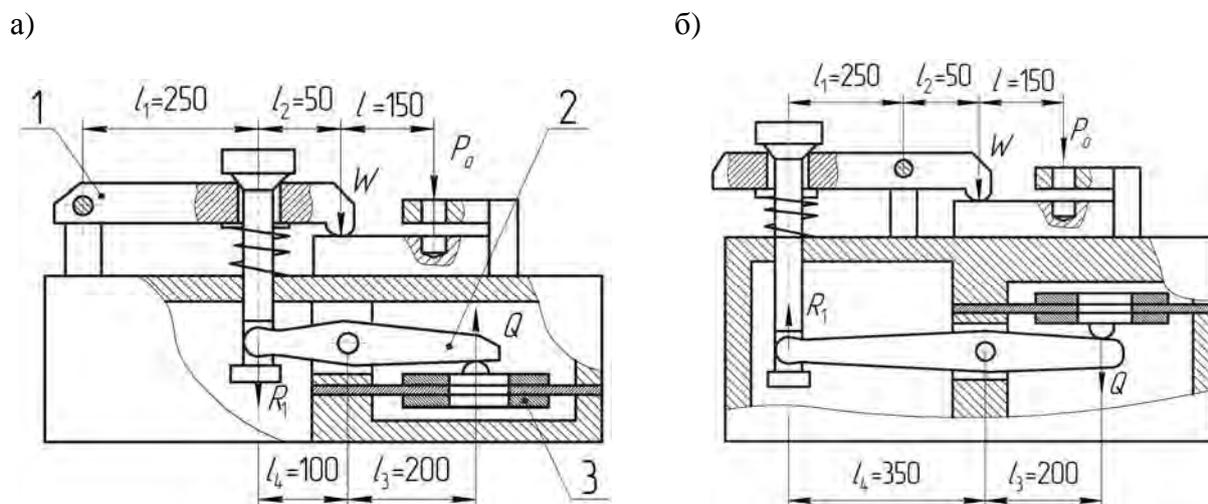


Рисунок 4.29 – Схемы проектируемых станочных приспособлений

В результате расчета системой были определены требуемый коэффициент усиления ($i_{rr} = 1,06$) и развиваемые коэффициенты усиления силовых механизмов i_r , рассматриваемых структурных схем, равные 1,2 (рисунок 4.31) и 2,06 (рисунок 4.32) соответственно.

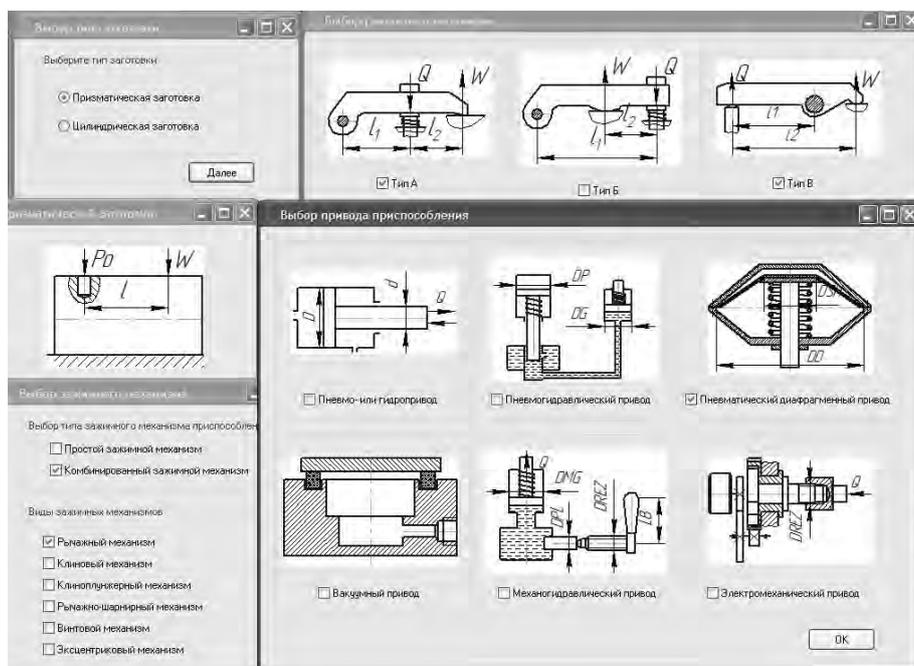


Рисунок 4.30 – Диалоговые окна выбора зажимных механизмов приспособления

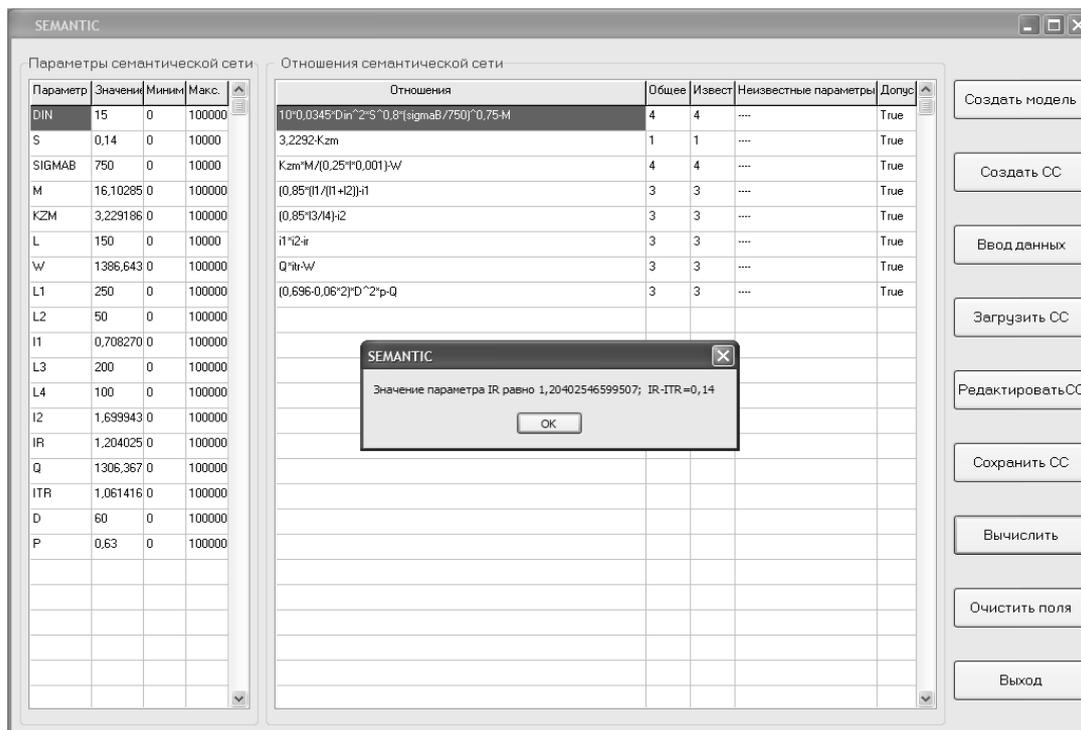


Рисунок 4.31 – Расчет приспособления, изображенного на рисунке 4.29, а

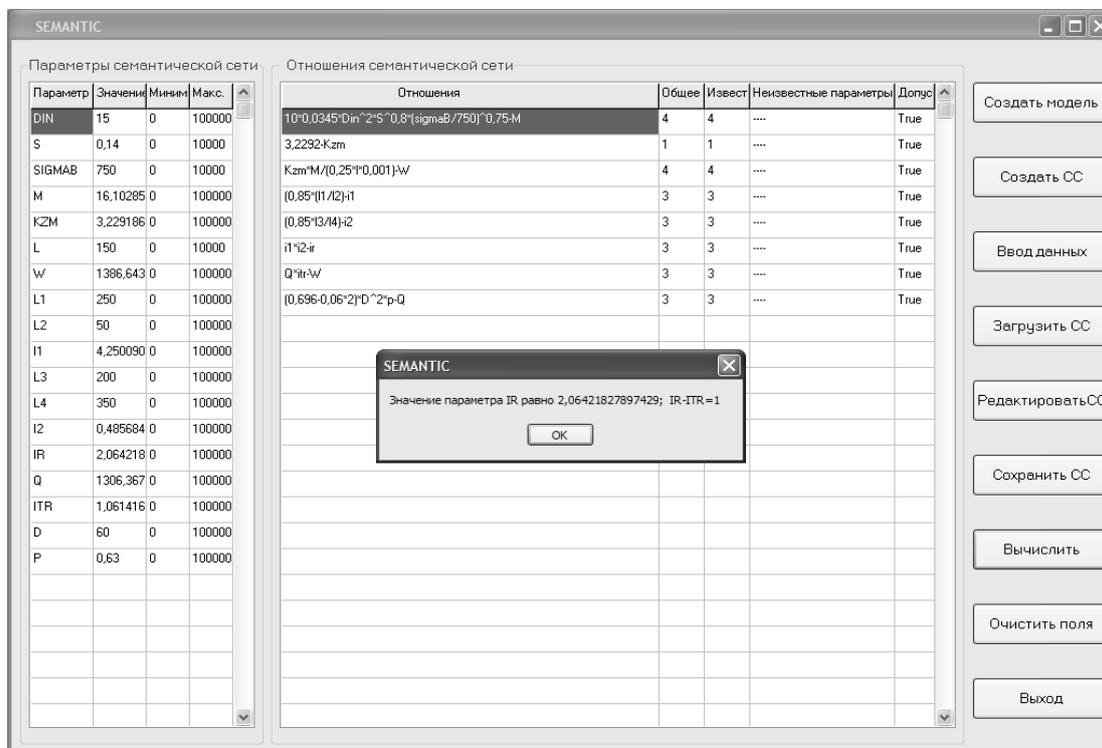


Рисунок 4.32 – Расчет приспособления, изображенного на рисунке 4.29, б

Для выбранных схем развиваемый коэффициент усиления больше требуемого, т. е. $i_r \geq i_{tr}$. При этом для первой схемы разница между коэффициентами ($i_r - i_{tr} = 0,14$) меньше, чем для второй ($i_r - i_{tr} = 1$). Таким образом, в качестве оптимальной конструктивной схемы приспособления системой рекомендуется схема, изображенная на рисунке 4.29, а.

Итак, система позволяет проектировщику заранее оценить и проанализировать последствия выбора каждого решения, исключить недопустимые варианты и выделить наиболее удачные, вследствие чего дает возможность повысить научную и инженерную обоснованность, снизить субъективный фактор принимаемых решений.

4.3 Экспериментальная апробация интеллектуальной системы

Для проверки корректности функционирования интеллектуальной системы SEMANTIC была проведена экспериментальная проверка ее работоспособности.

Целью экспериментальных исследований являлось сравнение фактических погрешностей обработки отверстий с погрешностями обработки, прогнозируемыми системой SEMANTIC на основе ранее описанной математической модели.

Обработка заготовок осуществлялась на радиально-сверлильном станке модели 2К522. В качестве заготовки использовалась стальная втулка с базированием по отверстию $\varnothing 50$ мм (рисунок 4.33).

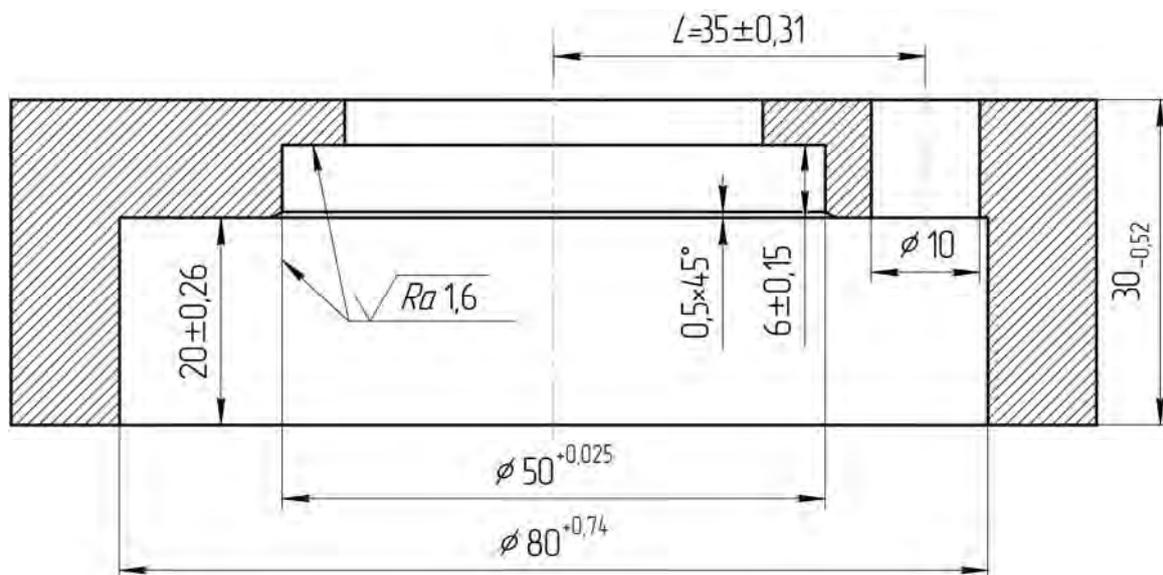


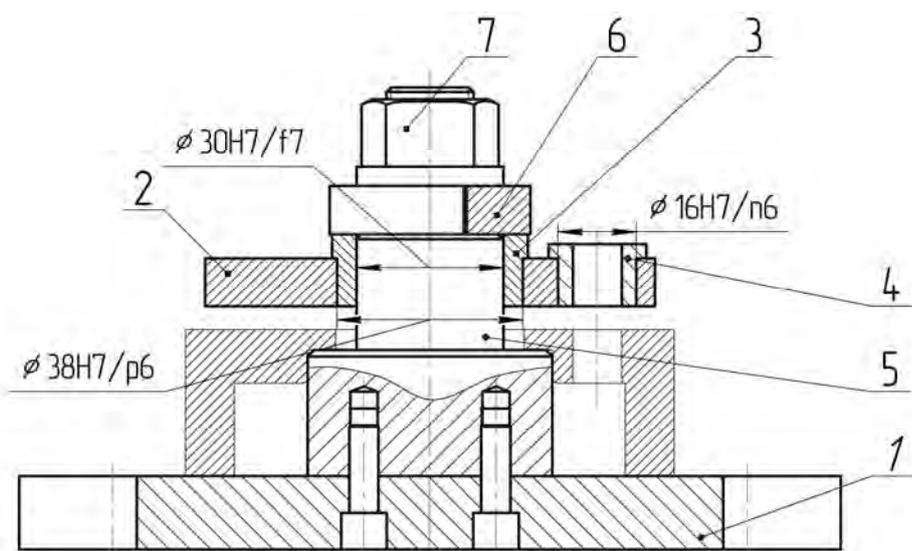
Рисунок 4.33 – Заготовка, используемая для экспериментальных исследований

В ходе эксперимента определялась точность расположения отверстия $\varnothing 10$ мм (точность выполнения размера $L = 35 \pm 0,31$ мм).

