Оригинальная статья / Original article
УДК 621.0
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-332-341

Разработка математической модели маршрута изготовления изделий машиностроения

© И.В. Фокин, А.Н. Смирнов
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – создание математической модели, описывающей процесс формирования маршрута изготовления (расцеховки) изделий машиностроения на основе 3D-модели, позволяющей снизить стоимость конечного изделия. Объектом исследования явился маршрут изготовления (расцеховка) изделий машиностроения. Для реализации работы разработанной математической модели использованы 3D-модели, спроектированные в системе Siemens NX, которые далее импортируются в формат *stp и распознаются спроектированным модулем, написанным на языке программирования Phyton. Определены взаимосвязи производственной среды, оказывающие влияние на формирование маршрута изготовления изделий машиностроения. Разработана схема алгоритма взаимосвязи «конструктивный элемент – технологическая операция – средства технологического оснащения (оборудование-инструмент)». По результатам тестирования сформированной математической модели установлено, что использование нейросетей как инструмента для реализации и автоматизации работы инженера-технолога при разработке маршрута изготовления изделий машиностроения имеет ряд преимуществ перед стандартной схемой работы, это снижение времени на разработку маршрута и снижение себестоимости разработки конечного изделия. К основному ограничению использования на практике разработанной модели можно отнести слишком сложную геометрию некоторых конструктивных элементов, входящих в состав детали, что не позволяет составить алгоритм распознавания их структуры. Использование прототипа нейросети в автоматическом режиме целесообразно для относительно простых деталей (имеющих в своем составе отбортовку, отверстие, фаску, скругление). Но так как количество простых с точки зрения распознавания деталей может достигать 40% среди номенклатуры изготавливаемых деталей, то и уменьшение времени разработки технологического процесса по сравнению с традиционным будет составлять 10–25% от общего времени технологической подготовки.

Ключевые слова: технологический процесс, маршрут изготовления, формализация данных, 3D-модель, нейронные сети

Для цитирования: Фокин И.В., Смирнов А.Н. Разработка математической модели маршрута изготовления изделий машиностроения. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2021. Т. 25. № 3. С. 332–341. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-332-341

A mathematical model for production routing of mechanical engineering products

Igor V. Fokin, Anton N. Smirnov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim was to create a mathematical model describing the development of a production (shop-to-shop) routing of mechanical engineering products based on a 3D model and allowing the cost of the final product to be reduced. The developed mathematical model was simulated based on 3D models designed in the Siemens NX system, which were subsequently imported into the *stp format and recognized by a designed module written in the Phyton programming language. The factors of the production environment affecting the formation of the production routing of mechanical engineering products were determined. A diagram of the algorithm for the “constructive element - technological operation - means of technological equipment (equipment-tool)” relationship was developed. Based on the results of testing the developed mathematical model, the use of neural networks as a tool for the implementation and automation of the work was found advantageous as compared to the standard scheme of work of a process engineer when developing a production routing of mechanical engineering products. These advantages include a decrease in the time for the development of a routing and the cost of the final product. The developed model has a practical limitation consisting in a rather complex geometry of some structural elements of a unit, which impedes the development of an algorithm for recognizing their structure. The use of a neural network prototype in automatic mode is advisable for relatively simple parts (including a

flange, hole, chamfer and rounding). However, since the number of simple units from the recognition point of view amounts to about 40% among the nomenclature of manufactured units, the reduction in the development time of the technological process in comparison with the conventional approach comprises only 10–25% of the total time of technological preparation.

Keywords: technological process, manufacturing route, data formalization, 3D model, neural networks

For citation: Fokin IV, Smirnov AN. A mathematical model for production routing of mechanical engineering products. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3)332–341. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-332-341

ВВЕДЕНИЕ

Этап конструкторской подготовки производства и непосредственно само производство автоматизированы в достаточной мере. Наибольшее количество возможностей для внедрения цифровых технологий и автоматизации представляется сейчас на этапе технологической подготовки производства, так как, несмотря на огромную базу знаний, выработанную годами, сформированный маршрут изготовления считается одним из наиболее трудноформулируемых задач, стоящих перед технологической подготовкой производства (ТПП) [1].

