

Экспериментальная апробация интеллектуальной системы для управления точностью механической обработки

Магистр техн. наук М. Н. Миронова¹⁾

¹⁾Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Обеспечение точности механической обработки – актуальная задача технологии машиностроения, решение которой позволяет гарантировать точность работы механизмов и машин, их износостойкость, надежность и долговечность. Для выполнения данной задачи предложен способ, позволяющий создать наибольший запас точности обработки на основе многофакторной оптимизации параметров технологического процесса с использованием методов искусственного интеллекта. С целью обеспечения точности обработки концевыми инструментами разработана интеллектуальная система, базирующаяся на технологиях функциональных семантических сетей. Для выявления корректности функционирования интеллектуальной системы SEMANTIC проведена экспериментальная проверка ее работоспособности. В статье описана методика экспериментальных исследований, целью которых являлось сравнение фактических погрешностей обработки отверстий с погрешностями обработки, прогнозируемыми системой SEMANTIC на основе использования функциональных семантических сетей. В ходе исследований устанавливались зависимости смещений осей обрабатываемых отверстий от подачи и частоты вращения инструмента при сверлении отверстий сверлом из быстрорежущей стали. Приведены результаты анализа предельных и вероятных значений составляющих суммарной погрешности обработки. Показано, что при оценке точности обработки следует учитывать вероятностный характер проявления составляющих суммарной погрешности, задающих ее верхнюю границу, как это и реализовано в описанной интеллектуальной системе. С помощью семантической сети сопоставлены погрешности расположения осей отверстий, обрабатываемых при допустимых подачах и частотах вращения сверла, и соответствующие им экспериментальные значения. На основе экспериментальных исследований подтверждена возможность использования подхода прогнозирования суммарной погрешности обработки, базирующегося на применении технологии функциональных семантических сетей.

Ключевые слова: точность механической обработки, искусственный интеллект, функциональные семантические сети, погрешность обработки

Для цитирования: Миронова, М. Н. Экспериментальная апробация интеллектуальной системы для управления точностью механической обработки / М. Н. Миронова // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 242–248. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-242-248

Experimental Approbation of Intellectual System for Machining Accuracy Control

M. N. Mironova¹⁾

¹⁾Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. Provision of machining accuracy is a relevant objective in technology of mechanical engineering and its solution allows to guarantee an operational accuracy of mechanisms and machines, their wear resistance, reliability and durability. In order to solve the given task a method has been proposed in the paper that permits to ensure the highest machining accuracy margin on the basis of multiple-factor optimization of parameters for technological process while using methods of artificial intelligence. To ensure the machining accuracy by point tools, an intellectual system has been developed and it is based on technologies of functional semantic networks. For revealing correctness of SEMANTIC intellectual system operation an experimental inspection of its working capacity has been carried out in the paper. The paper contains description of the methodology for In article the technique of experimental investigations and their purpose is to make a comparative analysis of actual errors in opening machining with the machining errors predicted by the SEMANTIC system on the basis of functional semantic

Адрес для переписки
Миронова Марина Николаевна
Белорусско-Российский университет
просп. Мира, 43,
212000, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 22 226-62-98
MarinaMN16@mail.ru

Address for correspondence
Mironova Marina N.
Belarusian-Russian University
43 Mira Ave.,
212000, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 22 226-62-98
MarinaMN16@mail.ru

network application. The investigations have made it possible to determine dependences of axial misalignment in the machined openings on tool advance and its rotation frequency while making openings by high-speed steel drills. The paper presents analysis results of limiting and probable values for components of a total machining error. It has been shown that while making assessment of machining accuracy it is necessary to consider probabilistic nature of occurrence of total error components that are setting upper boundary as it is realized in the described intellectual system. The semantic network permits to compare errors in arrangement of opening axes which are machined in accordance with admissible drill advance and rotation frequency and corresponding experimental values. The experimental investigations prove the possibility to use an approach for forecasting a total machining error which is based on application of functional semantic network technology.

Keywords: machining accuracy, artificial intelligence, functional semantic networks, machining error

For citation: Mironova M. N. (2017) Experimental Approbation of Intellectual System for Machining Accuracy Control. *Science and Technique*. 16 (3), 242–248. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-242-248 (in Russian).