Для установки заготовки на станке применялся кондуктор (рисунок 4.34), конструктивная схема которого представлена на рисунке 4.35.



Рисунок 4.34 – Кондуктор для исследования процесса сверления отверстия $\varnothing 10$ мм



1 – основание; 2 – плита; 3 – втулка; 4 – кондукторная втулка; 5 – ось; 6 – быстрьюемая шайба; 7 – гайка

Рисунок 4.35 – Конструктивная схема кондуктора

В ходе исследований устанавливались зависимости смещений осей обрабатываемых отверстий от подачи и частоты вращения инструмента при сверлении отверстий диаметром 10 мм сверлом из быстрорежущей стали Р6М5.

Измерения смещений осей обрабатываемых отверстий проводились на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 фирмы «Карл Зейс» (Carl Zeiss) (рисунок 4.36).



Рисунок 4.36 – Измерение смещений осей обрабатываемых отверстий на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 фирмы «Карл Зейс» (Carl Zeiss)

Полученные результаты позволяют сравнить их с теоретическими погрешностями обработки, прогнозируемыми системой SEMANTIC.

При этом учитывались следующие параметры обработки: допуск на расположение оси отверстия $T_{обр} = 620$ мкм; допуск базовой поверхности заготовки $TD = 25$ мкм; твердость материала заготовки по Бринеллю 197 HB ; диаметр сверла $D_{in} = 10$ мм; погрешность станка $\varepsilon_{cm} = 22$ мкм; длина обработки $L = 10$ мм; стойкость инструмента $T = 25$ мин; длина кондукторной втулки $L_{vt} = 13$ мм; расстояние от поверхности заготовки до кондукторной втулки $L_{zv} = 5$ мм; максимальный зазор между шпонкой и Т-образным пазом станка $S_{shp} = 0,025$ мм; поле допуска на величину обратной конусности $T_k = 0,06$ мм; поле допуска на размер отверстия кондукторной втулки $\delta A = 0,019$ мм; поле допуска на размер

направляющей части инструмента $\delta B = 0,036$ мм; зазор в сопряжении «втулка–инструмент» $S_1 = 0,017$ мм.

Погрешность определялась системой с учетом компоновки приспособления на основе размерного анализа цепи B (рисунок 4.37).

$$B_{\Delta} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 - B_7, \quad (4.8)$$

где B_1 – эксцентricность наружной и внутренней поверхностей постоянной втулки;

B_2 – отклонение от соосности осей наружной поверхности постоянной втулки и отверстия в плите;

B_3 – межцентровое расстояние между осями отверстий в плите;

B_4 – эксцентricность наружной и внутренней поверхностей втулки;

B_5 – отклонение от соосности осей отверстия во втулке и пальца;

B_6 – эксцентricность пальца;

B_7 – расстояние от оси обрабатываемого отверстия до оси пальца.

Для расчета замыкающего звена размерной цепи (4.8) в результате прямых измерений на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 были получены действительные значения геометрических параметров деталей кондуктора, влияющих на точность обработки отверстий (рисунки 4.38 и 4.39):

– эксцентricность наружной и внутренней поверхностей постоянной втулки – 0,02 мм;

– межцентровое расстояние между осями отверстий в кондукторной плите – 34,997 мм;

– эксцентricность наружной и внутренней поверхностей втулки (рисунок 4.35, поз. 3) – 0,094 мм;

– эксцентricность пальца – 0,007 мм.

После прямых измерений размеров соответствующих деталей были вычислены зазоры между втулкой и пальцем (0,079 мм), а также втулкой и отверстием в кондукторной плите (0,086 мм).

Следует отметить, что замыкающее звено цепи B будет принимать различные значения в зависимости от сочетаний направлений указанных погрешностей в пределах имеющихся зазоров и погрешностей элементов приспособления.

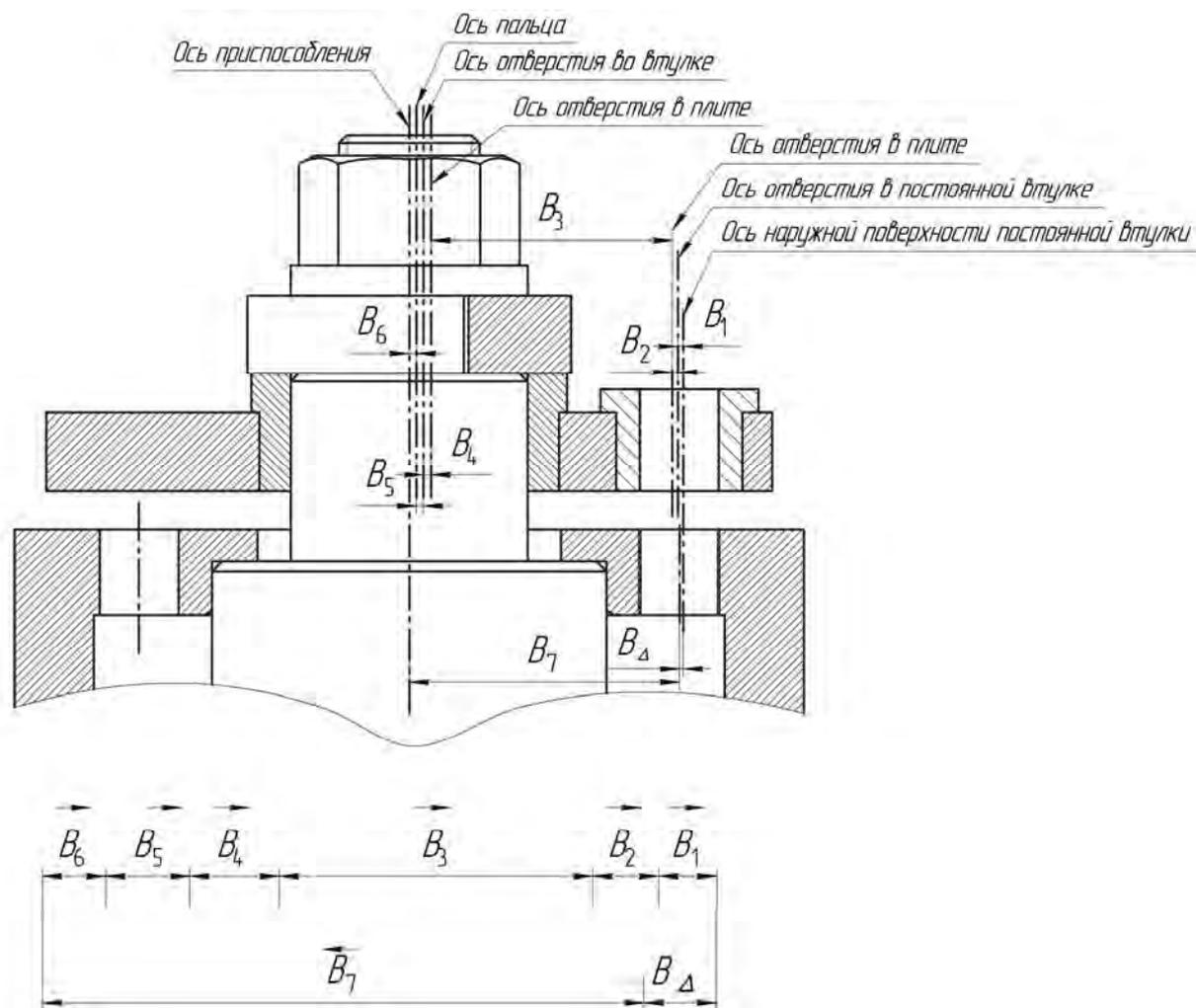


Рисунок 4.37 – Размерная цепь элементов приспособления

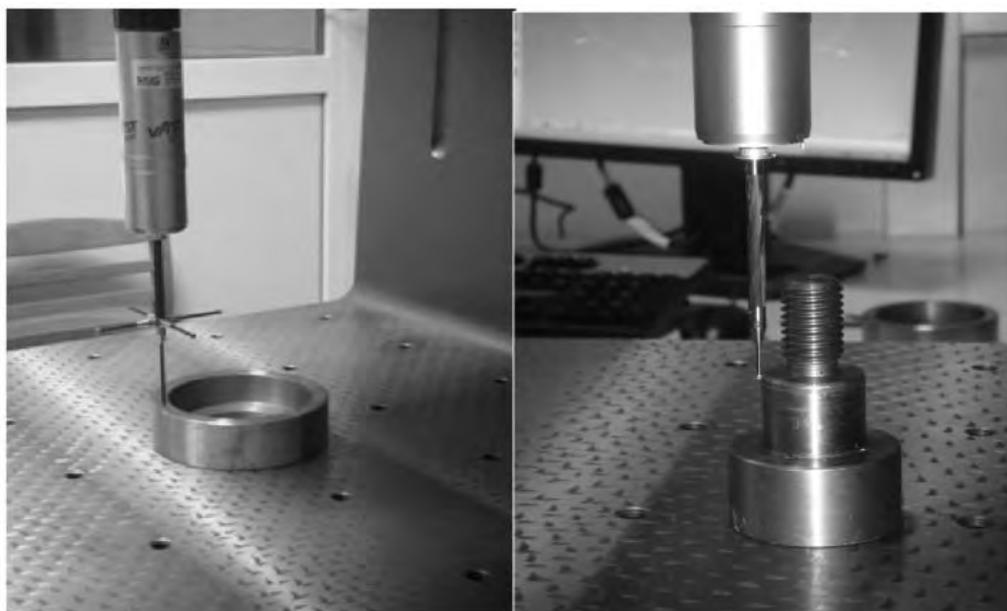


Рисунок 4.38 – Измерения геометрических параметров заготовки и оси кондуктора на координатно-измерительной машине

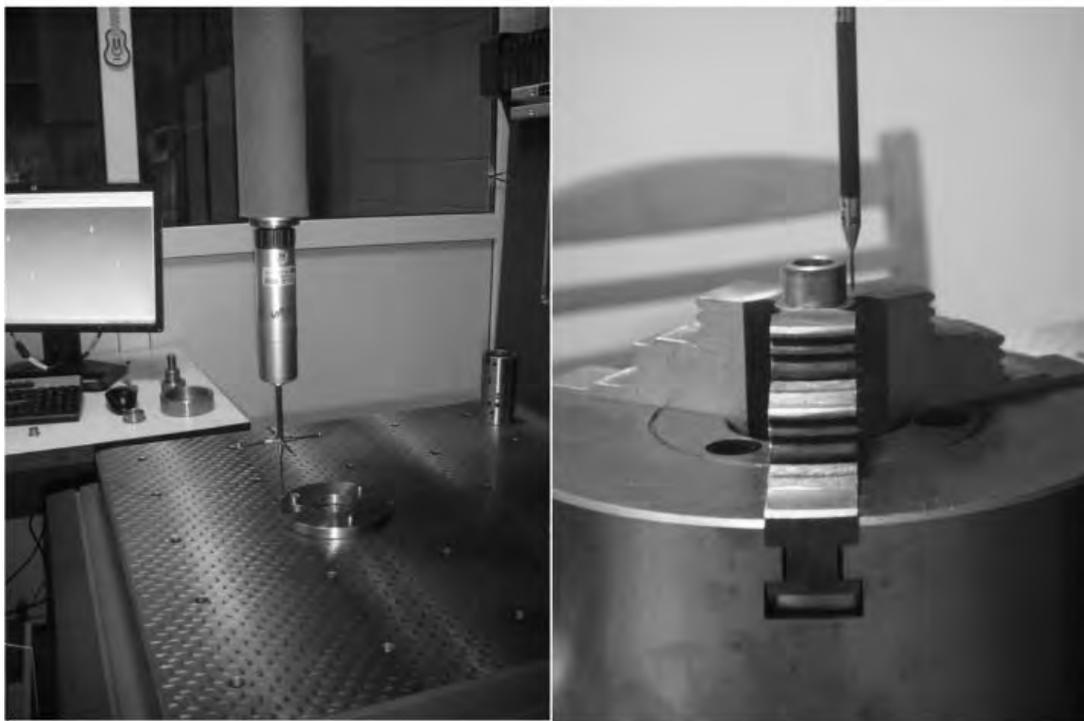


Рисунок 4.39 – Измерения геометрических параметров плиты и постоянной втулки кондуктора на координатно-измерительной машине

Наибольшее значение B_{Δ} будет принимать при сонаправленном проявлении погрешностей. В этом случае

$$B_{\Delta}^{\max} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 - B_7, \quad (4.9)$$

$$B_{\Delta}^{\max} = 0,02 + 0,086 + 34,997 + 0,094 + 0,079 + 0,007 - 35 = 0,283 \text{ мм.}$$

Наименьшее значение B_{Δ} будет принимать при взаимной компенсации погрешностей, что может быть характерно для обработки с наличием силовых воздействий на элементы приспособления. Например, перемещение элементов приспособления под действием сил резания в направлении выборки зазоров.

Опишем порядок определения соответствующей величины B_{Δ}^{\min} .