Для решения этого вопроса пока еще не существует смоделированного математического аппарата, строгих формальных методик, а результат решения в большей мере зависит от творческой интуиции, инженерных знаний и производственного опыта формирующих его специалистов-технологов.

Проектирование технологического процесса изготовления детали можно представить в виде двух самостоятельных этапов:

1) анализ исходных данных для проектирования технологических процессов;

2) непосредственное проектирование технологического процесса.

На первом этапе предварительно предстоит проанализировать исходную информацию, которая требуется для дальнейшего формирования технологического процесса.

Первоначальными исходными данными для технолога являются рабочая конструкторская документация (КД) детали и технические требования (ТТ) на ее изготовление, регламентирующие параметры точности, параметры шероховатости и остальные предъявляемые к качеству изделия требования; далее необходим сборочный чертеж узла, в котором показана ориентация детали относительно других, технические условия (ТУ) на сборку; объем годового выпуска изделий. Для формирования технологического процесса изготовления детали изначально требуется проанализировать ее функции и конструкцию, которые она будет выполнять в узле, механизме, машине, оценить технологичность конструкции и проанализировать чертеж. Рабочий чертеж изделия должен иметь в своем составе всю необходимую информацию для точного и исчерпывающего понимания о своей структуре и назначении, а также при последующем изготовлении и контроле заданных параметров. Под технологичностью конструкции детали понимается набор свойств какой-либо конструкции, обеспечивающий ее наиболее экономичное изготовление. Технологичность в обязательном порядке рассматривается с учетом условий конкретного производства, анализируются характерные черты конструкции и требования, предъявляемые к качеству, как исходные данные возможного способа изготовления изделия в данных условиях. Рассматриваются возможные трудности по обеспечению качественных параметров поверхности, а именно: шероховатость, размеры, форма и расположение поверхностей при использовании оборудования, инструментов, приспособлений и метрологических средств. Следующим шагом необходимо обратить внимание на конфигурацию изделия и его размерные соотношения детали, проанализировать, насколько обоснованно были определены параметры точности, определить возможность незначительных корректировок, не оказывающих влияние на качественные характеристики детали, но облегчающих ее последующее изготовление.

Для формирования маршрута изготовления рассматриваются специальные ТТ (тер-

мическая обработка, подгонка массы и т.д.), определяется их выполнение в технологическом процессе и место контроля. Ревизии утверждают в установленном организационном порядке и вносят в рабочие чертежи и ТТ на изготовление изделия. Анализ условий работы детали в узле позволяет определить требования к материалу для изготовления детали и сформировать условия его выбора, предварительно наметить систему мероприятий, направленных на повышение эксплуатационной стойкости детали. Анализ программы (объема) выпуска продукции позволяет определить тип производства, который является основой для выбора заготовки и метода ее изготовления[1] [2–4]. Метод изготовления заготовки определяется исходя из снижения затрат в последующем на готовую деталь для заложенной программы выпуска. Чем ближе форма и размеры заготовки к форме конечного изделия, тем она будет дороже в своем изготовлении, но станет дешевле и проще ее дальнейшая обработка при высоком коэффициенте использования материала. На следующем этапе, после предварительного рассмотрения исходных данных, инженер-технолог переходит к написанию технологического процесса, включающего в себя разработку маршрутной (формирование состава операций и потребного технологического оснащения) и операционной технологии (создание структуры операций и разработка технологических расчетов) обработки деталей.

Основной принцип разработки ТП – выбор необходимых данных из нормативных документов либо формирование на основе опыта инженера-технолога операций, оборудования и материалов, инструмента и исполнителей.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Повышение уровня конструкторско-технологической подготовки производства на всех этапах жизненного цикла изделия. Увеличение показателей кастомизации предприятия за счет формализации базы данных (БД) и базы знаний (БЗ) для повышения конкурентоспособности производимого изделия, а также совершенствования существующих и создания новых технологических процессов изделий машиностроения требуемого качества с минимальными затратами труда, материальных и энергетических ресурсов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В предложенном варианте исходными данными является конструктивный электронный макет (КЭМ) детали с определенным набором конструктивных элементов, сформированный на предыдущем этапе оценки технологических показателей конструкции листовой детали (рис. 1).

Проработка спроектированной конструкции детали на параметры технологичности происходит путем подстановки вариантов технологических процессов ее изготовления.