Введение

Обеспечение точности механической обработки представляет собой актуальную задачу технологии машиностроения, решение которой позволяет гарантировать точность работы механизмов и машин, их износостойкость, надежность и долговечность. Повышение точности механической обработки упрощает пригоночные работы при сборке, дает возможность 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 связи с этим 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. Такое решение даст комплексный подход к обеспечению точности и позволит осуществить многофакторную оптимизацию как параметров технологического процесса, так и технологической оснастки. Для реализации данного подхода была создана интеллектуальная система, предназначенная для решения прикладных задач, описываемых функциональными зависимостями [1].

Основой модели представления знаний в системе служит функциональная семантическая сеть, которая в общем случае – это неориентированный двудольный граф с двумя типами вершин. Первый тип представляет собой параметры рассчитываемых задач, в том числе исходные данные [2–7]. Второй тип вершин опи-

сывает отношения, определяющие функциональные зависимости между параметрами сети. При построении сети для данной системы были использованы математические зависимости между параметрами обработки отверстий концевыми инструментами и отдельными составляющими общей погрешности обработки.

Первая вспомогательная задача, которую решает программный комплекс, заключается в определении минимально замкнутой системы отношений, позволяющей решить поставленную задачу. У отношений выявляются входы и выходы, что приводит к становлению их как функций и преобразованию неориентированного двудольного графа отношений в ориентированный граф решения задачи. Таким образом происходит синтез рабочей программы решения задачи из цепочки программных модулей, соответствующих каждой функции [8].

Разработанная система уверенно решает различные задачи в области управления точностью обработки деталей машин. Она позволяет как успешно решать задачу, связанную с обеспечением точности, так и математически корректно обеспечить наибольший запас точности на основе решения задачи многофакторной оптимизации на семантической сети [9]. Для выявления корректности функционирования интеллектуальной системы SEMANTIC проведена экспериментальная проверка ее работоспособности.

Методика экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований являлось сравнение фактических погрешностей обработки отверстий с погрешностями обработки, прогнозируемыми системой SEMANTIC на основе использования функциональных семантических сетей. Обработку заготовок осуществляли на радиально-сверлильном станке модели 2К522. В качестве заготовки использовали стальную втулку с базированием по отверстию $\varnothing 50$ мм (рис. 1).

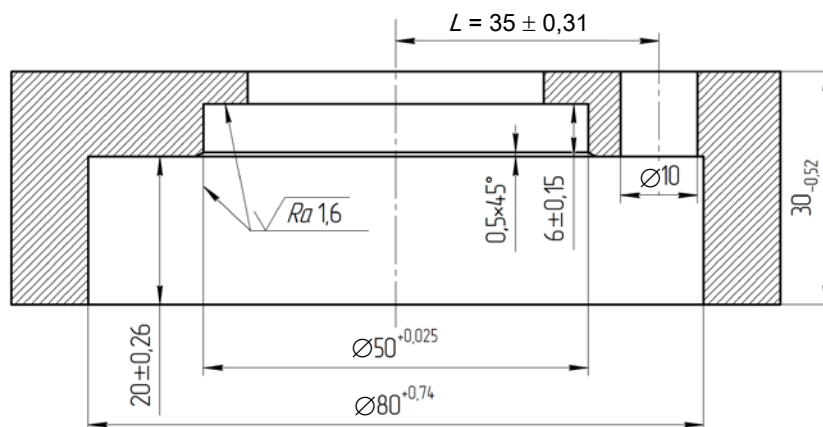


Рис. 1. Заготовка, используемая для экспериментальных исследований

Fig. 1. Work-piece used for experimental investigations

В ходе эксперимента определяли точность расположения отверстия $\varnothing 10$ мм (точность выполнения размера $L = 35 \pm 0,31$ мм).

Для установки заготовки на станке использовали кондуктор (рис. 2), конструктивная схема которого представлена на рис. 3.



Рис. 2. Кондуктор для исследования процесса сверления отверстия диаметром 10 мм

Fig. 2. Conductor for investigation of process for drilling opening of 10 mm diameter

В процессе исследований устанавливали зависимости смещений осей обрабатываемых отверстий от подачи и частоты вращения инструмента при сверлении отверстий диаметром 10 мм сверлом из быстрорежущей стали P6M5.