Указанные погрешности могут быть разделены на две группы. Первая связана с установкой постоянной кондукторной втулки и включает погрешности B_1 , B_2 ; вторая – погрешности, связанные с установкой кондукторной плиты (B_4 , B_5 , B_6).

Значение B_{Δ}^{\min} соответствует тому случаю, когда суммарные погрешности двух групп компенсируют друг друга.

При этом погрешности B_1 и B_2 должны быть разнонаправленными, в результате чего смещение оси внутренней поверхности кондукторной втулки, зависящее только от погрешностей первой группы, будет совпадать с направлением смещения B_2 .

Погрешности B_4 , B_5 также в этом случае компенсируют друг друга, при этом результирующее смещение оси отверстия в плите будет совпадать с направлением B_4 , т. к. $B_4 > B_5$.

Для компенсации погрешностей двух групп погрешность B_6 должна совпадать по направлению с B_2 , т. е.

$$B_{\Delta}^{\min} = -B_1 + B_2 + B_3 - B_4 + B_5 + B_6 - B_7, \quad (4.10)$$

$$B_{\Delta}^{\min} = -0,02 + 0,086 + 34,997 - 0,094 + 0,079 + 0,007 - 35 = 0,041 \text{ мм.}$$

Очевидно, величины B_{Δ}^{\min} и B_{Δ}^{\max} отличаются друг от друга в 7 раз. Следует также отметить, что хотя такие значения погрешностей и возможны, однако указанное суммирование по максимальным и минимальным значениям не соответствует случайному характеру сочетаний направлений элементарных погрешностей.

Для нахождения наиболее вероятной погрешности используют теоретико-вероятностный метод, согласно которому

$$B_{\Delta}^{sep} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + B_4^2 + B_5^2 + B_6^2}, \quad (4.11)$$

$$B_{\Delta}^{sep} = \sqrt{0,02^2 + 0,086^2 + 0,03^2 + 0,094^2 + 0,079^2 + 0,007^2} = 0,154 \text{ мм.}$$

Аналогичный анализ предельных и вероятных значений погрешностей может быть применен и для суммарной погрешности обработки.

Так, для определения суммарной погрешности расположения оси отверстия при указанных исходных данных с помощью семантической сети были найдены ее составляющие: погрешность базирования заготовки $\varepsilon_6 = 0,025$ мм; погрешность закрепления заготовки $\varepsilon_3 = 0$; погрешность обработки, обусловленная упругими смещениями оси концевого инструмента, $\Delta_y = 0,0003$ мм; погрешность обработки, обусловленная геометрическими смещениями оси концевого инструмента, $\Delta_r = 0,042$ мм; погрешность, вызываемая тепловыми деформациями технологической системы, $\Delta_T = 0,003$ мм; погрешность, связанная с неточностью, износом и деформацией станков, $\Delta_c = 0,022$ мм; погрешность, возникающая в резуль-

тате размерного износа режущих инструментов, $\Delta_u = 0$.

Очевидно, что значение суммарной погрешности обработки Δ_Σ в реальных условиях также может изменяться в широких пределах, при этом действительные значения погрешностей могут отличаться на порядок и более.

Наибольшее значение Δ_Σ будет принимать при максимальной погрешности приспособления и при сонаправленном проявлении ее составляющих.

$$\Delta_\Sigma^{\max} = \varepsilon_{\delta} + \varepsilon_3 + \varepsilon_n + \Delta_y + \Delta_{\Gamma} + \Delta_T + \Delta_c + \Delta_u, \quad (4.12)$$

$$\Delta_\Sigma^{\max} = 0,025 + 0 + 0,283 + 0,0003 + 0,042 + 0,003 + 0,022 + 0 = 0,3753 \text{ мм.}$$

Наименьшее значение Δ_Σ будет принимать при минимальной погрешности приспособления и при взаимной компенсации ее составляющих. Например, в случае, когда погрешность обработки, обусловленная геометрическими смещениями оси концевой инструмента, будет компенсироваться погрешностью приспособления. В результате получим

$$\Delta_\Sigma^{\min} = \varepsilon_{\delta} + \varepsilon_3 + \varepsilon_n - \Delta_y - \Delta_{\Gamma} + \Delta_T - \Delta_c + \Delta_u, \quad (4.13)$$

$$\Delta_\Sigma^{\min} = 0,025 + 0 - 0,041 - 0,0003 + 0,042 - 0,003 - 0,022 + 0 = 0,0007 \text{ мм.}$$

Как видно из представленных результатов, суммарные погрешности обработки Δ_Σ^{\max} и Δ_Σ^{\min} отличаются на несколько порядков и использование их значений на практике затруднительно в силу малой вероятности их возникновения.

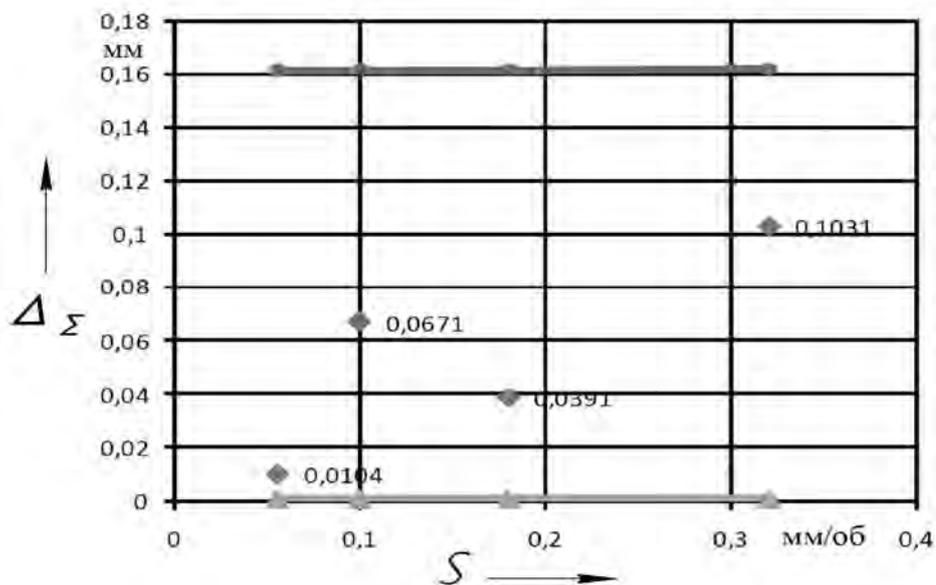
Данное обстоятельство указывает на то, что при оценке точности обработки следует учитывать вероятностный характер проявления составляющих суммарной погрешности, задающий ее верхнюю границу, как это и реализовано в описанной интеллектуальной системе.

Таким образом, при оценке суммарной погрешности будем использовать зависимость

$$\Delta_\Sigma^{вер} = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_n^2 + \Delta_y^2 + \Delta_{\Gamma}^2 + \Delta_T^2 + \Delta_c^2 + \Delta_u^2}. \quad (4.14)$$

Как правило, на практике действительные значения погрешностей обработки оказываются меньше и данной оценки.

С учетом проведенного анализа с помощью семантической сети были сопоставлены погрешности расположения осей отверстий, обрабатываемых при допустимых подачах и частотах вращения сверла, и соответствующие им экспериментальные значения (рисунки 4.40 и 4.41).



◆ – натурный эксперимент; —◆— – оценка суммарной погрешности интеллектуальной системой при вероятностной погрешности приспособления; —▲— – оценка минимальной суммарной погрешности интеллектуальной системой

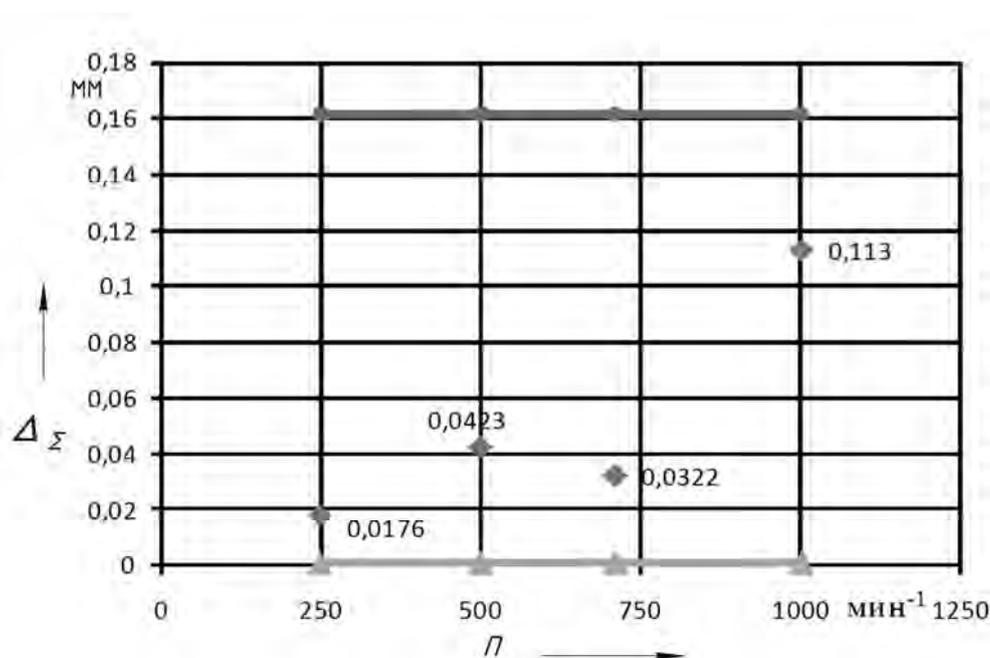
Рисунок 4.40 – График зависимости погрешности расположения осей обрабатываемых отверстий от подачи сверла при $n = 355 \text{ мин}^{-1}$

Из графиков видно, что данные, полученные системой, превышают значения экспериментальных погрешностей обработки, т. к. математическая модель суммарной погрешности обработки, используемая системой, учитывает вероятностные свойства составляющих.

Вид графика, построенного по результатам интеллектуальной системы, объясняется преимущественным влиянием на точность обработки погрешности приспособления и погрешности, обусловленной геометрическими смещениями оси концевого инструмента, которые не зависят от подачи и частоты вращения сверла.

Данное обстоятельство подтверждает тезис о том, что задача проектирования станочного приспособления должна рассматриваться как подзадача обеспечения точности обработки, решение которой должно учитывать действительное состояние технологического оборудования.

Представленные результаты подтверждают состоятельность базы знаний интеллектуальной системы SEMANTIC и корректность ее функционирования, а также возможность использования на этапе подготовки производства для прогнозирования погрешностей обработки отверстий концевым инструментом и проектирования технологической оснастки.



◆ – натурный эксперимент; ■ – оценка суммарной погрешности интеллектуальной системой при вероятностной погрешности приспособления; ▲ – оценка минимальной суммарной погрешности интеллектуальной системой

Рисунок 4.41 – График зависимости погрешности расположения осей обрабатываемых отверстий от частоты вращения шпинделя при $S = 0,32$ мм/об

4.4 Апробация интеллектуальной системы в производственных условиях

Интеллектуальная система для обеспечения точности механической обработки и проектирования станочных приспособлений на основе многофакторной оптимизации на семантических сетях прошла апробацию в условиях заводов РУП «Могилевский завод «Электродвигатель», ОАО «Могилевский завод «Строммашина», ОАО «Могилевхимволокно», ОАО «Могилевский ремонтный завод».

На основании описанной интеллектуальной системы в условиях ОАО «Могилевский ремонтный завод» был разработан технологический процесс изготовления картера маховика 245-1002312-Д (рисунок 4.42).

Для радиально-сверлильной операции техпроцесса изготовления картера маховика 245-1002312-Д был спроектирован кондуктор, представленный на рисунке 4.43.

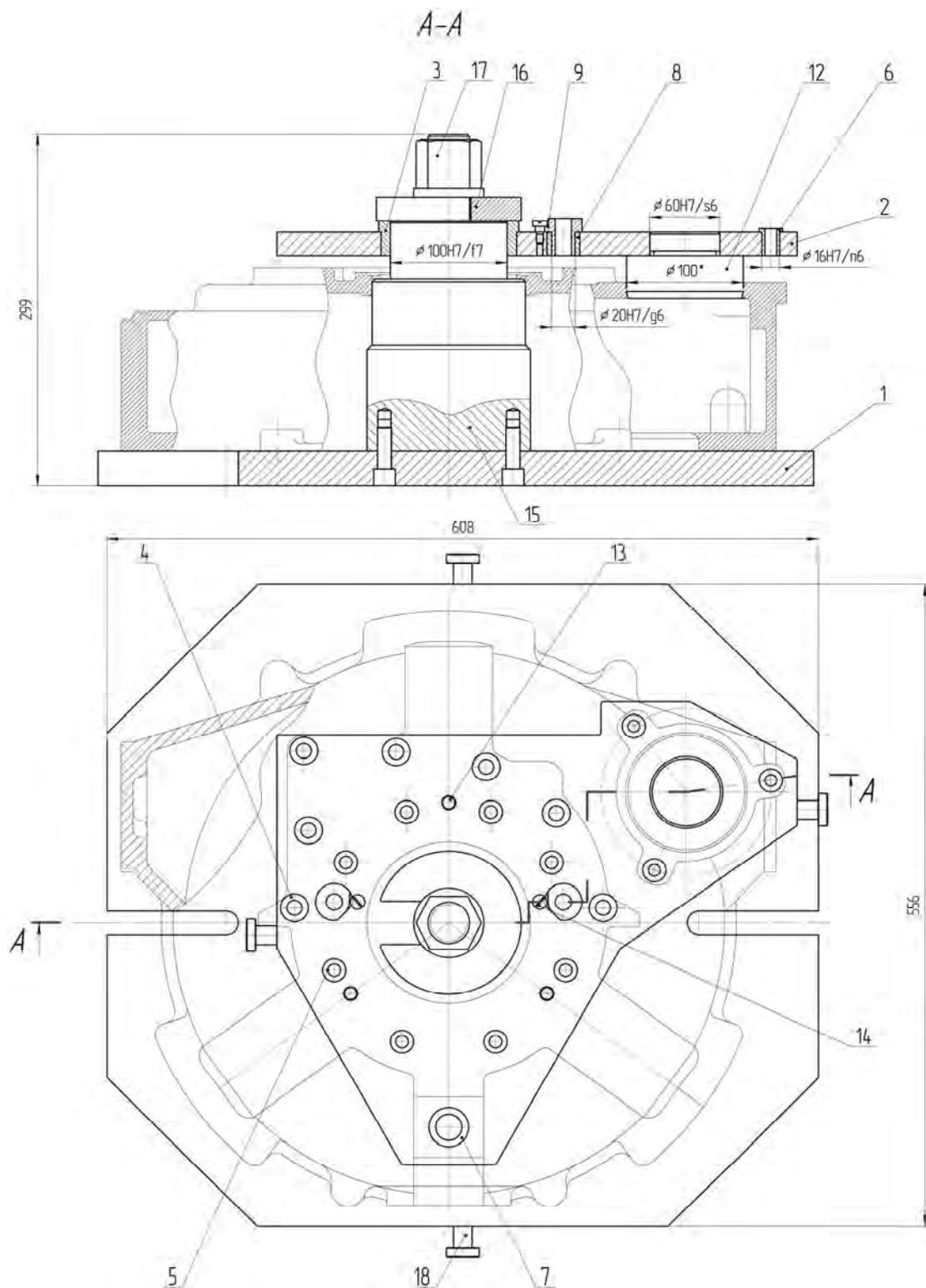


Рисунок 4.43 – Кондуктор

Кондуктор используется при сверлении отверстий и нарезании резьб в картере маховика 245-1002312-Д на радиально-сверлильном станке 2К52 и предназначен для базирования заготовок внутренней цилиндрической поверхностью, плоскостью (упор в торец), а также для их закрепления.