Процедура выбора технологической операции (ТО) базируется на анализе состава конструктивных элементов, которые, в свою очередь, определяют структуру конструкции детали с последующим сопоставлением с нормированием каждой операции.

При традиционном подходе по технологии создания КЭМ изделия формирование состава конструктивных элементов выполняется на основе выбора типовых элементов, разрабатываемых на данном предприятии, которые хранятся в электронной библиотеке собственных типовых конструктивных элементов для разных конфигураций деталей[2,3] [5–13].

---

[1]Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019665155. Модуль распознавания конструктивных JeLEMENTOV машиностроения / И.В. Фокин, А.Н. Смирнов. Правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 14.11.2019; опубл. 20.11.2019.

[2]ГОСТ 2.051-2013. Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения. Введ. 01.06.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 9 с.

[3]ГОСТ 2.052-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. 28.02.2006. М.: Стандартинформ, 2007. 11 р.

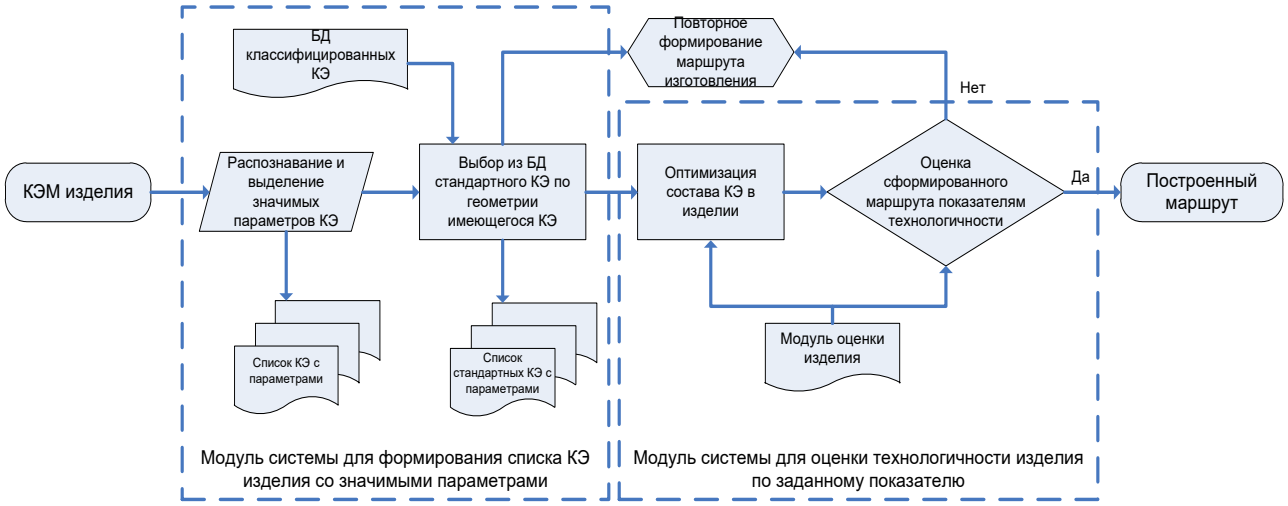


Рис. 1. Последовательность формирования информационной модели формирования маршрута
Fig. 1. Formation sequence of the route making information model

Отработка спроектированного варианта конструкции изделия на показатели технологичности производится способом подбора нескольких вариантов технологических процессов ее изготовления, в состав которой входит выбор используемого оборудования, средств технологического оснащения, инструмента и т.д.

В качестве объекта технологического процесса была выбрана деталь заготовительно-штамповочного производства, так как именно данный вид производства дает возможность сделать детали более легкими при сохранении прочности, помимо этого оцифровать в наиболее полной мере.

Концепцию качественной оценки изделия можно условно разделить на 2 этапа:

– анализ геометрических параметров конструктивных элементов, входящих в набор структурных показателей изделия;

– сравнение возможностей имеющегося набора производственного базиса для изготовления заданных конструктивных элементов и изделий целиком.

Идея анализа изделия строится на предположении, что любое изделие (диафрагмы, стенки, уголки и т.д.) можно формализовать в виде набора конструктивных, связанных определенным образом и обладающих своим набором, характеристик.