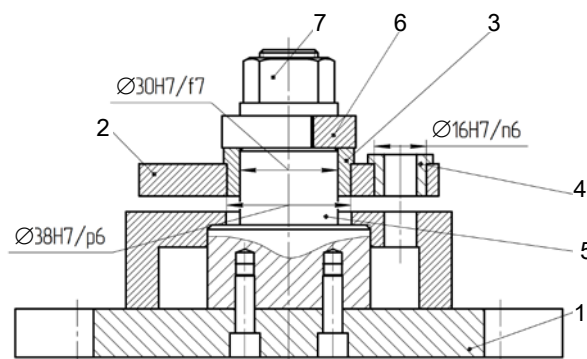


Рис. 3. Конструктивная схема кондуктора: 1 – основание; 2 – плита; 3 – втулка; 4 – кондукторная втулка; 5 – ось; 6 – быстросъемная шайба; 7 – гайка

Fig. 3. Constructive conductor scheme: 1 – basis; 2 – plate; 3 – bush; 4 – jig bush; 5 – axis; 6 – quick-detachable washer; 7 – nut

Измерения смещений осей обрабатываемых отверстий проводили на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 фирмы Carl Zeiss (рис. 4).

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 $\epsilon_{ст} = 22$ мкм; длина обработки $L = 10$ мм; стойкость инструмента $T = 25$ мин; длина кондукторной втулки $L_{вт} = 13$ 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.



Рис. 4. Измерение смещений осей обрабатываемых отверстий на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 фирмы Carl Zeiss

Fig. 4. Measurement of misalignments in machined openings while using DuraMax 5/5/5 coordinate measuring machine of Carl Zeiss company

Погрешность определяли посредством системы SEMANTIC с учетом компоновки приспособления на основе размерного анализа цепи B (рис. 5) [10]

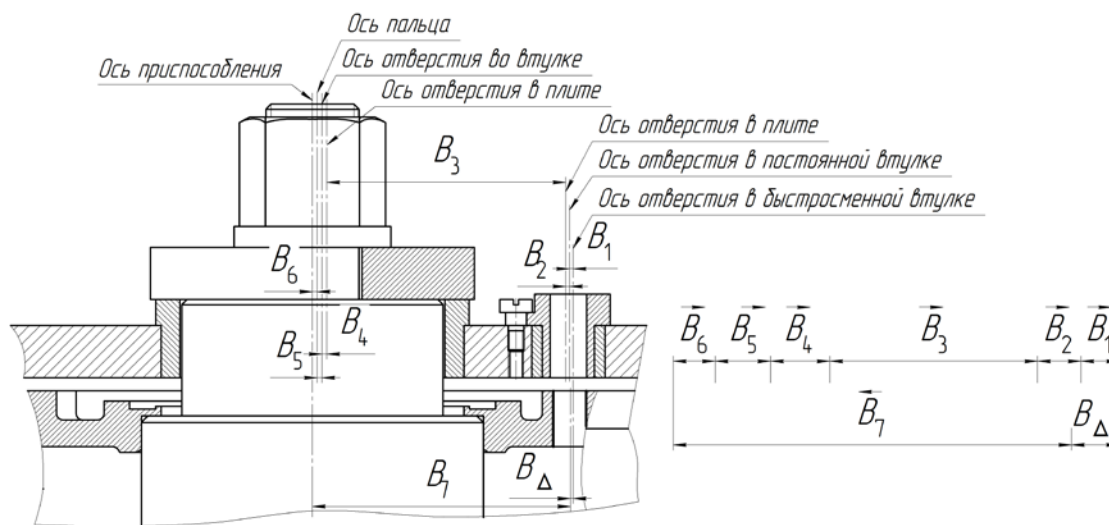


Рис. 5. Размерная цепь элементов приспособления

Fig. 5. Dimension chain of fixture elements

$$B_{\Delta} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 - B_7, \quad (1)$$

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 (1) 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 (рис. 6):

- 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 (рис. 3, поз. 3) 0,094 мм;
- эксцентricность пальца 0,007 мм.

После прямых измерений размеров соответствующих деталей были также вычислены зазоры между втулкой и пальцем (0,079 мм) и между втулкой и отверстием в кондукторной плите (0,086 мм).