В приспособлении заготовка базируется внутренней цилиндрической поверхностью на жесткой оправке 15, торцом опирается на основание 1. Зажим заготовки осуществляется с помощью кондукторной плиты 2 путем затяжки гайки 17. Кондукторная плита 2 может поворачиваться вокруг оси пальца 12. Приспособление устанавливается на столе радиально-сверлильного станка своим основанием 1 и крепится к столу болтами.

После разработки конструкции приспособления с помощью интеллектуальной системы SEMANTIC была осуществлена многофакторная оптимизация параметров технологического процесса и применяемой технологической оснастки на функциональной семантической сети для обеспечения точности обработки картера маховика 245-1002312-Д на радиально-сверлильной операции. Оптимизация параметров технологического процесса и применяемой технологической оснастки системой SEMANTIC представлена в подразд. 4.2.

В результате анализа характеристик процесса обработки были предложены оптимальные режимы резания, а также конструкция станочного приспособления, позволяющая заметно снизить величины отдельных составляющих погрешности обработки. При этом время, затрачиваемое на расчет точности радиально-сверлильной операции изготовления картера маховика 245-1002312-Д с использованием компьютерной системы, составило около 45 мин, что в 8 раз меньше времени, затрачиваемого при проектировании традиционным способом.

Интеллектуальная система для обеспечения точности механической обработки и проектирования станочных приспособлений на основе многофакторной оптимизации на семантических сетях прошла апробацию в условиях завода ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель».

Для станины ГВИЕ 731.313.009 (рисунок 4.44) электродвигателя 4АС132А5 система использовалась для совершенствования станочного приспособления 7238-4580 СБ, предназначенного для фрезерования площадки под вывод электропроводки на вертикально-фрезерном станке 6М12ПБ (рисунок 4.45).

В приспособлении имеется основание 1, на котором с помощью четырех болтов 29 крепится стол 2 и с помощью шести винтов 28 конус 3.

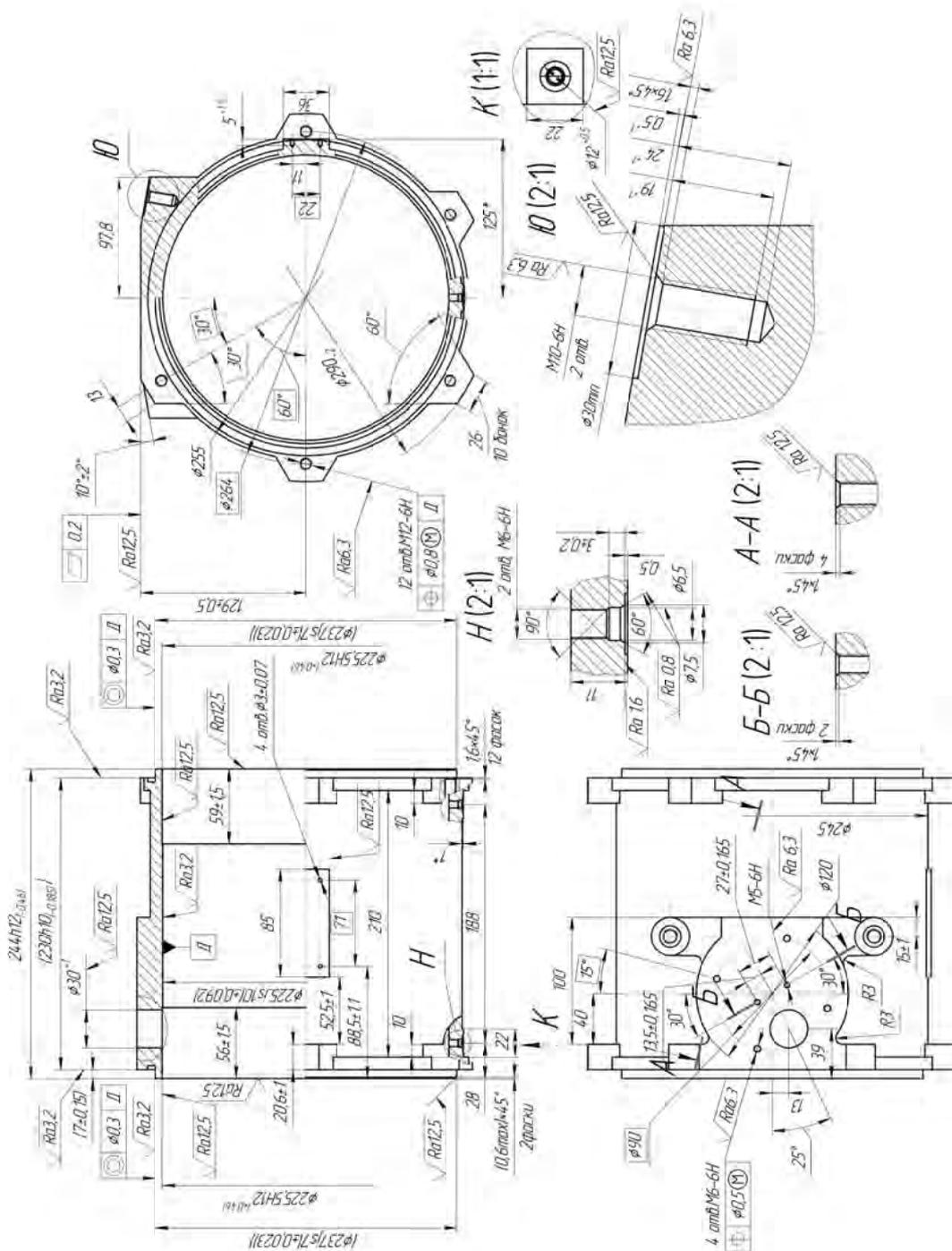


Рисунок 4.44 – Станина ГВИЕ 731.313.009

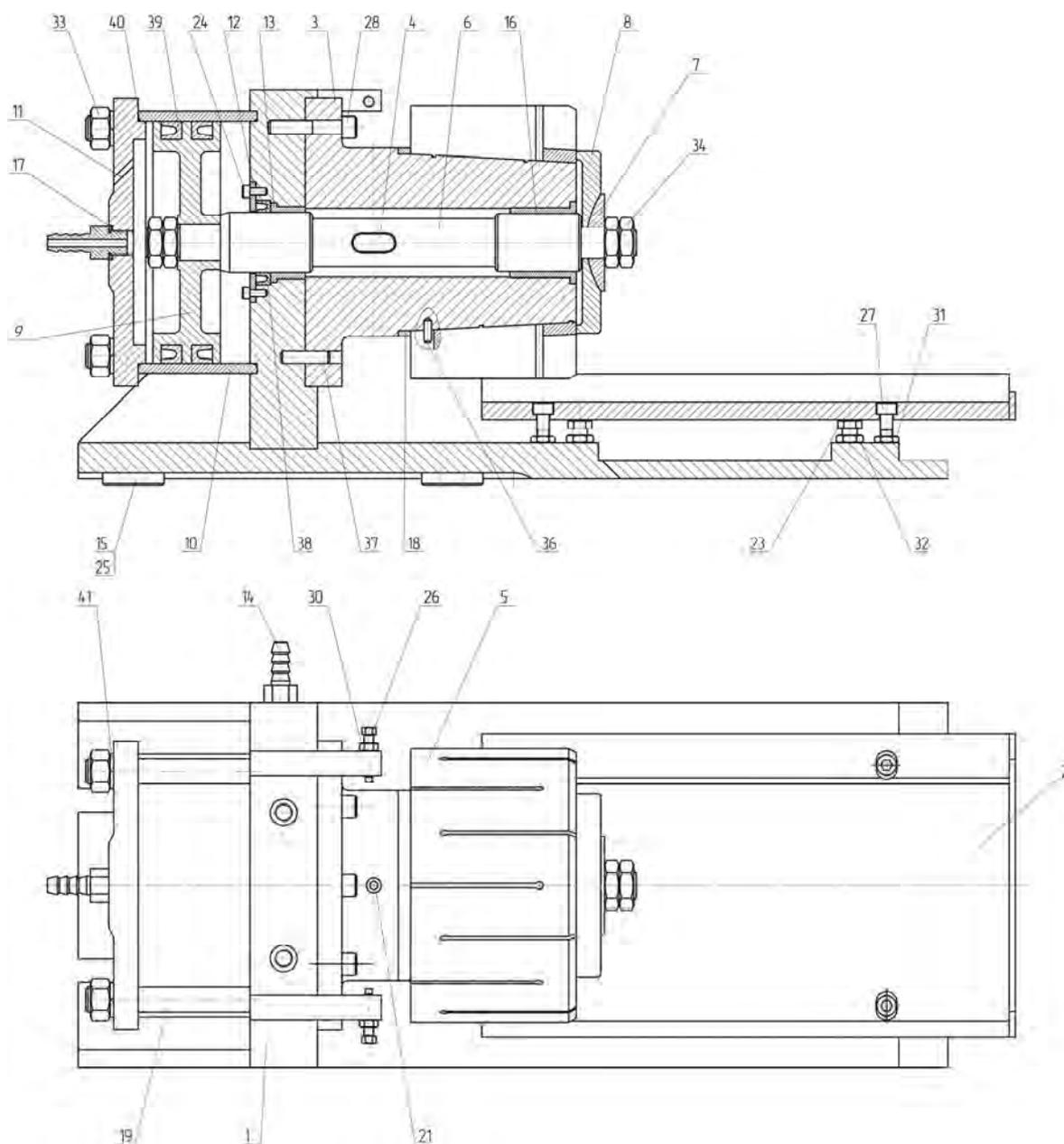


Рисунок 4.45 – Фрезерное приспособление 7238-4580 СБ

В основании 1 находится специальное отверстие для установки и закрепления в нем пневмоцилиндра, состоящего из тяги 6, поршня 9 диаметром 250 мм и цилиндра 10.

Приспособление устанавливается на столе вертикально-фрезерного станка 6М12ПБ своим основанием 1 с помощью шпонок 15 и крепится к столу рым-болтами.

Угловая ориентация заготовки относительно остальных элементов приспособления осуществляется с помощью винтов 26, закрепленных на планках основания 1.

В приспособлении заготовка устанавливается в цангу 5 и поддерживается столом 2. Закрепление заготовки осуществляется с помощью пневмоцилиндра, подключённого к магистрали сжатого воздуха с рабочим давлением 0,4 МПа, подаваемым через штуцер 14 в правую полость цилиндра. При этом перемещается тяга 6 с закреплённым на ней посредством упорной шайбы 7 и гайки 34 диском 8. Диск смещается вправо и, сжимая лепестки цанги, обеспечивает зажим заготовки. При обратном ходе поршня пневмоцилиндра диск возвращается в исходное положение тягой 6, смещаясь влево и производя отжим детали. Однако при такой конструкции приспособления требуется дополнительный конструктивный элемент в виде толкателя 4, с помощью которого осуществляют окончательный разжим заготовки.

В то же время данная конструкция приспособления не обеспечивает равномерного зажима заготовки, т. к. лепестки цанги сжимаются за счет действия на нее не радиальной силы, а силы, приложенной к ее торцу.

Следовательно, конструкция приспособления не является рациональной и требует усовершенствования за счет изменения механизма зажима-разжима заготовки.

С этой целью, учитывая особенности обрабатываемой заготовки, возможности её беспрепятственной установки, закрепления, обработки, открепления, снятия с приспособления, на базе интеллектуальной системы было спроектировано и рассчитано приспособление (рисунок 4.46).

В рассматриваемом приспособлении была изменена конструкция цанги, а также диск 8 заменен конусом 3, под действием которого происходит сжатие лепестков цанги. Это привело к тому, что в новой конструкции приспособления обеспечивается равномерный зажим заготовки, а также не требуются дополнительные конструктивные элементы, с помощью которых осуществляют окончательный ее разжим.

В данном случае закрепление заготовки осуществляется при подаче сжатого воздуха в левую полость пневмоцилиндра. При этом перемещается тяга 6 с закреплённым на ней конусом 3. Конус смещается влево и, разжимая лепестки цанги, обеспечивает центрирование и равномерный зажим заготовки. При обратном ходе поршня пневмоцилиндра конус возвращается в исходное положение тягой 6, смещаясь вправо и производя отжим детали.