Далее для обеспечения возможности однозначного определения изделия через его конструктивные элементы была предложена структура классификатора возможных конструктивных элементов.

Следует отметить, что перечень конструктивных элементов (КЭ) на самом деле достаточно велик, и здесь приведен типовой перечень только для отбортовки.

Такое представление детали через набор конструктивных элементов достаточно для понимания человеком, но недостаточно для автоматизированного распознавания программным методом, так как само понятие «конструктивный элемент» является эмпирическим.

Электронная модель изделия представлена в виде иерархической структуры, изображенной на рис. 2.

При этом конструктивные элементы однозначно определяются через графовый набор «ребра-поверхности», где ребра 3D-модели выступают в роли вершин графа, а поверхности 3D-модели – в роли ребер графа.

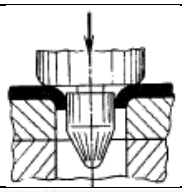
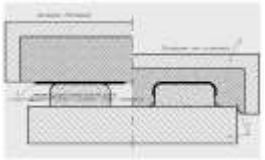
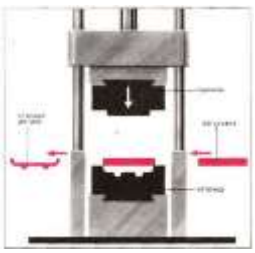
После распознавания конструктивных элементов идет этап составления маршрутной карты технологических операций их получения, а также подбор необходимого оборудования.

Реализация этого этапа возможна несколькими способами. Первый, линейный, подразумевает постановку в соответствие каждому конструктивному элементу операцию его получения и используемое оборудование. Результаты такого соответствия представлены в таблице.

Рис. 2. Электронное представление 3D-модели изделия
Fig. 2. Electronic representation of the product 3D model

Второй способ – это создание рекуррентной нейронной сети в качестве механизма соединения пространства конструктивных элементов с пространством технологических операций. Такой подход позволяет составлять маршрутную карту технологических операций, но делает это не самым оптимальным способом: не учитывает особенности конкретного элемента и их сочетания [14–20].

Таблица отношений типовых элементов технологической подготовки с конструктивными элементами деталей из листового полуфабриката
Correspondence table of typical elements of technological preparation and structural elements of parts made of semi-finished sheet products

Код конструктивных элементов	Наименование конструктивных элементов детали	Технологическая операция	Средство технологического оснащения / инструмент	Оборудование	Схема выполнения операции
01	Отбортовка на плоской поверхности. Отбортовка на криволинейной поверхности. Отбортовка глухая на плоской поверхности. Отбортовка глухая на криволинейной поверхности	**2138** отбортовка	инструментальный штамп	пресс гидравлический	
02		**2180** штамповка эластичными средами (жидкостью, резиной, полиуретаном)	формблок	пресс гидравлический	
03		формовка	свинцово-цинковый штамп	листоштамповочный молот	

Отличие нейронных сетей с прямой связью от сетей RNN (англ. Recurrent neural network) заключается в том, что RNN нейросети могут использовать свою внутреннюю память (состояние) для последовательной обработки входных данных. Это преимущество позволяет им заниматься такими задачами, как несегментированное, связанное распознавание рукописного ввода или распознавание голосовой речи. Другие же нейронные сети имеют все независимые друг от друга входы. Но в RNN все входы связаны друг с другом. Схема такой нейросети представлена на рис. 3.

Так как в нашем случае входными данными является последовательность конструктивных элементов детали, а на выходе мы ожидаем получить маршрутную карту технологических операций, то есть тоже некую последовательность, то такая модель наиболее хорошо подходит для решения поставленной задачи.

Применение разработанной системы на примере окантовки представлено ниже.

В состав конструктивных элементов окантовки входит 1 отбортовка типа 1 по ГОСТ 17040-80[4].

На рис. 5 представлены результаты работы модуля распознавания конструктивных элементов.

