

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.9

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-05>

EDN KAUSKN

Оригинальная статья / Original paper



Оптимизация программно-управляемой механической обработки
ответственных деталей трубопроводной арматуры

К.А. Винныйчук¹, А.А. Моисеенко², Н.Н. Подрезов¹  , С.А. Томилин¹ 

¹Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

²Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация
 NNPodrezov@mephi.ru

Аннотация. В последнее время постоянно происходит ужесточение требований к качеству трубопроводной арматуры для АЭС, объектов нефтегазового хозяйства, что связано с обеспечением ресурса их безопасной эксплуатации. При изготовлении деталей с применением технологий вычитания механообработкой особое значение придается показателям точности линейно – угловых размеров и формы поверхностей. В данном исследовании рассмотрены пути оптимизации размерной токарной обработки на примере детали «сепаратор» на многофункциональном токарно-фрезерном центре с ЧПУ MULTICUT 630/2000S. Операции проектирования и оптимизации изготовления деталей все больше определяются результатами имитационного моделирования, виртуальными моделями, которые, по сути, являются неотъемлемой частью технологических процессов. В данной работе имитационное моделирование выполнялось на тренажерах с УЧПУ Sinumerik 810/840D/Operate Turn. Эта процедура представляет собой упрощенный вариант алгоритма отсечения Вейлера–Азертонна применительно к токарной обработке снятия припуска. В дополнение к алгоритму предложены дополнительные модули динамических коррекций управляющих программ с целью гарантированного обеспечения требований конструкторской документации по точности в условиях динамической системы СПИД: станок – приспособление – инструмент – деталь. Из технологических управляющих параметров наибольшее влияние на процесс снятия припуска оказывают скорость резания, далее глубина резания и подача инструмента при токарной обработке. Модули динамических коррекций управляющих программ позволяет достаточно точно оценить влияние управляющих факторов в токарной обработке (скорости резания, глубины резания и подачи) на силу резания и точность обработки.

Ключевые слова: размерная точность, система СПИД, токарная обработка, системы с ЧПУ 810/840D/Operate, безопасность АЭС, нейросети, MULTICUT, атомное машиностроение, оптимизация, искусственный интеллект, алгоритм Вейлера – Азертонна.

Для цитирования: Винныйчук К.А., Моисеенко А.А., Подрезов Н.Н., Томилин С.А. Оптимизация программно-управляемой механической обработки ответственных деталей трубопроводной арматуры. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):52–60. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-05>

For citation: Vinniychuk K.A., Moiseenko A.A., Podrezov N.N., Tomilin S.A. Optimization of software-controlled machining of critical pipe fittings. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):52–60 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-05>

Optimization of software-controlled machining of critical pipe fittings

Kseniy A. Vinniychuk¹, Aleksey A. Moiseenko², Nikolay N. Podrezov¹ ,
Sergey A. Tomilin¹  

¹ Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

² «Atommash» the branch of «AEM-technologies» JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
 NNPodrezov@mephi.ru

Abstract. The quality requirements for pipeline fittings for NPPs and oil and gas facilities have become more stringent recently, which is related to ensuring their safe operation life. When manufacturing parts using subtractive machining technologies, special importance is attached to accuracy indicators of linear-angular dimensions and surface shapes. This study examines ways to optimize dimensional turning using the example of a “separator” part on a multifunctional CNC turning and milling center MULTICUT 630/2000S. Operations of designing and optimizing the production of parts are increasingly determined by the results of simulation modelling, virtual models, which, in fact, are an integral part of technological processes. In this work, simulation modelling is performed on simulators with CNC Sinumerik 810/840D/Operate Turn. This procedure is a simplified version of the Weiler-Atherton clipping algorithm as applied to stock removal turning. In addition to the algorithm, additional modules for dynamic corrections of control programs are proposed in order to guarantee the requirements of design documentation for accuracy in the conditions of a dynamic SPID system: machine – fixture – tool – part. The cutting speed, depth of cut and tool feed in turning have the greatest influence on the stock removal process from the technological control parameters. Modules of dynamic corrections of control programmes allow to estimate quite accurately the influence of control factors in turning (cutting speed, depth of cut and feed) on cutting force and machining accuracy.