После разработки конструкции фрезерного приспособления для установки станины ГВИЕ 731 313.009 с помощью системы SEMANTIC определили параметры пневматического привода, при котором гарантируется надёжное закрепление заготовки.

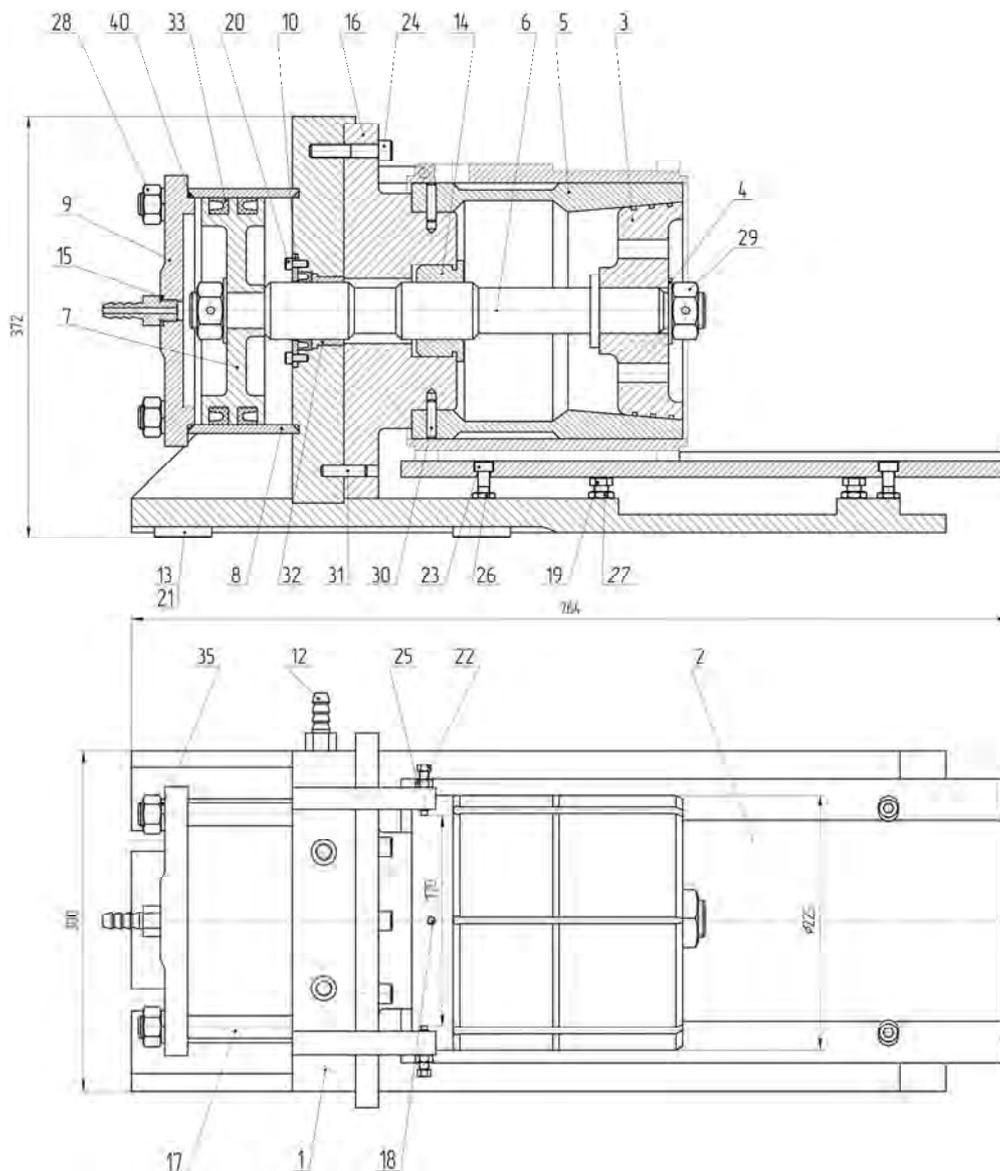


Рисунок 4.46 – Спроектированное фрезерное приспособление

Для формирования функциональной семантической сети, на основе которой осуществляется расчет приспособления, были выбраны агрегатный состав станочного приспособления и характеристики процесса обработки (рисунок 4.47).

При этом учитывались следующие исходные данные: подача инструмента $S = 0,7$ мм/об; частота вращения инструмента $NVR = 280$ мин⁻¹; припуск на механическую обработку $T = 5$ мм; число зубьев фрезы $ZIN = 10$; ширина фрезерования $BF = 100$ мм; диаметр инструмента $DIN = 100$ мм; число лепестков цанговой оправки $Z = 6$; твердость обрабатываемого материала $HB = 241$; половина угла при вершине конической поверхности цанги $BETA = 5^\circ$; давление в цилиндре пневматического

привода $P = 0,4$ МПа; диаметр посадочного отверстия заготовки $DBZ = 225$ мм; зазор между заготовкой и цангой $DELTA_1 = 0,18$ мм; толщина стенки лепестка $HL = 10$ мм; наружный диаметр лепестка цанги в месте заделки $DL = 205$ мм; расстояние от оси заготовки до точки приложения силы резания $R_1 = 129$ мм; длина лепестка цанги от места заделки до середины конуса $LLEP = 150$ мм (рисунок 4.48).

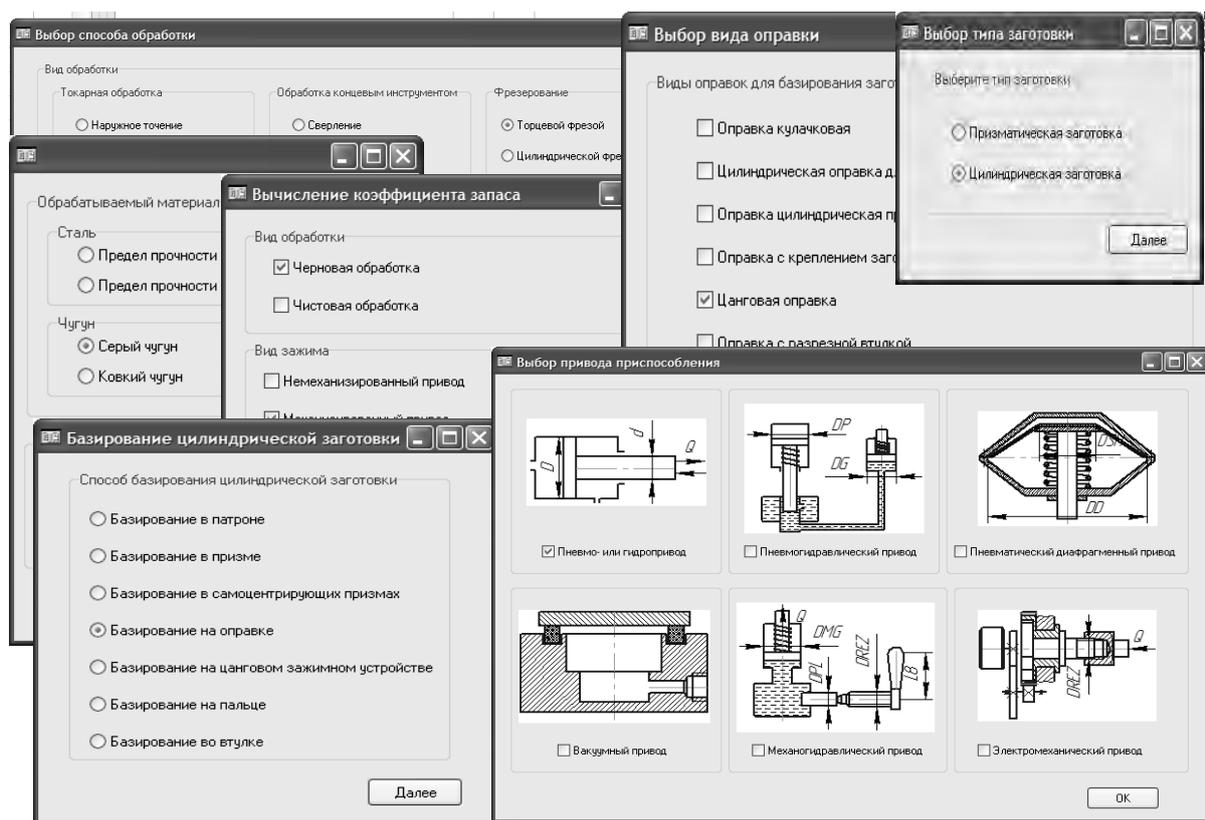


Рисунок 4.47 – Диалоговые окна выбора исходных данных

В результате поиска решения системой был определен диаметр штока пневмоцилиндра проектируемого приспособления D , равный 200 мм, выбранный из ряда стандартных значений диаметров пневмоцилиндров. При этом система последовательно вычислила все неизвестные параметры, от которых зависит данная величина (рисунок 4.49).

Расчет показал, что надёжное закрепление заготовки в рассматриваемом приспособлении обеспечивается при диаметре поршня пневматического привода, равном 200 мм, что оказалось экономически целесообразнее, чем использование в заводском приспособлении поршня диаметром 250 мм. При этом масса приспособления уменьшилась примерно

на 10 %, а время, затрачиваемое на проектирование, составило 50 мин, что в 9 раз меньше, чем при проектировании традиционным путем.

Введите исходные данные

Параметр	Значение	Миним.	Макс.	
T	5	1	10	припуск на обработку, мм
S	0,7	0,1	1	подача инструмента, мм/об
ZIN	10	2	10	число зубьев фрезы
BF	100	10	200	ширина фрезерования, мм
Z	6	2	12	число кулачков патрона или число лепестков цангов
DIN	100	10	200	диаметр инструмента, мм
NVR	280	120	1000	частота вращения инструмента, об/мин
HB	241	180	260	твердость обрабатываемого материала
FZ		0	10000000	тангенциальная сила резания, Н
PH		0	10000000	
PV		0	10000000	давление воздуха в пневмоцилиндре, МПа
KZP		0	10000000	коэффициент запаса по силе резания
R1	129	0	10000	
W2		0	10000000	требуемая сила зажима заготовки, Н
DBZ	225	50	300	диаметр базового отверстия заготовки, мм
LLEP	150	0	10000000	вылет лепестка цанги от места заделки до середины
HL	10	5	20	толщина лепестка цанги, мм
DELTA1	0,18	0,005	0,2	зазор между цангой и заготовкой, мм
DL	205	60	100	наружный диаметр лепестка, мм
W3		0	10000000	сила, сжатия лепестков цанги до соприкосновения и
WTR		0	10000000	требуемая сила закрепления заготовки, Н
WR		0	10000000	создаваемая приспособлением сила закрепления за

OK

Рисунок 4.48 – Диалоговое окно ввода исходных данных

Кроме этого, интеллектуальная система была применена на ОАО «Могилевский завод «Строммашина» для проектирования станочного приспособления, предназначенного для установки вала У2260.30.01.006 тележки ходовой ведущей У2260.30-2.00.000В крана башенного КБМ-401П на вертикально-сверлильном станке.

Использование спроектированного приспособления повысило качество изготовления вала У2260.30.01.006 за счет повышения его точности в результате оценки интеллектуальной системой погрешностей обработки. При этом процент брака до применения спроектированного приспособления и после уменьшился на 0,17 %.

Кроме этого, масса приспособления, спроектированного компьютерной системой, составила 12,3 кг, что на 3,2 кг меньше массы приспособления, спроектированного традиционным путем.

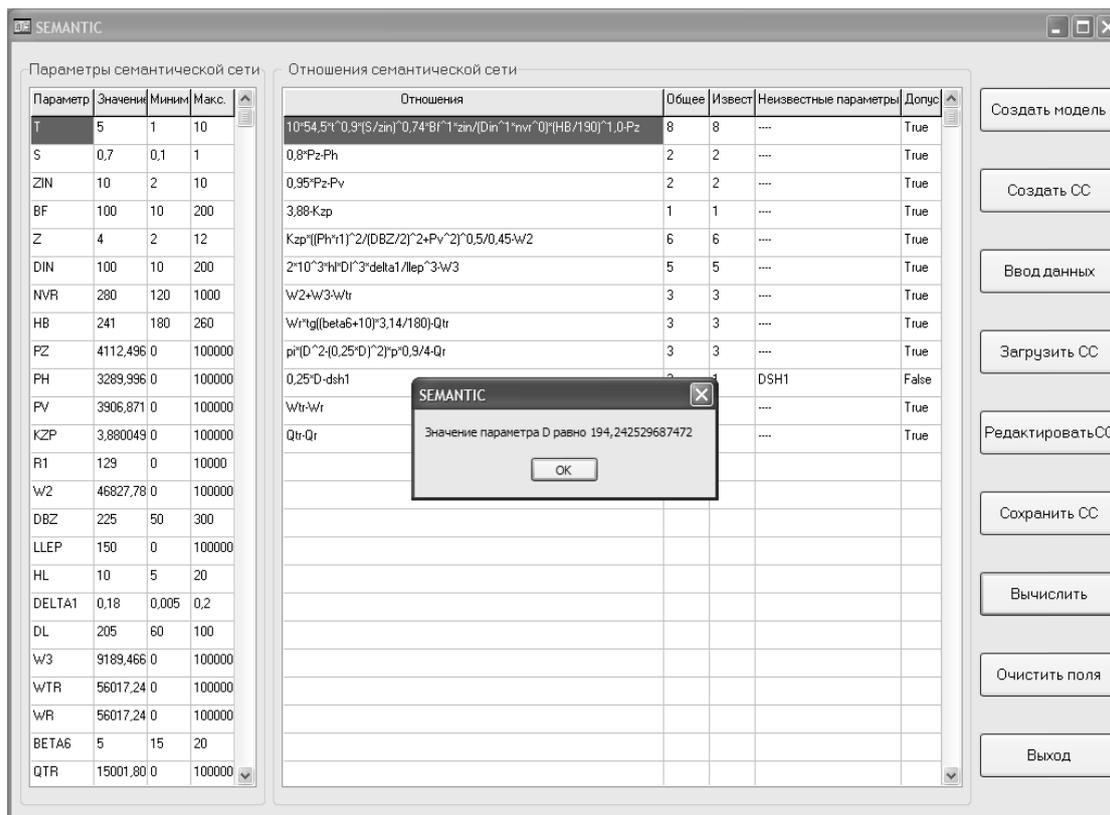


Рисунок 4.49 – Результат решения системой задачи по нахождению диаметра штока пневмоцилиндра

При тарифном коэффициенте конструктора 2,84, ставке первого разряда 0,25 млн белорус. р. и времени, затрачиваемом на расчет одного проектируемого приспособления традиционным способом, 8 ч, а с использованием компьютерной системы 0,83 ч соответствующий эффект составит 0,355 млн белорус. р. в ценах 2009 г.