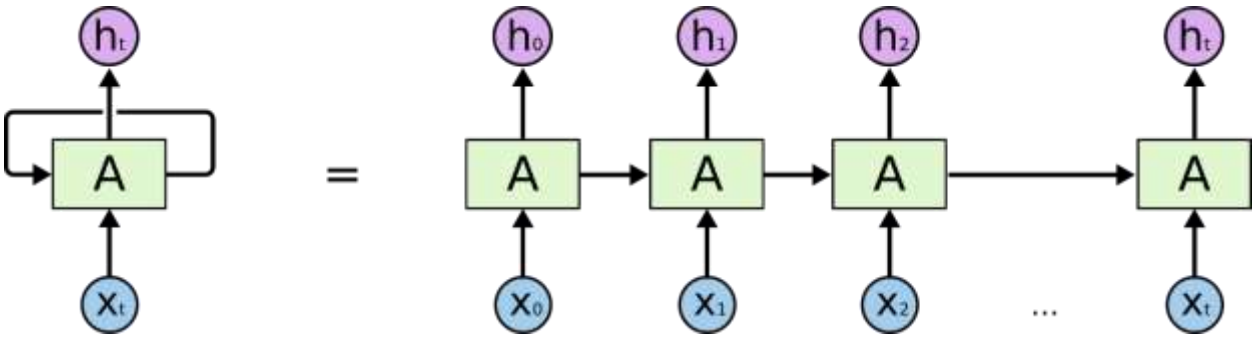


Рис. 3. Структура рекуррентной нейросети
Fig. 3. Structure of the recurrent neural network

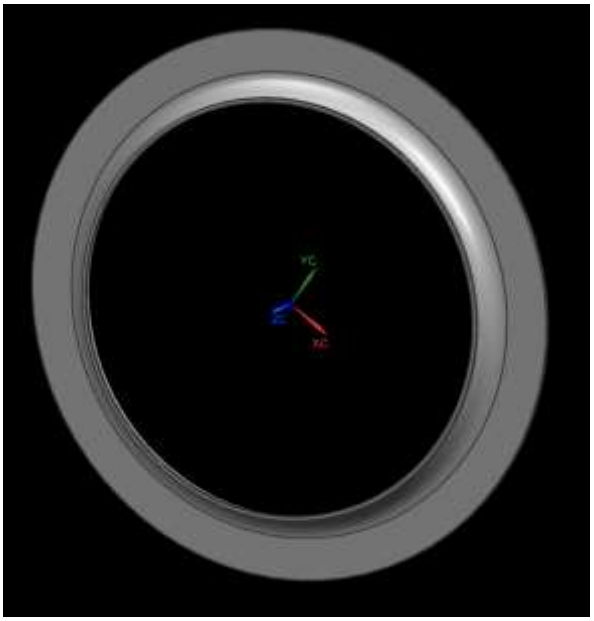


Рис. 4. Деталь типа «Окантовка»
Fig. 4. "Edging" type part

[4]ГОСТ 17040-80. Элементы штампуемых деталей. Конструкция и размеры. Введ. 01.07.1981. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1990.