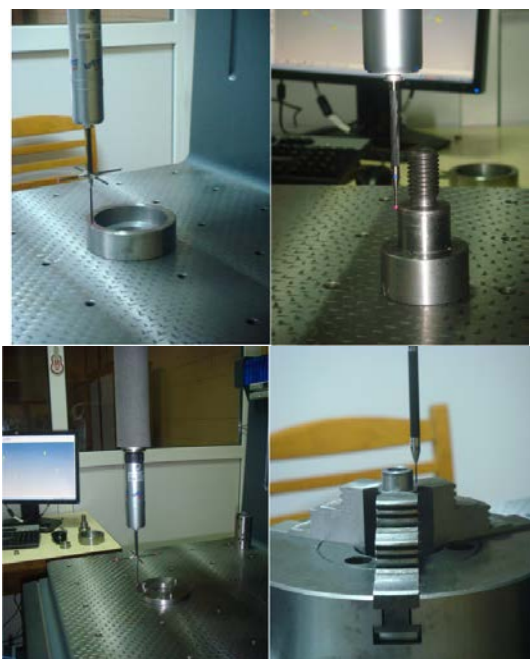


Рис. 6. Измерения геометрических параметров деталей кондуктора на координатно-измерительной машине

Fig. 6. Measurement of geometrical parameters of conductor parts while using coordinate measuring machine

Анализ погрешностей обработки

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. Наибольшее значение B_{Δ} примет при сонаправленном проявлении погрешностей, в этом случае

$$B_{\Delta}^{\max} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 - B_7 = 0,02 + 0,086 + 34,997 + 0,094 + 0,079 + 0,007 - 35 = 0,283 \text{ мм.} \quad (2)$$

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} .

Очевидно, что указанные погрешности могут быть разделены на две группы. Первая связана с установкой постоянной кондукторной втулки и включает погрешности B_1, B_2 . Вторая

включает погрешности, связанные с установкой кондукторной плиты (B_4, B_5, B_6). Значение B_{Δ}^{\min} соответствует тому случаю, когда суммарные погрешности двух указанных 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 , так как $B_4 > B_5$. Для компенсации погрешностей двух групп погрешность B_6 должна совпадать по направлению с B_4 , то есть

$$B_{\Delta}^{\min} = -B_1 + B_2 + B_3 - B_4 + B_5 - B_6 - B_7 = -0,02 + 0,086 + 34,997 - 0,094 + 0,079 - 0,007 - 35 = 0,041 \text{ мм.} \quad (3)$$

Видно, что величины B_{Δ}^{\min} и B_{Δ}^{\max} отличаются друг от друга почти в семь раз. Следует 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

$$B_{\Delta}^{\text{вср}} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + (B_7 - B_3)^2 + B_4^2 + B_5^2 + B_6^2} = \sqrt{0,02^2 + 0,086^2 + (35 - 34,997)^2 + \dots} \rightarrow 0,094^2 + 0,079^2 + 0,007 = 0,152 \text{ мм.} \quad (4)$$

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 определены ее составляющие: погрешность базирования заготовки $\varepsilon_6 = 0,025$ мм; погрешность закрепления заготовки $\varepsilon_3 = 0$; погрешность обработки $\Delta_y = 0,0003$ мм, обусловленная упругими смещениями оси концевого инструмента; погрешность обработки $\Delta_r = 0,042$ мм, обусловленная геометрическими смещениями оси концевого инструмента; погрешность $\Delta_t = 0,003$ мм, вызы-

ваемая тепловыми деформациями технологической системы; погрешность $\Delta_c = 0,022$ мм, связанная с неточностью, износом и деформацией станков; погрешность $\Delta_n = 0$, возникающая в результате размерного износа режущих инструментов.

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. Например, наибольшее значение Δ_Σ будет принимать при максимальной погрешности приспособления ($\varepsilon_n = B_\Delta^{\max}$) и при сонаправленном проявлении ее составляющих

$$\begin{aligned} \Delta_\Sigma^{\max} &= \varepsilon_6 + \varepsilon_3 + \varepsilon_n + \Delta_y + \Delta_r + \Delta_T + \Delta_c + \Delta_n = \\ &= 0,025 + 0 + 0,283 + 0,0003 + 0,042 + \\ &+ 0,003 + 0,022 + 0 = 0,3753 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (5)$$