Техническим управлением ОАО «Могилевхимволокно» также была протестирована интеллектуальная система на базе функциональных семантических сетей для управления точностью обработки деталей машин и проектирования станочных приспособлений. В результате этого была подтверждена возможность обеспечения точности обработки деталей машин и проектирования компоновки сложных технологических приспособлений, а также расчета зажимных элементов технологической оснастки на основе многофакторной оптимизации на семантических сетях, осуществляемой разработанной интеллектуальной системой.

Список литературы

1 **Brachman, R. J.** On the epistemological status of semantic networks / R. J. Brachman // *Associative Networks: Representation and Use of Knowledge by Computers* / N. V. Findler [et al.]. – New York : Academic Press, 1979. – P. 180–193.

2 Искусственный интеллект : применение в интегрированных производственных системах / Под ред. Э. Кьюсиака. – М. : Машиностроение, 1991. – 544 с.

3 **Гаврилова, Т. А.** Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб. : Питер, 2000. – 384 с.

4 **Поспелов, Г. С.** Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г. С. Поспелов. – М. : Наука, 1988. – 280 с.

5 **Schank, R. C.** Scripts, Plans, Goals and Understanding / R. C. Schank, R. Abelson. – Hillsdale, NJ : Erlbaum, 1977. – 172 p.

6 **Шенк, Р.** Обработка концептуальной информации : пер. с англ. / Р. Шенк. – М. : Энергия, 1980.

7 **Миронова, М. Н.** Оптимизация параметров станочных приспособлений на основе использования семантических сетей / М. Н. Миронова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 113–120.

8 **Пашкевич, В. М.** Использование семантических сетей для расчета станочных приспособлений / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // *Vedecky prumysl evropskeho kontinentu – 2007 : materialy IV mezinarodni vedecko – prakticka konference, Dil 14. Technicke vedy : Praha, 1–15 prosincu 2007 r. / redkol. : Zdenek Cernak.* – Praha : Publishing House «Education and Science» s. r. o, 2007. – S. 43–44.

9 **Пашкевич, В. М.** Проблема возникновения стыков при проектировании станочных приспособлений на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Сб. науч. тр. Междунар. Балт. ассоц. машиностроителей / КГТУ ; под ред. В. Н. Тилипалова. – Калининград, 2009. – С. 98–103.

10 **Пашкевич, В. М.** Повышение точности проектирования станочных приспособлений на основе устранения заикливания семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Сб. науч. тр. Междунар. Балт. ассоц. машиностроителей / КГТУ ; под ред. В. Н. Тилипалова. – Калининград, 2009. – С. 104–110.

11 **Пашкевич, В. М.** Многофакторная оптимизация параметров обработки на основе использования семантических сетей / В. М. Паш-

кевич, М. Н. Миронова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 51–61.

12 **Балакшин, Б. С.** Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1966. – 248 с.

13 **Бородачев, Н. А.** Основные вопросы теории точности производства / Н. А. Бородачев. – М. : АН СССР, 1950. – 139 с.

14 **Соколовский, А. П.** Научные основы технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – Л. : Машгиз, 1955. – 147 с.

15 **Яхин, А. Б.** Проектирование технологических процессов механической обработки / А. Б. Яхин. – М. : Оборонгиз, 1946. – 236 с.

16 Основные вопросы точности, взаимозаменяемости и технических измерений в машиностроении / А. Н. Гаврилова [и др.] ; под ред. А. Н. Гавриловой. – М. : Машгиз, 1958. – 120 с.

17 **Корсаков, В. С.** Точность механической обработки / В. С. Корсаков. – М. : Машгиз, 1961. – 288 с.

18 **Маталин, А. А.** Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1970. – 320 с.

19 **Колев, К. С.** Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев. – М. : Машиностроение, 1968. – 130 с.

20 Технология машиностроения : учебник для вузов : в 2 т. / В. М. Бурцев [и др.] ; под ред. Г. Н. Мельникова. – 2-е изд., стереотип. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – Т. 1 : Основы технологии машиностроения. – 564 с.

21 Технологическая оснастка : учебник для студентов машиностроит. специальностей вузов / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 320 с.

22 **Микитянский, В. В.** Точность приспособлений в машиностроении / В. В. Микитянский. – М. : Машиностроение, 1984. – 128 с.

23 **Gawlik, J.** Wspomagana komputerowo metoda zewnętrznej optymalizacji parametrow skrawania / J. Gawlik, P. Matgorzata // Pr-nauk. Inst. technol. bud. masz. PWrack. – 1988. – № 36. – S. 152–156.

24 **Azouzi, R.** On-line optimization of the turning process using an inverse process neurocontroller / R. Azouzi, M. Guillof // Trans. ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. – 1998. – № 1. – S. 101–108.

25 **Владиевский, А. П.** Автоматические линии в машиностроении / А. П. Владиевский. – М. : Машгиз, 1958. – 235 с.

26 **Демьянюк, Ф. С.** Технологические основы поточного и автоматизированного производства / Ф. С. Демьянюк. – М. : Машгиз, 1958. – 312 с.

27 **Прокопович, А. К.** Вопросы точности механической обработки на автоматических линиях / А. К. Прокопович // Вестн. машиностроения. – 1955. – № 4. – С. 20–21.

28 Самоподнастраивающиеся станки / Б. С. Балакшин [и др.] ; под ред. Б. С. Балакшина. – М. : Машиностроение, 1965. – 468 с.

29 **Богуславский, Л. А.** Об одном алгоритме управления точностью механической обработки / Л. А. Богуславский // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – № 2. – С. 143–147.

30 **Трищ, Р. М.** Стабилизация точности обработки / Р. М. Трищ, А. С. Гордеев // Вестн. Харьк. политехн. ун-та. – 1999. – № 45. – С. 44–45.

31 **Бурдун, Г. Д.** Регулирование качества продукции средствами активного контроля / Г. Д. Бурдун. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 475 с.

32 **Волосов, С. С.** Приборы для автоматического контроля в машиностроении / С. С. Волосов, Е. И. Педь. – М. : Изд-во стандартов, 1975. – 333 с.

33 **Чудов, В. А.** Пульсирующие подналадки и их численная имитация на ЭВМ / В. А. Чудов, М. С. Невельсон // Измерительная техника. – 1978. – № 10. – С. 29–30.

34 **Невельсон, М. С.** Определение алгоритма оптимальной автоматической подналадки станков и предпроектная оценка ее эффективности / М. С. Невельсон // Машиноведение. – 1974. – № 5. – С. 35–41.

35 **Невельсон, М. С.** Автоматическое управление точностью металлообработки / М. С. Невельсон. – Л. : Машиностроение, 1973. – 175 с.

36 Адаптивное управление станками / Б. С. Балакшин [и др.] ; под ред. Б. С. Балакшина. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.

37 **Соломенцев, Ю. М.** Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Машиностроение, 1980. – 536 с.

38 **Балакшин, Б. С.** Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1969. – 559 с.

39 **Подураев, В. Н.** Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1977. – 304 с.

40 **Sebela, A.** Nektere poznámky o adaptivním řízení obrábecích strojů / A. Sebela // Sb. ved. pr. VSB Ostrava R. stron. – 1974. – № 1. – S. 55–68.

41 OMAT to Feature Add-On Control Systems and Monitoring Software <http://mfgnewsweb.com/archives/imts/aug00/omatad.html>.

42 **Невельсон, М. С.** Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. С. Невельсон. – Л. : Машиностроение, 1982. – 184 с.

43 **Furness, R. J.** Supervisory control of drilling / R. J. Furness, A. G. Ulsoy, C. L. Wu // Trans. ASME. J. Eng. Ind. – 1996, – № 1. – S. 10–19.

44 Способ повышения точности обработки на металлорежущих станках : а. с. СССР, МКИ В 23 b 1/00 / Н. Н. Рясик. – № а 428863 ; заявл. 30.01.73 ; опубл. 07.02.75 // Официальный бюл. / Комитет по делам изобретений и открытий. – 1975. – № 2. – С. 174.

45 Способ коррекции оси предварительно обработанного отверстия : а. с. 1690966 СССР, МКИ В 23 В 35/00 / С. Г. Лакирев, Я. М. Хилькевич, А. И. Карсунцев, С. Г. Чиненов ; Челяб. политехн. ин-т. – № а 4455182/08 ; заявл. 05.7.88 ; опубл. 15.11.91 // Официальный бюл. / Комитет по делам изобретений и открытий. – 1991. – № 2. – С. 174.

46 Nihon kikai gakkai ronbunshu / Т. Kouichi [et al.] // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. – 1990. – № 524. – P. 1017–1021.

47 **Карсунцев, А. И.** Повышение точности отверстий за счет рационального врезания инструментов одностороннего резания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 00.00.97 / А. И. Карсунцев ; Челяб. гос. техн. ун-т. – Челябинск, 1997. – 21 с.

48 **Щетинин, В. С.** Компьютерный контроль точности при обработке резанием / В. С. Щетинин // Информационные технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 25–29 сент., 1996 г. / ХГТУ ; редкол. М. П. Даниловский [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре, 1996 – С. 37–38.

49 **Аршанский, М. М.** Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 136 с.

50 **Корсаков, В. С.** Основы конструирования приспособлений в машиностроении / В. С. Корсаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 224 с.

51 **Петров, Н. Ф.** Повышение точности размерной настройки многоцелевых станков с числовым программным управлением / Н. Ф. Петров // Сб. науч. тр. / АН УзССР. – Ташкент, 1976. – Вып. 88 : Вопросы кибернетики. – С. 69–76.

52 **Гильман, А. М.** Об алгоритмическом проектировании технологических процессов в машиностроительной промышленности / А. М. Гильман // Сб. науч. тр. / АН СССР. – М., 1960. – Вып. 3 : Проблемы кибернетики. – С. 218–226.

53 **Липатов, Д. К.** Алгоритм проектирования технологических карт холодной штамповки / Д. К. Липатов, С. А. Топорищева // Тр. ПТНИИ ВВСНХ. – Горький, 1964. – Вып. 1. – С. 26–38.

54 **Первин, Ю. А.** Об алгоритмическом проектировании технологической оснастки / Ю. А. Первин, В. С. Полозов // Автоматизация технологического проектирования. – М., 1966. – С. 40–52.

55 **Горанский, Г. К.** К теории автоматизации инженерного труда / Г. К. Горанский. – Минск : АН БССР, 1962. – 215 с.

56 **Горанский, Г. К.** Расчет режимов резания при помощи ЭВМ / Г. К. Горанский. – Минск : АН БССР, 1962. – 192 с.

57 **Волкова, Н. И.** Метод автоматизации проектирования специальных станочных приспособлений с помощью электронно-вычислительных машин / Н. И. Волкова, Г. К. Горанский, А. Г. Ракович. – М. : Машиностроение, 1965. – 24 с.

58 **Адамчик, В. В.** Методические материалы по автоматизации проектирования приспособлений / В. В. Адамчик, А. Г. Ракович, С. А. Юревич ; под ред. А. Г. Раковича. – Минск : ИТК АН БССР, 1975. – 136 с.

59 Опыт построения эффективных алгоритмов машинного проектирования специальных сверлильных приспособлений / Г. К. Горанский [и др.] ; под ред. Г. К. Горанского. – Минск : Наука и техника, 1970. – 120 с.

60 **Корсаков, В. С.** Основы конструирования приспособлений / В. С. Корсаков. – М. : Машиностроение, 1971. – 288 с.

61 **Шатилов, А. А.** Состояние и перспективы развития станочных приспособлений / А. А. Шатилов // Прогрессивная технологическая оснастка : материалы семинара, 13–15 сент. 1977 г. / Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды ; под ред. О. Я. Константинова. – Л., 1977. – С. 4–10.

62 **Микитянский, В. В.** Технологические основы автоматизированного проектирования станочных приспособлений / В. В. Микитянский, Л. М. Микитянская // Проблемные вопросы автоматизации производства. – Рига, 1978. – С. 132–133.

63 **Капустин, Н. М.** Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ / Н. М. Капустин. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.

64 **Константинов, О. Я.** Магнитная технологическая оснастка / О. Я. Константинов. – Л. : Машиностроение, 1974. – 384 с.

65 **Оркин, В. И.** Вопросы применения ЭВМ для решения задач проектирования универсальных конструкций станочного оснащения / В. И. Оркин, А. Г. Ракович // Вычислительная техника в машиностроении : науч. тр. / АН БССР, Ин-т техн. кибернетики ; под ред. О. И. Семенова. – Минск, 1974. – С. 46–59.

66 **Кузнецов, Ю. П.** Новые зажимные механизмы станков-автоматов / Ю. П. Кузнецов, А. В. Кухарец. – Киев : Техника, 1978. – 152 с.

67 **Лукичев, А. Н.** Автоматизация проектирования сверлильных приспособлений / А. Н. Лукичев, И. Ю. Ардова, Г. В. Крылов // Прогрессивная технологическая оснастка : материалы семинара, 13–15 сент. 1977 г. / Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды ; под ред. О. Я. Константинова. – Л., 1977. – С. 24–27.