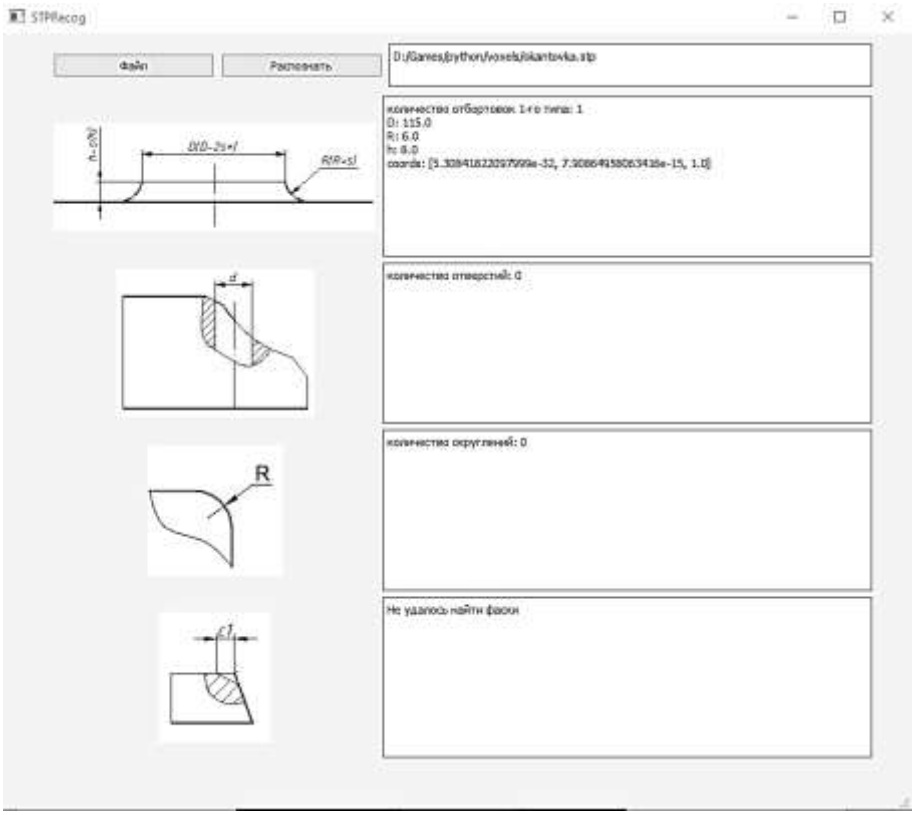


Рис. 5. Распознавание конструктивных элементов окантовки
Fig. 5. Recognition of edging structural elements

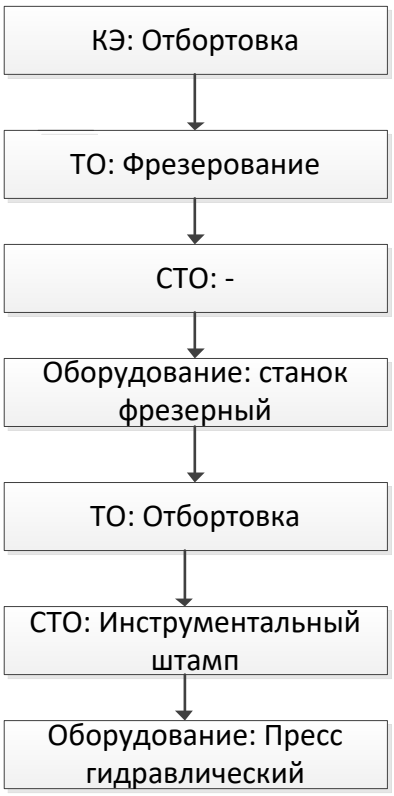


Рис. 6. Маршрут изготовления окантовки
Fig. 6. Manufacturing route of edging

Единственный конструктивный элемент был определен корректно.

По конструктивным элементам можно построить маршрут выполнения технологических операций, рис. 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам апробации математической модели можно сделать вывод, что из-за невозможности распознать некоторые конструктивные элементы ее применение в полном автоматизированном режиме целесообразно для относительно простых деталей. В данном случае это окантовки и уголки. Но ввиду того, что количество простых с точки зрения распознавания деталей преобладает среди штампованных в составе узла, то и уменьшение времени разработки технологического процесса по сравнению с традиционным подходом происходит существенное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактически использование математической модели в полуавтоматическом режиме,

то есть без использования алгоритма распознавания конструктивных элементов, но с применением алгоритма генерации маршрутной карты, может быть целесообразно для сложных деталей. Это обусловлено тем, что затрачиваемое на определение конструктивных элементов время, необходимое на составление операций, подбор средств технологического оснащения и оборудования, составляет около 20% от всей технологической подготовки производства, что в денежном эквиваленте будет означать снижение общей стоимости конечного изделия примерно на 7–10%, к примеру при стоимости изделия 96,4 млн $ (на примере МС-21) экономический эффект составит 7–10 млн $. Все это позволяет сформировать маршрут изготовления изделий машиностроения требуемого качества с минимальными затратами труда, материальных и энергетических ресурсов.