Keywords: dimensional accuracy, SPID system, 810/840D/Operate Turn CNC, turning, nuclear power plant safety, neural networks, MULTICUT, nuclear engineering, optimization, artificial intelligence, Weiler – Atherton algorithm.

Введение

Современная обрабатывающая промышленность в атомном машиностроении требует быстрых и экономически эффективных методов проектирования и производства новой продукции небольшими партиями. В традиционном субтрактивном производстве, к которому все больше требований по обеспечению точности и эффективности, невозможно существенное улучшение обоих показателей без понимания и моделирования динамических процессов резания в системе СПИД: станок – приспособление – инструмент – деталь или предложенной в [1] ДИПС: деталь – инструмент – приспособление – станок.

Операции проектирования и оптимизации изготовления деталей все больше определяются результатами имитационного моделирования, виртуальными моделями, которые, по сути, являются неотъемлемой частью технологических процессов [2,3].

В работе рассмотрены алгоритмы дополнительных коррекций управляющих программ с целью гарантированного обеспечения требований конструкторской документации к деталям по точности в условиях динамической системы СПИД. Правильно выбранные и рассчитанные алгоритмы визуализации снятия припуска при виртуальном точении оказывают решающее значение на качество моделирования и симуляции программно – управляемой токарной обработки.

Анализ технологичности

По конструкторской документации деталь «сепаратор» (рис. 1), представляет собой цилиндрическую оболочку из стали 20ХН3А толщиной 25 мм диаметром 500 мм, перфорированную 406-тью отверстиями диаметром 18 мм. Наиболее ответственными и сложными по точности механообработки являются поверхности пазов и выемки поз. Г, Д под прокладочные материалы, обеспечивающие герметичность сепаратора с от-

ветными поверхностями ходовой части клапана арматуры.

К элементам сепаратора выноски Д, (центрирующая выемка, канавка призматическая, рис. 1), предъявляются наиболее высокие требования по размерной точности и радиальному биению (рис. 2). Следуя общим правилам и по маршрутному технологическому процессу, указанные точные поверхности выполняются токарной обработкой в последнюю очередь.

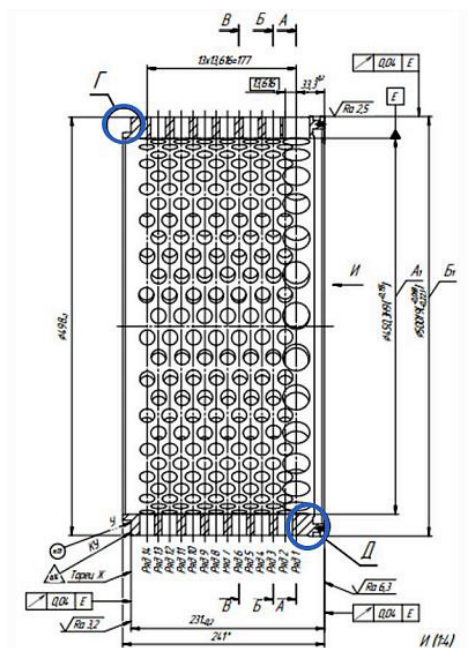


Рисунок 1. Требования по точности к детали «сепаратор»