68 **Мирзоев, С. М.** Автоматизация проектирования компоновок УСП с помощью ЭВМ / С. М. Мирзоев, И. С. Савдур // Автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении : материалы I Всесоюз. межвузовской конф. ; редкол.: Н. И. Пирожник [и др.]. – Ворошиловград, 1973. – С. 114–115.

69 **Ракович, А. Г.** Применение вычислительной техники для автоматизации проектирования технологического оснащения / А. Г. Ракович. – М. : Машиностроение, 1977. – 48 с.

70 **Другакова, М. Н.** Создание программных средств САПР приспособлений / М. Н. Другакова, А. Г. Ракович. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 88 с.

71 **Махнач, Г. В.** Автоматизация проектирования операций обработки деталей на координатно-револьверных прессах / Г. В. Махнач, А. Г. Ракович // Приборы и системы управления. – 1978. – № 1. – С. 48–49.

72 **Волкова, Н. И.** Проектирование ремонтно-технологической оснастки с применением ЭВМ / Н. И. Волкова, В. И. Новожилов // Восстановление деталей, ремонт и диагностика машин. – Калуга, 1977. – С. 84–90.

73 **Близнюк, В. П.** Задачи автоматизации проектирования технологической оснастки для механической обработки деталей паровых и газовых турбин / В. П. Близнюк, Н. И. Доманик // Сб. науч. тр. / Проектно-техн. ин-т энергет. машиностроения. – Л., 1977. – Вып. 1 : Теория и методы автоматизации проектирования. – С. 36–44.

74 **Азаматов, Р. А.** Опыт создания и внедрения САПР на КамАЗе / Р. А. Азаматов, В. И. Лавреченко // Автомобильная промышленность. – 1984. – № 6. – С. 3–4.

75 Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Г. К. Горанский [и др.] ; под общ. ред. Г. К. Горанского. – Л. : Машиностроение, 1976. – 240 с.

76 **Пухов, А. С.** Информационно-поисковые системы при автоматизированной подготовке оснастки / А. С. Пухов. – М. : Машиностроение, 1978. – 133 с.

77 **Аверченков, В. И.** Автоматизация проектирования приспособлений : учеб. пособие / В. И. Аверченков, В. В. Ильицкий. – Брянск : БИТМ, 1989. – 174 с.

78 **Ракович, А. Г.** Автоматизация проектирования приспособлений для металлорежущих станков / А. Г. Ракович. – М. : Машиностроение, 1980. – 136 с.

79 Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С. И. Корчак [и др.] ; под общ. ред. С. И. Корчака. – М. : Машиностроение, 1988. – 352 с.

80 **Плоткин, В. А.** Автоматизация поиска аналогов при проектировании приспособлений / В. А. Плоткин, А. Г. Ракович // Машиностроитель. – 1978. – № 2. – С. 29–30.

81 Технология машиностроения : учебник для вузов : в 2 т. / В. М. Бурцев [и др.] ; под ред. Г. Н. Мельникова. – 2-е изд., стереотип. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – Т. 2 : Производство машин. – 519 с.

82 **Половинкин, А. И.** Основы инженерного творчества : учеб. пособие / А. И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.

83 Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А. И. Половинкин [и др.] ; под общ. ред. А. И. Половинкина. – М. : Радио и связь, 1981. – 344 с.

84 **Батенькина, О. В.** Информационно-поисковые системы конструкторско-технологического назначения: представление знаний и стратегии поиска / О. В. Батенькина // Автоматизация и современные технологии. – 2005. – № 11. – С. 39–46.

85 **Аверченков, В. И.** САПР технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: учеб. пособие для вузов / В. И. Аверченков, И. А. Каштальян, А. П. Пархутик. – Минск : Выш. шк., 1993. – 288 с.

86 Технологическая подготовка гибких производственных систем / С. П. Митрофанов [и др.] ; под общ. ред. С. П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 352 с.

87 Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. / Редкол. : К. В. Фролов (гл. ред.) [и др.]. – М. : Машиностроение, 2000. – Т. 3 : Технология изготовления деталей машин / А. Г. Суслов [и др.]. – 2000. – 840 с.

88 **Чемборисов, Н. А.** Проектирование приспособления для зубообработки с использованием информационно-поисковой системы технологической оснастки / Н. А. Чемборисов, Л. Ф. Зарипов // СТИН. – 2007. – № 7. – С. 9–12.

89 **Соколов, Е. В.** Выбор оптимальных объемов технологической оснастки / Е. В. Соколов. – М. : Машиностроение, 1985. – 166 с.

90 **Ракович, А. Г.** Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / А. Г. Ракович ; под ред. Е. А. Стародетко. – Минск : Наука и техника, 1985. – 285 с.

91 **Ракович, А. Г.** Принципы разработки технологических приспособлений в системе автоматизированного проектирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 ; 05.13.12 / А. Г. Ракович ; Ин-т техн. кибернетики АН БССР. – Минск, 1984. – 25 с.

92 **Андреев, Г. Н.** Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства : учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов / Г. Н. Андреев, В. Ю. Новиков, А. Г. Схиртладзе ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 3-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2001. – 415 с. : ил.

93 **Губич, Л. В.** Информационная база автоматизированного проектирования приспособлений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Л. В. Губич ; Ин-т техн. кибернетики АН БССР. – Минск, 1984. – 25 с.

94 **Адамчик, В. В.** Автоматизированное проектирование приспособлений для сверления плоскостных деталей (система «Кондуктора») / В. В. Адамчик, Н. И. Волкова, А. А. Конопляник. – Минск : Наука и техника, 1978. – 154 с.

95 **Ракович, А. Г.** Принцип построения и характеристика пакета программы автоматизированного проектирования сверлильных приспособлений / А. Г. Ракович, А. В. Самек // Сб. науч. тр. / Ин-т техн. кибернетики АН БССР. – Минск, 1981. – Вып. 9 : Вычислительная техника социалистических стран. – С. 117–124.

96 **Адамчик, В. В.** Система «Кондуктор-3» автоматизированного проектирования приспособлений / В. В. Адамчик, А. А. Конопляник, А. Г. Ракович // Приборы и системы управления. – 1980. – № 2. – С. 33–34.

97 Система «Токар-1М» автоматизированного конструирования токарных приспособлений. Инструктивно-методическая разработка / М. Н. Другакова [и др.] ; под общ. ред. М. Н. Другаковой. – Минск: Наука и техника, 1983. – 84 с.

98 Автоматизация конструирования приспособлений для фрезерных операций / Э. Б. Бокшиц [и др.] // Проблемные вопросы автоматизации производства : материалы Всесоюз. науч.-техн. симп., 4–8 окт. 1987 г. – Воронеж, 1987. – С. 217–219.

99 **Кочетов, Н. В.** Моделирование процессов проектирования приспособлений агрегатных станков : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Н. В. Кочетов ; Ин-т техн. кибернетики АН БССР. – Минск, 1990. – 26 с.

100 **Кузнецов, Ю. И.** Оптимальный синтез зажимных механизмов / Ю. И. Кузнецов. – Киев : Машиностроение, 1980. – 26 с.

101 **Сидоренко, С. А.** Подсистема САПР УСП / С. А. Сидоренко, М. М. Большаков, Н. А. Дмитриев // Материалы XXXII науч.-техн. конф. по результатам работы профессорско-преподавательского состава,

аспирантов и студентов СевКавГТУ за 2002 г. [Электронный ресурс]. – 2003. – Режим доступа : <http://www.ncstu.ru>. – Дата доступа : 02.02.2007.

102 **Гладков, А. С.** Программный продукт «Призма» / А. С. Гладков, В. Ю. Шамин // Прогрессивная технология в машиностроении : науч. тр. / Южно-Уральский гос. ун-т ; под ред. В. И. Гузеева. – Челябинск, 2005. – С. 136–137.

103 **Мясников, Ю. И.** Проектирование станочных приспособлений : учеб. пособие / Ю. И. Мясников. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 481 с.

104 **Мясников, Ю. И.** Принцип визуального проектирования и его реализация в системе «Конструктор СП» / Ю. И. Мясников, А. М. Хасанов // Прогрессивные технологии в машиностроении : науч. тр. / Южно-Уральский гос. ун-т ; под ред. В. И. Гузеева. – Челябинск, 2000. – С. 37–39.

105 Универсально-сборные станочные приспособления (УСП), моделирование их конструкции и процесса сборки : учеб.-метод. комплекс / Оборудование, оснастка и программное обеспечение для машиностроительных специальностей вузов, колледжей, техникумов, ресурсных центров, профессиональных училищ, лицеев и школ [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : <http://canegor.urs.ac.ru/machine/17.html>. – Дата доступа : 01.02.2010.

106 **Мясников, Ю. И.** Проектирующие мастера как способ визуального проектирования СП / Ю. И. Мясников, А. В. Пушкарев // Прогрессивная технология в машиностроении : науч. тр. / Южно-Уральский гос. ун-т ; под ред. В. И. Гузеева. – Челябинск, 2005. – С. 206–211.

107 **Kochan, D.** Fertigungsprozeßgestaltung und Informationsverarbeitung / D. Kochan. – Berlin : VEB Verlag Technik, 1977. – 326 s.

108 **Rümmler, G.** Beitrag zur Gestaltung und Ausarbeitung von Algorithmen der technologischen Fertigungsvorbereitung / G. Rümmler. – TH Karl-Marx-Stadt : Dissert, 1976. – 254 s.

109 **Tempelhof, К.-Н.** Beitrag zu den Grundlagen der Fertigungsprozeßgestaltung und zur rechnerunterstützten technologischen Fertigungsvorbereitung / К.-Н. Tempelhof. – TU Dresden : Dissert, 1981. – 328 s.

110 **Logan, F. A.** Computer aided design as a tooling aid / F. A. Logan // Product design engineering. – 1970. – № 5. – P. 20–24.

111 **Szabo, Z.-J.** Systematische Planung von Programmsystemen zur Erstellung von Fertigungsunterlagen / Z.-J. Szabo. – TH Aachen : Dissert, 1976. – 227 s.

112 **Koller, R.** Rationalisierung und Automatisierung der Vorrichtungskonstruktion mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen / R. Koller, H. J. Pieperhof //

Konstruktion im Maschinen-Apparate und Geratebau. – 1978. – Vol. 8. – S. 319–325.

113 **Latombe, J. C.** Artificial intelligence in computer aided design / J. C. Latombe // CAD Systems / J. J. Allen. – Amsterdam : North-Holland, 1977. – P. 90–101.

114 **Imhof, G.** Rationalisierung der Vorrichtungskonstruktion mittels elektronischer Rechnentechnik. Vorstellung des Gesamtproblems / G. Imhof, V. Grahl // Maschinenbautechnik. – 1977. – Vol. 6. – S. 246–248.

115 **Samek, A.** Projektowanie oprzyrzqdo, wania technologicznego / A. Samek. – Warszawa : Paistwowe Wydawnictwo Naukowe, 1976. – 258 с.

116 САПР изделий и технологических процессов в машиностроении / Р. А. Аллик [и др.] ; под общ. ред. Р. А. Аллика. – Л. : Машиностроение, 1986. – 319 с.

117 Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении : в 2 т. / О. И. Семенов [и др.] ; под ред. О. И. Семенова. – Минск : Выш. шк., 1977. – Т. 2. – 333 с.

118 **Каган, К. И.** Автоматизация решений технологических задач в комплексных системах проектирования оснастки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / К. И. Каган ; Ин-т техн. кибернетики АН БССР. – Минск, 1988. – 27 с.

119 **Капустин, Н. М.** Автоматизация машиностроения : учебник для вузов / Н. М. Капустин, Н. П. Дьяконова, П. М. Кузнецов ; под ред. Н. М. Капустина. – М.: Высш. шк., 2003. – 223 с.

120 **Шпур, Г.** Автоматизированное проектирование в машиностроении / Г. Шпур, Ф.-Л. Краузе. – М. : Машиностроение, 1988. – 648 с.

121 **Другакова, М. Н.** Модели и средства для построения программных комплексов автоматизированного проектирования приспособлений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / М. Н. Другакова ; Ин-т техн. кибернетики АН БССР. – Минск, 1986. – 25 с.

122 **Зотина, О. В.** Автоматизация проектирования элементарных и комбинированных силовых механизмов станочных приспособлений в условиях применения интегрированных САПР : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / О. В. Зотина ; Брянс. гос. техн. ун-т. – Брянск, 2006. – 19 с.

123 **Омтау, С.** Нейроуправление и его приложения / С. Омтау. – М. : ИПРЖР, 2000. – Кн. 2. – 272 с.

124 **Норенков, И. П.** Основы теории и проектирования САПР : учебник для вузов / И. П. Норенков, В. Б. Маничев. – М. : Высш. шк., 1990. – 335 с.

125 **Таунсенд, К.** Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / К. Таунсенд, Д. Фохт. – М. : Финансы и статистика, 1990. – 320 с.

126 **Кондаков, А. И.** САПР технологических процессов : учебник для студентов вузов / А. И. Кондаков. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 272 с.

127 **Макаллистер, Дж.** Искусственный интеллект и Пролог на микроЭВМ : пер. с англ. / Дж. Макаллистер. – М. : Машиностроение, 1990. – 240 с.

128 **Норенков, И. П.** Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И. П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.

129 **Попов, Э. В.** Экспертные системы. Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ / Э. В. Попов. – М. : Наука, 1987. – 288 с.

130 **Братко, И.** Программирование на языке Пролог для искусственного интеллекта : пер. с англ. / И. Братко. – М. : Мир, 1990. – 559 с.

131 **Галушкин, А. И.** Теория нейронных сетей / А. И. Галушкин. – М. : ИПРЖР, 2000. – 348 с.

132 **Пашкевич, В. М.** Самообучающиеся системы искусственного интеллекта в машиностроении / В. М. Пашкевич, Ж. А. Мрочек. – Могилев : МГТУ, 2003. – 423 с.

133 **Юдашкин, А. А.** Применение нейронных сетей для построения адаптивных систем управления технологическими процессами : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / А. А. Юдашкин. – Самара, 1994. – 145 с.