Наименьшее значение Δ_Σ будет принимать при минимальной погрешности приспособления ($\varepsilon_n = B_\Delta^{\min}$) и при взаимной компенсации ее составляющих. Например, в случае, когда погрешность обработки, обусловленная геометрическими смещениями оси концевого инструмента, будет компенсироваться погрешностью приспособления. В результате получим

$$\begin{aligned} \Delta_\Sigma^{\min} &= \varepsilon_6 + \varepsilon_3 - \varepsilon_n - \Delta_y + \Delta_r - \Delta_T - \Delta_c + \Delta_n = \\ &= 0,025 + 0 - 0,055 - 0,0003 + 0,042 - \\ &- 0,003 - 0,022 + 0 = 0,0007 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно из представленных результатов, суммарные погрешности обработки Δ_Σ^{\max} и Δ_Σ^{\min} отличаются на несколько порядков. Данное обстоятельство показывает, 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

$$\Delta_\Sigma^{\text{вep}} = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_n^2 + \Delta_y^2 + \Delta_r^2 + \Delta_T^2 + \Delta_c^2 + \Delta_n^2}. \quad (7)$$

Как правило, на практике действительные значения погрешностей обработки оказываются меньше даже данной оценки. С учетом проведенного анализа с помощью семантической сети сопоставлены погрешности расположения осей отверстий, обрабатываемых при допусти-

мых подачах и частотах вращения сверла, и соответствующие им экспериментальные значения (рис. 7, 8).

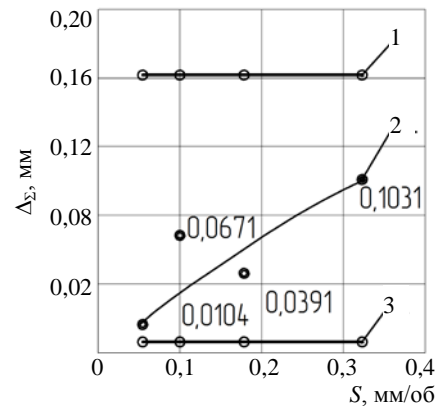


Рис. 7. Зависимость погрешности расположения осей обрабатываемых отверстий от подачи сверла при $n = 355 \text{ мин}^{-1}$: 1 – оценка суммарной погрешности программой при вероятностной погрешности приспособления $\Delta_\Sigma^{\text{вep}}$; 2 – экспериментальные данные; 3 – оценка минимальной суммарной погрешности программой Δ_Σ^{\min}

Fig. 7. Dependence diagram of error in axis location of the machined openings on drill feed at $n = 355 \text{ мин}^{-1}$: 1 – assessment of total error while using a program and with a probable fixture error $\Delta_\Sigma^{\text{вep}}$; 2 – experimental data; 3 – assessment of minimum total error Δ_Σ^{\min} while using a program

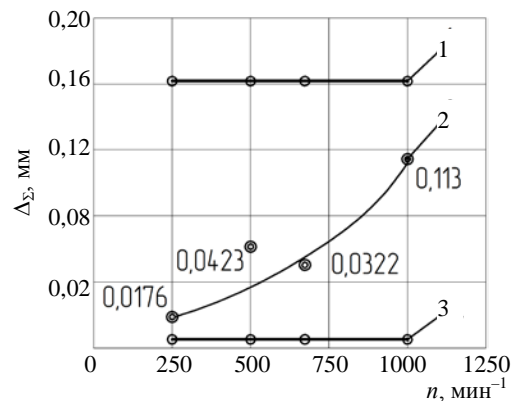


Рис. 8. Зависимость погрешности расположения осей обрабатываемых отверстий от частоты вращения шпинделя при $S = 0,32 \text{ мм/об}$: 1 – оценка суммарной погрешности программой при вероятностной погрешности приспособления $\Delta_\Sigma^{\text{вep}}$; 2 – экспериментальные данные; 3 – оценка минимальной суммарной погрешности программой Δ_Σ^{\min}

Fig. 8. Dependence diagram of error in axis location of the machined openings on spindle rotational speed at $S = 0.32 \text{ mm/rev}$: 1 – assessment of total error while using a program and with probability fixture error $\Delta_\Sigma^{\text{вep}}$; 2 – experimental data; 3 – assessment of minimum total error Δ_Σ^{\min} while using a program

Из графиков на рис. 7, 8 видно, что экспериментальные данные находятся в пределах ограничений $[\Delta_{\Sigma}^{\min} \dots \Delta_{\Sigma}^{\text{вер}}]$, полученных системой, что демонстрирует корректность ее функционирования. Вид графиков, построенных по результатам работы интеллектуальной системы, объясняется преимущественным влиянием на точность обработки погрешности приспособления и погрешности, обусловленной геометрическими смещениями оси концевой инструмента, которые не зависят от подачи и частоты вращения сверла. Данное обстоятельство подтверждает тезис о том, что задачу проектирования станочного приспособления следует рассматривать как подзадачу обеспечения точности обработки, решение которой должно учитывать действительное состояние технологического оборудования.

ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментальных исследований установлено, что действительные значения общей погрешности обработки заключены в интервале прогнозируемых системой SEMANTIC значений, что подтверждает корректность ее функционирования, а также возможность ее использования на этапе подготовки производства для прогнозирования погрешностей обработки отверстий концевым инструментом и проектирования технологической оснастки.

2. Установлено, что наибольшее влияние на точность обработки концевым инструментом оказывает погрешность приспособления.

3. Показано, что задачу проектирования станочного приспособления следует рассматривать как подзадачу обеспечения точности обработки, решение которой должно учитывать действительное состояние технологического оборудования.

4. На основе экспериментальных исследований подтверждена возможность использования подхода прогнозирования суммарной погрешности обработки, базирующегося на применении технологии функциональных семантических сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич, В. М. Управление точностью обработки деталей машин на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2012. № 1. С. 14–21.
2. Поспелов, Г. С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г. С. Поспелов. М.: Наука, 1988. 280 с.
3. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
4. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. 3-е изд. М.: Вильямс, 2010. 1408 с.

5. Искусственный интеллект: справ.: в 3 кн. / под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. Кн. 2: Модели и методы. 304 с.
6. Пашкевич, В. М. Самообучающиеся системы искусственного интеллекта в машиностроении / В. М. Пашкевич, Ж. А. Мрочек. Могилев: МГТУ, 2003. 423 с.
7. Братко, И. Программирование на языке Пролог для искусственного интеллекта / И. Братко. М.: Мир, 1990. 559 с.
8. Пашкевич, В. М. Многофакторная оптимизация параметров обработки на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Белорусско-Российского университета. 2011. № 4. С. 51–61.
9. Миронова, М. Н. Интеллектуальная система для расчета станочных приспособлений / М. Н. Миронова // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Промышленность. 2010. № 2. С. 26–33.
10. Пашкевич, В. М. Методология комплексного решения технологических задач на основе использования функциональных семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Белорусско-Российского университета. 2013. № 2. С. 95–105.

Поступила 03.03.2015

Подписана в печать 25.06.2016

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Pashkevich V. M., Mironova M. N. (2012) Accuracy Control While Machining Parts on the Basis of Semantic Network. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel], (1), 14–21 (in Russian).
2. Pospelov G. S. (1988) *Artificial Intelligence is a Basis for New Information Technology*. Moscow, Science Publ. 280 (in Russian).
3. Gavrilova T. A., Khoroshevsky V. F. (2000) *Knowledge Data Base of Intelligent Systems*. Saint-Petersburg, Piter Publ. 384 (in Russian).
4. Russell S., Norvig P. (2010) *Artificial Intelligence: a Modern Approach*. 3rd ed. New Jersey, Prentice Hall. 1408.
5. Pospelov D. A. [ed.] (1990) *Artificial Intelligence: Reference Book. Book 2: Models and Methods*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 304 (in Russian).
6. Pashkevich V. M., Mrochek Zh. A. (2003) *Self-Teaching Systems of Artificial Intelligence in Mechanical Engineering*. Mogilev, Mogilev State Technical University. 423 (in Russian).
7. Bratko I. (1990) *Prologue Programming Language for Artificial Intelligence*. Moscow, Mir Publ. 559 (in Russian).
8. Pashkevich V. M., Mironova M. N. (2011) Multiple-Factor Optimization of Machining Parameters on the Basis of Using Semantic Networks. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (4), 51–61 (in Russian).
9. Mironova M. N. (2010) Intellectual System for Design of Adaptations for Metal-Cutting Machine. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry], (2), 26–33 (in Russian).
10. Pashkevich V. M., Mironova M. N. (2013) Methods of Complex Solution of Technological Tasks by Using Functional Semantic Networks. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (2), 95–105 (in Russian).

Received: 03.03.2015

Accepted: 25.06.2016

Published online: 30.05.2017