Figure 1. Accuracy requirements for the «separator» part

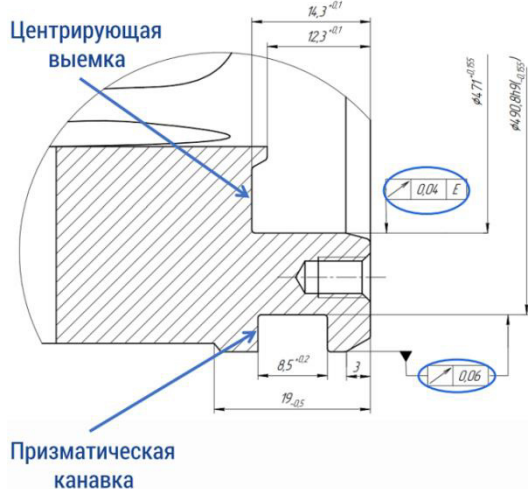


Рисунок 2. Наиболее точные поверхности сепаратора

Figure 2. The most accurate separator surfaces

Также следует учесть, что к этому моменту у перфорированного цилиндра значительно меньше момент инерции и момент сопротивления сечения¹ за счет наличия большого количества отверстий. Это приводит к резкому уменьшению жесткости сепаратора, а эквивалентная по жесткости толщина стенки сепаратора без отверстий уменьшится до значений менее 1/20 от радиуса сепаратора.

Как известно², цилиндрические оболочки с указанным соотношением относятся к тонкостенным и к ним обязательно применяются дополнительные меры повышения технологичности при механообработке. Другими словами, размерная обработка элементов, (см. рис. 2), является непростой задачей, несмотря на кажущуюся простоту, что и наблюдается на практике.

Анализ причин погрешностей в системе СПИД

Выбор решений по повышению технологичности сопряжен со следующими основными трудностями [4]:

- недетерминированностью процесса механообработки и влиянию на точность детали многих возмущений и погрешностей, возникающих в системе СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь);
- стохастичностью собственно процесса обработки по физической сущности, «нечеткости» получаемой информации, в том числе и для адаптивных систем с ЧПУ.

К этому добавим учет технологического наследования, под которым понимается явление переноса свойств объектов от предшествующих операций к последующим [5]. Сохранение переносимых свойств у объектов

¹ Галеев Г.Б., Новиков Н.Е. Определение допустимых напряжений и запасов прочности в машиностроении : учебное пособие. – Ленинград : ЛТА, 1972. 61 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007242110> (дата обращения: 28.03.2024).

² Марцулевич Н.А., Мильченко А.И., Луцко А.Н. и др. Механика : учебное пособие. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2008. – 295 с. Режим доступа: <https://technolog.edu.ru/public/userfiles/files/120/Mehanika.pdf> (дата обращения: 28.03.2024).

называется технологической наследственностью как в процессе, так и по завершению механообработки.

Возможные причины возникновения погрешностей в системе СПИД при токарной обработке заготовок представлены на рисунке 3.



Рисунок 3. Причины погрешностей в СПИД токарной обработки³
Figure 3. Causes of errors in the turning process³

Как показал эксперимент (рис. 4), наибольшее влияние на динамику процесса резания в системе СПИД оказывают режимы снятия припуска и обрабатываемый материал [6].

Значимость каждого параметра оценивалась на основе сравнения сигнала, генерируемого обученной нейронной сетью с исследуемым параметром на входе и с сигналом, генерируемым нейронной сетью без исследуемого параметра на входе. Как следует из гистограммы (рис. 4), из технологических управляющих параметров наибольшее влияние оказывают скорость резания, далее глубина резания и подача инструмента при токарной обработке.

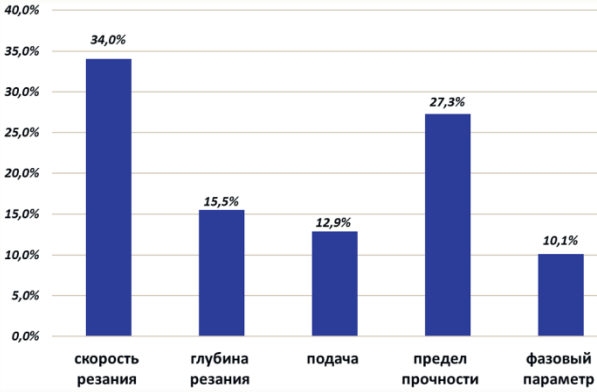


Рисунок 4. Значимость управляющих параметров при механической обработке [8]
Figure 4. Significance of control parameters in machining operations [8]

Обеспечение точности детали «сепаратор»

В рамках разработки нового техпроцесса был осуществлен переход к одностаночному варианту обработки детали. Для этого вместо ранее применявшихся горизонтально-расточного Prima, токарно-карусельного ТКВ–2000М, токарно-винторезного 1М63 применили закупленный в рамках цифровизации многофункциональный токарно-фрезерный центр с ЧПУ MULTICUT 630/2000S (рис. 5). Представляющие интерес основные технические характеристики станка приведены в таблице 1.