134 **Галушкин, А. И.** Нейрокомпьютеры : учеб. пособие для вузов / А. И. Галушкин. – М. : ИПРЖР, 2000. – 528 с.

135 **Кабалдин, Ю. Г.** Применение нейросетевых моделей процесса резания в системах адаптивного управления / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, А. М. Шпилев // СТИН. – 2002. – № 3. – С. 37.

136 **Никишечкин, А. П.** Повышение качества процесса адаптации при изменении технологических параметров с помощью аппарата нейронных сетей : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / А. П. Никишечкин. – М., 2002. – 187 с.

137 **Кабалдин, Ю. Г.** Адаптивное управление технологическими системами механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Серый, С. В. Биленко // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 6. – С. 46–48.

138 **Щербаков, М. Е.** Уменьшение износа инструмента в процессе резания за счет использования аппарата нейронных сетей : магистерская работа : 05.02.08 / М. Е. Щербаков. – М. : МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 95 с.

139 **Рязанов, Д. Ю.** Нейромоделирование и прогнозирование геометрической точности токарной обработки во времени на станках с ЧПУ / Д. Ю. Рязанов // Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2010) : материалы студенческой науч.-техн. конф. [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : [http:// www.stankin.ru/reports/40.7.1/nim46.docx](http://www.stankin.ru/reports/40.7.1/nim46.docx). – Дата доступа : 21.08.2012.

140 **Кабалдин, Ю. Г.** Управление технологическим оборудованием на основе искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, В. А. Соловьев // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 11. – С. 52–56.

141 **Тугенгольд, А. К.** Интеллектуальное управление станком по состоянию элементов технологической системы / А. К. Тугенгольд, В. А. Герасимов, Е. А. Лукьянов // СТИН. – 1997. – № 3. – С. 7–13.

142 **Чумаков, Р. Е.** Интеллектуальные методы проектирования геометрии крепежных резьбообразующих элементов / Р. Е. Чумаков // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 8. – С. 11–20.

143 **Элти, Дж.** Экспертные системы: концепции и примеры : пер. с англ. / Дж. Элти, М. Кумбс. – М. : Финансы и статистика, 1987. – 191 с.

144 **Марселлус, Д.** Программирование экспертных систем на Турбо Прологе : пер. с англ. / Д. Марселлус. – М. : Финансы и статистика, 1994. – 256 с.

145 **Минский, М.** Фреймы для представления знаний : пер. с англ. / М. Минский. – М. : Энергия, 1979. – 151 с.

146 **Уэно, Х.** Представление и использование знаний : пер. с япон. / Х. Уэно ; под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. – М. : Мир, 1989. – 220 с.

147 Искусственный интеллект : справочник : в 3 кн. / Д. А. Попов [и др.] ; под ред. Д. А. Попова. – М. : Радио и связь, 1990. – Кн. 2 : Модели и методы. – 304 с.

148 **Сойер, Б.** Программирование экспертных систем на Паскале : пер. с англ. / Б. Сойер, Д. Фостер. – М. : Финансы и статистика, 1990. – 191 с.

149 **Кахро, М. В.** Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ) / М. В. Кахро, А. П. Калья, ЭюХю Тыугу. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 147 с.

150 Open Semantic Technology for Intelligent Systems [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : [http:// www.ostis.net](http://www.ostis.net). – Дата доступа : 20.08.2012.

151 Искусственный интеллект : справочник : в 3 кн. / Под ред. Э. В. Попова. – М. : Радио и связь, 1990. – Кн. 1 : Системы общения и экспертные системы. – 1990. – 464 с.

152 Станочные приспособления : справочник : в 2 т. / А. И. Астахов [и др.] ; под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова. – М. : Машиностроение, 1984. – Т. 1. – 592 с.

153 **Вотинов, К. В.** Жесткость станков / К. В. Вотинов. – М. : ЛОНИТОМАШ, 1940. – 178 с.

154 **Демкин, Н. Б.** Фактическая площадь касания твердых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 147 с.

155 **Каминская, В. В.** Станины и корпусные детали металлорежущих станков / В. В. Каминская, З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – М. : Машгиз, 1960. – 201 с.

156 **Чихладзе, Г. Е.** Экспериментальное исследование жесткости плоских стальных стыков / Г. Е. Чихладзе // Изв. вузов. Машиностроение. – 1962. – № 4 – С. 49–54.

157 **Рыжов, Э. В.** Контактная жесткость деталей машин / Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1966. – 195 с.

158 **Гусев, И. Т.** Деформация стыков при многократном их нагружении / И. Т. Гусев // Новые исследования в области обработки резанием металлов и пластмасс : науч. тр. / ММИ ; под ред. В. М. Руденкова. – М., 1952. – С. 28–32.

159 **Михин, Н. М.** Новый метод определения сближения и контактного предварительного смещения твердых тел / Н. М. Михин, Г. Я. Рамишвили // Трение твердых тел. – М., 1964. – С. 66–72.

160 **Абдель Аал, М. М.** Исследование жесткости станочных приспособлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / М. М. Абдель Аал ; МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1963. – 139 с.

161 **Калинин, М. А.** Погрешности установки на станках токарной группы / М. А. Калинин // Сб. науч. тр. / ГОСИНТИ, – М., 1962. – Вып. 32. – С. 28–33.

162 **Герасимович, А. И.** Математическая статистика : учеб. пособие для инженерно-техн. и экон. специальностей втузов / А. И. Герасимович. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск : Выш. шк., 1983. – 279 с.

163 **Пашкевич, М. Ф.** Исследование смещений заготовки под действием сил закрепления при базировании по плоскости / М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2010. – № 2. – С. 9–18.

164 **Антонюк, В. Е.** Конструктору станочных приспособлений / В. Е. Антонюк. – Минск : Беларусь, 1991. – 400 с.

165 Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / В. Б. Борисов [и др.] ; под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 656 с.

166 **Болотин, Х. Л.** Станочные приспособления / Х. Л. Болотин, Ф. П. Костромин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.

167 **Антонюк, В. Е.** В помощь молодому конструктору станочных приспособлений / В. Е. Антонюк. – Минск : Беларусь, 1975. – 351 с.

168 **Косилова, А. Г.** Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении : справочник технолога / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, М. А. Калинин. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.

169 **Данилевский, В. В.** Справочник молодого машиностроителя : справочник для молодых рабочих машиностроительных заводов и учащихся проф.-техн. училищ / В. В. Данилевский. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Высш. шк., 1973. – Т. 1. – 648 с.

170 **Аршинов, А. А.** Резание металлов и режущий инструмент / А. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – М. : Машиностроение, 1967. – 500 с.

171 **Косилова, А. Г.** Точность обработки деталей на автоматических линиях / А. Г. Косилова. – М. : Машиностроение, 1976. – 224 с.

172 **Дерябин, И. П.** Методология параметрического проектирования многопереходной обработки круглых отверстий концевыми мерными инструментами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / И. П. Дерябин ; Челяб. гос. техн. ун-т. – Челябинск, 2009. – 36 с.

173 **Пашкевич, В. М.** Методология комплексного решения технологических задач на основе использования функциональных семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 95–105.

174 **Дунаев, П. Ф.** Расчет допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М. : Машиностроение, 1981. – 189 с.

175 **Миронова, М. Н.** Обеспечение точности обработки концевым инструментом на основе использования семантических сетей / М. Н. Миронова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2007 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Саонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 81–82.

176 **Пашкевич, В. М.** Расчет станочных приспособлений на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 4. – С. 98–106.

177 **Миронова, М. Н.** Интеллектуальная система для расчета станочных приспособлений / М. Н. Миронова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 26–33.

178 **Миронова, М. Н.** База знаний интеллектуальной системы проектирования станочных приспособлений / М. Н. Миронова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 20–21 нояб. 2008 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 55.

179 **Миронова, М. Н.** Механизм логического вывода интеллектуальной системы расчета станочных приспособлений / М. Н. Миронова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 19–20 нояб. 2009 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 22.

180 **Архангельский, А. Я.** Приемы программирования в Delphi / А. Я. Архангельский. – М. : Бинوم, 2000. – 385 с.

181 **Пашкевич, М. Ф.** Моделирование конструктивных схем и проектирование средств технологической оснастки на основе функциональных семантических сетей / М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестн. машиностроения. – 2010. – № 2. – С. 22–26.

182 **Миронова, М. Н.** Использование семантических сетей для обеспечения точности обработки концевым инструментом / М. Н. Миронова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 18–19 нояб. 2010 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2010. – С. 27.

183 **Пашкевич, В. М.** Автоматизация проектно-конструкторских работ при разработке станочных приспособлений / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брянск, 16–18 нояб. 2009 г. / БГТУ ; редкол. : А. В. Лагерев [и др.]. – Брянск, 2009. – С. 43.

184 **Пашкевич, В. М.** Формирование информационной модели конструкции станочных приспособлений при их автоматизированном проектировании сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Материалы,

оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 94–95.

185 **Пашкевич, В. М.** Оптимизация режимов резания на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 3. – С. 9–12.

186 **Пашкевич, В. М.** Расчет станочных приспособлений на точность на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // БАЛТТЕХМАШ-2008. Прогрессивные технологии, машины и оборудование в машиностроении : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Калининград, 2008 г. / КГТУ ; редкол. : В. Н. Тилипалов [и др.]. – Калининград, 2008. – С. 60–66.

187 **Кирсанов, С. В.** Повышение производительности и точности обработки отверстий мерными инструментами : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / С. В. Кирсанов. – Томск, 2000. – 272 с.

188 **Самосудов, А. А.** Повышение точности обработки при сверлении глубоких отверстий малого диаметра спиральными сверлами на основе управления динамикой процесса : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / А. А. Самосудов. – Ростов н/Д, 2006. – 263 с.

189 **Макашин, Д. С.** Повышение точности изготовления отверстий в корпусных деталях из титановых сплавов твердосплавным инструментом : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Д. С. Макашин. – Омск, 2011. – 167 с.

190 **Рыбалко, А. П.** Повышение качества обработки прерывистых отверстий на основе управления и диагностики процесса глубокого вибрационного сверления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / А. П. Рыбалко. – М., 2006. – 18 с.

191 **Дерябин, И. П.** Прогнозирование параметров точности при обработке отверстий / И. П. Дерябин, В. И. Гузев // Технология машиностроения. – 2006. – № 4 (46). – С. 9–14.

192 **Дерябин, И. П.** Информационно-справочная база погрешностей обработки отверстий для технологического проектирования / И. П. Дерябин // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 9. – С. 16–21.

193 **Миронова, И. Н.** Сокращение трудоемкости технологической подготовки производства на этапах проектирования и отладки операций обработки отверстий инструментами одностороннего резания : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / И. Н. Миронова. – Челябинск, 2006. – 171 с.

194 **Пестов, С. П.** Обеспечение эффективности обработки отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ на основе

моделирования этапов настройки и формообразования : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С. П. Пестов. – Челябинск, 2004. – 238 с.

195 **Пашовкин, С. А.** Повышение эффективности глубокого сверления управлением топологией направляющих сверла: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08, 05.03.01 / С. А. Пашовкин. – Липецк, 2009. – 169 с.

196 **Панов, Е. Ю.** Повышение производительности и надежности процесса сверления глубоких отверстий малого диаметра спиральными сверлами за счет диагностики состояния и векторного управления его координатами : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Е. Ю. Панов. – Ростов н/Д, 2003. – 220 с.

197 **Быков, С. Ю.** Повышение точности сверления отверстий на основе моделирования и управления траекториями формообразования : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / С. Ю. Быков. – М., 2006. – 160 с.

198 **Павлова, Н. П.** Обеспечение функциональной устойчивости технологической системы обработки отверстий в корпусных деталях на основе учета износа ее элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Н. П. Павлова. – Саратов, 2001. – 267 с.

199 **Леонов, С. Л.** Обеспечение геометрических параметров качества деталей на основе прогнозирования законов распределения методами имитационного стохастического моделирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / С. Л. Леонов. – Барнаул, 2009. – 20 с.

Оглавление

Введение	3
1 Функциональные семантические сети	5
1.1 Функциональные семантические сети как способ представления знаний	5
1.2 Поиск решений в семантических сетях.....	7
1.3 Многофакторная оптимизация на основе функциональной семантической сети.....	14
2 Методы и средства обеспечения точности обработки лезвийным инструментом	16
2.1 Погрешности механической обработки и способы обеспечения ее точности	16
2.2 Повышение точности механической обработки за счет рационального проектирования станочных приспособлений.....	29
2.3 Обеспечение точности обработки на основе использования методов искусственного интеллекта	37
2.4 Использование информационно-справочных данных для обеспечения точности механической обработки.....	41
2.5 Экспериментальные исследования смещений заготовки под действием сил закрепления при базировании по плоскости.....	46
3 Методика формирования обобщенной базы знаний семантической сети для обеспечения точности механической обработки концевым инструментом	84
3.1 База знаний интеллектуальной системы.....	84
3.2 База знаний интеллектуальной системы для расчета станочных приспособлений	113
4 Интеллектуальная система для обеспечения точности механической обработки на базе семантических сетей	135
4.1 Интеллектуальная система для обеспечения точности механической обработки на основе использования семантических сетей.....	135
4.2 Практическое использование интеллектуальной системы SEMANTIC	152

4.3 Экспериментальная апробация интеллектуальной системы	171
4.4 Апробация интеллектуальной системы в производственных условиях	180
Список литературы.....	191

Научное издание

Пашкевич Виктор Михайлович
Миронова Марина Николаевна

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СЕМАНТИЧЕСКИЕ СЕТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Редактор И. В. Голубцова

Художественное оформление обложки Е. С. Фитцова

Технический редактор А. Т. Червинская

Компьютерный дизайн Н. П. Полевничая

Подписано в печать 07.04.2015. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 12,20. Уч.-изд. л. 14,0. Тираж 100 экз. Заказ № 206.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.