Рисунок 5. Токарно-фрезерный центр с ЧПУ MULTICUT 630/2000S
Figure 5. CNC turning and milling center MULTICUT 630/2000S

³ Шелихов Е.С., Сергеев А.И. Исследование погрешности токарной обработки нежёстких валов на станках с ЧПУ : методические указания. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 32 с. Режим доступа: <http://elib.osu.ru/bitstream/123456789/12459/1/Шелихов.pdf> (дата обращения: 28.03.2024).

Таблица 1. Основные характеристики MULTICUT 630**Table 1.** Main characteristics of MULTICUT 630

Технические характеристики, ед. измерения	Значения
Количество одновременно управляемых координат станка	5
Мощность двигателя главного привода, кВт	43
Диаметр обработки над направляющим, мм	1150
Максимальная длина точения, мм	2100
Расстояние между центрами станка, мм	2400
Максимальное число оборотов в минуту мин ⁻¹	12 000
Максимальная длина/масса инструмента, мм/кг	500/12
Стойка управления ЧПУ	Sinumerik 840D SL
Габариты Д x Ш x В, мм	8800/5150/3100
Масса станка, кг	20000

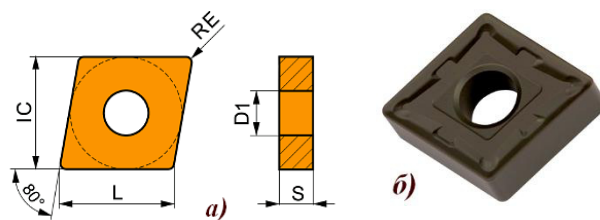
Модель MULTICUT 630/2000S оснащена контршпинделем с функцией задней бабки. Преимущества станка MULTICUT в сравнении с многостаночным вариантом для детали «сепаратор» очевидны: обработка с одного установка, сокращение итогового времени обработки более чем в 4 раза, исключение межоперационных простоев, сокращение количества инструментов и времени наладки, высокие характеристики точности станка.

Тем не менее, широко бытующее мнение, что обеспечить высокую точность обработки можно только за счет высокоточных станков является ошибочным [5]. Причина проста – кроме элемента «станок» в системе СПИД есть ещё три – приспособление, инструмент, деталь. В частности, из вышеприведенного анализа технологичности сепаратора следует, что у самой детали податливость к упругим деформациям наибольшая в системе СПИД токарной обработки. Отсюда следует вывод, что для тонкостенных оболочковых деталей требуется приспособление для увеличения жесткости детали. Одно из таких приспособлений с выносной базой и разжимными секторами приведено в российском патенте [7].

Для разработанной технологии токарной обработки на станке MULTICUT 630/2000S чешской фирмы KOVOSVIT–MAS применялся сборный инструмент со сменными неперетачиваемыми пластинами (СНП) также чешской компании PRAMET. Основные требования для инструмента с СНП – достаточная жесткость и, как следствие, обеспечение устойчивого режима снятия припуска без вибраций и автоколебаний, перегрева

зоны резания. Выбор СНП осуществляли по материалу, скорости и глубине резания, подаче инструмента – то есть по управляющим параметрам токарной обработки. Например, на рисунке 6 изображена СНП с кодировкой CNMG 190608E – M T9335 под державку PRAMET A325 – PCLNR 12 для чернового и чистового точения заготовок из конструкционной стали 20ХН3А.

Полное описание СНП состоит из двадцати характеристик, а сокращенное выглядит так: двухсторонняя негативная пластина для токарной обработки с углом 80° ромбическая, с диаметром вписанной окружности 19.05 мм, толщина $S = 6.35$ мм, радиус при вершине $RE = 0.8$ мм, точность по ISO M, стружколомающая геометрия M, закругленные режущие кромки, сплав T9335, покрытие MT-CVD, функционально-градиентный субстрат WC-Co, применение по ISO P20 – P45.

**Рисунок 6.** Сменная неперетачиваемая пластина PRAMET CNMG 190608E – M T9335

a) схематичное изображение пластины; б) 3D модель пластины.

Figure 6. Replaceable non-sharpening insert PRAMET CNMG 190608E – M T9335

a) schematic representation of the plate; b) 3D model of the plate

Таким образом, для предупреждения отказов, повышенного износа и поломки ин-

струмента важно соблюдать рекомендации, знать каталоги, маркировку и другую информацию по инструментальной продукции от фирмы-поставщика.

Имитационное моделирование

В современных станочных системах с числовым программным управлением неотъемлемым элементом технологического процесса механической обработки снятия припуска являются средства имитационного моделирования управляющих программ. Цель имитационного моделирования – визуализация и проверка управляющих программ (УП) на ошибки с последующим их устранением и перепрограммированием УП механообработки. Следовательно, функциональные возможности программ симуляторов или верификаторов УП полностью определяются библиотеками ошибок и модулями коррекций техпроцесса механообработки.

В данной работе имитационное моделирование УП выполнялось на базе тренажеров фирмы EMCO с УЧПУ Sinumerik 810/840D/Operate Turn. В традиционной комплектации программное обеспечение тренажеров позволяет решать следующие задачи:

- программирование операций токарной обработки в стандартных G/M кодах и проверку УП на синтаксические и технологические ошибки;
- визуализация 3D моделей основных узлов оборудования, инструмента, процесса формообразования детали по УП, траекторий перемещения режущей точки инструмента в рабочей плоскости станка;
- интерактивное взаимодействие пользователя с имитационной моделью процесса.

Дополнительно программировали и верифицировали токарную обработку с одного установка детали «сепаратор» выполняли в программном пакете SprutCAM v.17. Фрагмент УП в операторных кодах приведен ниже.

```
N10 G54 Cylinder
N20 CONTOUR1
N30 T=ROUGHING_T80 A f=0.35/rev
U=160m
N40 T=FINISHING_T35 A F=0.2/rev
u=225m
```

```
N50 T=DRIL_5 F=0.05/rev s=1273REV
N60 CONTOUR2
N70 T=ROUGHING_T80 A f=0.35/rev
U=160m
N80 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
F=0.18/rev
N90 CONTOUR3
N100 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
FX00.13/rev
N110 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
F0.18/rev U80m
N120 CONTOUR4
N130 T=FINISHING_T35 A F=0.18/rev
U=70m
N140 BACK_CONTOUR1
N150 T=FINISHING_T35 A F=0.1/rev
u=250m
N160 T=PLUNGE_CUTTER_3 A Tool
change pt.
N170 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
F=0.1/rev
N180 F1=5000/min X1=30
N190 Turning T=PLUNGE_CUTTER_3P
S1=4000rev
N200 RAPID X30 Z-10
```

Отметим, что в применяемых в данной работе системах имитационного моделирования изначально применяется упрощенная модель формообразования детали, основанная на допущении о постоянстве осевой симметрии детали «сепаратор». Это означает, что в системе СПИД во время токарной обработки полностью отсутствуют упругие деформации. Основные вычисления по данной методике формализованы геометрической задачей пересечения двух плоских замкнутых контуров в рабочей плоскости станка – контура (полигона) обрабатываемой детали и контура (полигона) режущего инструмента. На основе формообразующего контура, представляющего собой логическую разность при пересечении двух исходных не самопересекающихся контуров (полигонов), образуется трёхмерная поверхность моделируемой детали путём равномерного поворота формообразующего контура вокруг главной оси станка, совпадающей с осью вращения обрабатываемой заготовки в деталь. Данная процедура представляет собой упрощенный вариант алгоритма отсечения Вейлера–Азертонна применитель-

но к токарной обработке и подробно изложена в [8].

В работе изучена возможность применения алгоритма отсечения Вейлера–Азертонна для неосесимметричной детали, т.е. с изгибом оси заготовки в процессе токарной обработки, что соответствует учету сил резания и упругих деформаций в динамической системе СПИД. Это достигается моделированием обработки не в одной плоскости вращения заготовки за один оборот вращения шпинделя, а в нескольких, как показано на (рис. 7)

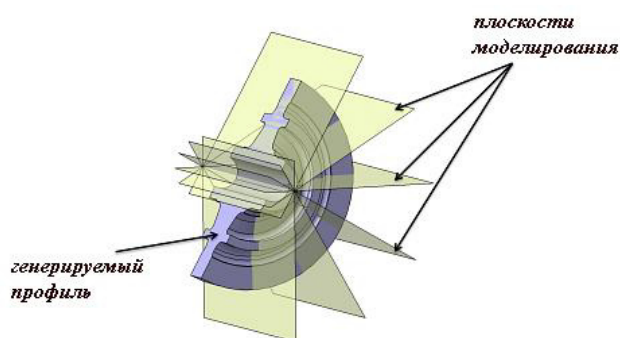


Рисунок 7. Плоскости моделирования на один оборот вращения шпинделя

Figure 7. Multiple simulation planes per spindle revolution

Моделирование заготовки, имеющей неосесимметричные элементы, требует шагов моделирования, меньших по времени, чем период вращения шпинделя, чтобы уловить изменения и сгенерировать профиль,

Рис.7, несколько раз в течение одного оборота шпинделя. Каждая из плоскостей моделирования представляет собой плоскость обработки при вращении шпинделя. Сечения инструмента и детали моделируются поликривыми, которые состоят из серии дуг и линий. Геометрии инструмента и детали пересекаются с помощью логических операций для получения условий взаимодействия в каждой плоскости моделирования. Данный подход позволяет достаточно точно оценить влияние управляющих факторов в токарной обработке (скорости резания, глубины резания и подачи) на силу резания и точность обработки.

Заклучение

В данной работе показаны пути оптимизация программно-управляемой механической обработки ответственных деталей арматуры для АЭС, объектов нефтегазового хозяйства на примере разработки технологии механообработки детали «сепаратор». Применение современных элементов системы СПИД и программно-управляемых технологий в сочетании с системами имитационного моделирования, дополненных модулями динамических коррекций управляющих программ, приводит к увеличению производительности и повышению точности механообработки станков с ЧПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кравченко П.Д. Целесообразность применения мобильного технологического оборудования при изготовлении изделий атомного машиностроения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;2(2/15):30–34. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf?ysclid=lximof354e103576396 (дата обращения: 28.03.2024).
2. Kravchenko P.D. The expediency of using mobile technological equipment in the manufacture of nuclear engineering products. *Global nuclear Security*. 2015;2(2/15):30–34. Available at: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf?ysclid=lximof354e103576396 (accessed: 28.03.2024).
3. Wang Q., Fu R., Hu Y., He J. Development of simulation platform for CNC intelligent manufacturing. In: International Conference on Control Science and Electric Power Systems. 2021. P. 184–189. Available at: <https://www.computer.org/csdl/proceedings-article/cseps/2021/261800a184/1wiQJX5GHD2> (accessed: 28.03.2024).
4. Mujber T.S., Szecsi T., Hashmi M.S.J. Virtual reality applications in manufacturing process simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, Vol. 155–156, pp. 1834–1838. Available at: <https://colab.ws/articles/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.401?ysclid=lxin4hcz69315133113> (accessed: 28.03.2024).

4. Геиценредер А.А. Мониторинг станков при интеллектуальном управлении на базе нечеткой логики. Мехатроника. Робототехника. Автоматизация: Сборник научных трудов. Выпуск № 1. Москва: МГУПИ, 2006. С. 29–35. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_9ac45f6153bb9b35ded85fdbceba0ce1/?ysclid=lxijh6wlv663594580 (дата обращения: 28.03.2024).

Geitsenreder A.A. Monitoring of machine tools with intelligent control based on fuzzy logic. Mechatronics. Robotics. Automation Collection of Scientific Proceedings. Issue No.1. Moscow: MGUPI, 2006. P. 29–35. Available at: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_9ac45f6153bb9b35ded85fdbceba0ce1/?ysclid=lxijh6wlv663594580 (accessed: 28.03.2024).

5. Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. [и др.] Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. Научное издание. Москва: Издательство МАИ, 2000. 364 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/uerasp> (дата обращения: 28.03.2024).

Dalsky A.M., Bazrov B.M., Vasiliev A.S. [et al.] Technological heredity in machine-building production. Moscow: Publishing House of MAI, 2000. 364 p. Available at: <https://elibrary.ru/uerasp> (accessed: 28.03.2024).

6. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В., Кузьмишина А.М., Аносов М.С. Искусственный интеллект и киберфизических механообрабатывающие системы в цифровом производстве. Нижний Новгород: Нижегородский ГТУ им. Р.А. Алексеева, 2020. 328 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41830023> (дата обращения: 28.03.2024).

Kabaldin Y.G., Shatalin D.A., Kolchin P.V., Kuzmishina A.M., Anosov M.S. Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital manufacturing. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.A. Alekseev, 2020. 328 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41830023> (accessed: 28.03.2024).

7. Бахно А.Л., Чуприков А.О., Курочкин В.В. Способ закрепления полых цилиндрических изделий на токарном станке. Патент 727432. Российская Федерация. СПК В23В31/40/. ПАО «Тульский оружейный завод». № 2019138088; заявл. 25.11.2019; опубл. 21.07.2019. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2727432C1_20200721 (дата обращения: 28.03.2024).

Bakhno A.L., Chuprikov A.O., Kurochkin V.V. Method of fixing hollow cylindrical products on a lathe. Pat. 727432. Russian Federation. SEC B23B31/40/. PJSC Tula Arms Factory. No. 2019138088; application no. 25.11.2019; publ. 07.21.2019. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2727432C1_20200721 (accessed: 28.03.2024).

8. Gökçe Harun – Object Modeling Based Polygon For 3D CNC Lathe Simulation Softwares. *Journal of Polytechnic*. 2016;19(2):155–161. Available at: <https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/7ba891be-e7b4-4d58-bc3a-d27cedfc688d/object-modeling-based-polygon-for-3d-cnc-lathe-simulation-softwares> (accessed: 28.03.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Винийчук К.А. – разработка методической части исследований, выполнение экспериментальных работ;

Моисеенко А.А. – организация и разработка исследовательской части и экспериментальных работ;

Подрезов Н.Н. – научное руководство проектом, обработка и анализ экспериментальных данных, подготовка заключения и результатов исследования к опубликованию;

Томилин С.А. – ресурсное обеспечение экспериментального исследования, участие в экспериментах.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Viniychuk K.A. – development of the methodological part of the research, organization and implementation of experimental work;

Moiseenko A.A. – organization and development of the research part and experimental work;

Podrezov N.N. – scientific management of the project, processing and analysis of experimental data, preparation of a conclusion and research results for publication;

Tomilin S.A. – resource support for experimental research, participation in experiments.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ксения Александровна Винийчук, студент кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: VITikafMPM@mephi.ru

Алексей Анатольевич Моисеенко, руководитель направления по механической обработке, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: moiseenko_aa@atom mash.ru

Николай Николаевич Подрезов, к.т.н., доцент кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0314-2413>

e-mail: NNPodrezov@mephi.ru

Сергей Алексеевич Томилин, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Kseniy A. Viniychuk, student, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: VITikafMPM@mephi.ru

Aleksey A. Moiseenko, head of Mechanical Processing, «Atom mash» the branch of «AEM-technologies» JSC in Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: moiseenko_aa@atom mash.ru

Nikolay N. Podrezov, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0314-2413>

e-mail: NNPodrezov@mephi.ru

Sergey A. Tomilin, Cand. Sci. (Engin.), Head of the Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Поступила в редакцию 01.04.2024

После доработки 31.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Received 01.04.2024

Revision 31.05.2024

Accepted 04.06.2024