Список литературы

1. Govorkov A.S. Technique of designing of the product of aviation technics with maintenance of the set criteria of adaptability to manufacture // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies. 2011. Vol. 5. Part. 3. P. 156–161.
2. Govorkov A., Zhilyaev A. The estimation technique of the airframe design for manufacturability // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 124. Iss. 1. P. 012014. https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012014
3. Малыгин А.Н. Модернизация предприятий судостроения и судоремонта на основе внедрения автоматизированных информационных технологий // Juvenis Scientia. 2017. № 7. С. 26–29.
4. Lychagin D.V., Walter A.V., Arkhipova D.A., Lasukov A.A. Systematic classifier of manufacturing processes for medium size shafts // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 125. P. 012030. https://doi.org/10.1088/1757-899X/125/1/012030
5. Бурмистров Е.Г., Михеев Т.А. Проблемы внедрения автоматизированных систем управления проектами на судостроительных и судоремонтных предприятиях // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. Вып. 52. С. 73–79.
6. Rabinskiy L.N., Ripetskiy A.V., Zelenov S.V., Kuznetsova E.L. Analysis and monitoring methods of technological preparation of the additive production // Journal of Industrial Pollution Control. 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://www.icontrolpollution.com/articles/analysis-and-monitoring-methods-of-technologicalpreparation-of-the-additive-production.php?aid=86082&view=mobile (12.03.2020).
7. Svetlík J., Baron P., Dobránsky J., Kočiško M. Implementation of computer system for support of technological preparation of production for technologies of surface processing // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 613. P. 418–425. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.613.418
8. Burdo G.B. Improving the technological preparations for manufacturing production // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. Iss. 1. P. 49–56. https://doi.org/10.3103/S1068798X17010051
9. Tkachev A.A., Ivanenko Yu.G., Zarubin V.V., Olgarenko I.V. Automation of water distribution man-agement during the reconstruction of main irrigation canals // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 537. Iss. 3. P. 032070. https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032070
10. Зяблов О.К., Фунтикова Е.В. Автоматизация технологической подготовки судоремонтного производства // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2014. № 38. С. 49–53.
11. Сахаров В.В., Кузьмин А.А., Чертков А.А. Алгоритм принятия оптимальных решений в судоремонте с применением матрицы Крылова // Вестник государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С.О. Макарова. 2014. № 3. С. 81–89.
12. Зяблов О.К., Кочнев Ю.А. Разработка системы автоматизированного проектирования технологических процессов ремонта судов внутреннего плавания // Речной транспорт (XXI век). 2017. № 2. С. 43–45.
13. Reş M.-D., Bresfelean V.P. Means to enhance the performance of ERP systems' personalized production modules // Emerging Markets Queries in Finance and Business. 2014. Vol. 15. P. 262–270. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00499-7
14. Grechishnikov V.A., Khusainov R.M., Akhkiyamov D.R., Yurasov S.Yu., Yurasova O.I. Identifying the primary rigidity axes in the elastic system of a metal-cutting machine // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 8. P. 673–676. https://doi.org/10.3103/S1068798X16080104
15. Khusainov R.M., Sharafutdinov I.F. Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using UNIGRAPHICS NX // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 134. No. 1. P. 012042. https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012042
16. Krastyaninov P.M., Khusainov R. Selection of equipment for machining processing of parts using NX and TEAMCENTER programs // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 134. No. 1. P. 012041. https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012041
17. Говорков А.С., Жиляев А.С. Практическое применение «Системы анализа технологичности» при проведении технологического контроля изделия авиационной техники // Труды Московского авиационного института. 2014. № 74. P. 21.
18. Subrahmanyam S., Wozny M. An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided

process planning // Computers in industry. 1995. Vol. 26. P. 1–21.
19. Akhatov R., Govorkov A., Zhilyaev A. Software solution designing of «The analysis system of workability of industrial product» during the production startup of aeronautical products // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No. 21. P. 42560–42562.
20. Говорков А.С., Ахатов Р.Х. Анализ технологичности изделия авиационной техники на основе информационного образа изделия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 6. С. 285–292.

References

1. Govorkov AS. Technique of designing of the product of aviation technics with mainte-nance of the set criteria of adaptability to manufacture. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies*. 2011;5(3):156–161.
2. Govorkov A, Zhilyaev A. The estimation technique of the airframe design for manufac-turability. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;124(1):012014. https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012014
3. Malygin AN. Modernization of enterprises of shipbuilding and ship repair based on the implementation of automated information technology. *Juvenis Scientia*. 2017;7:26–29.
4. Lychagin DV, Walter AV, Arkhipova DA, Lasukov AA. Systematic classifier of manu-facturing processes for medium size shafts. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;125:012030. https://doi.org/10.1088/1757-899X/125/1/012030
5. Burmistrov EG, Mikheyeva TA. The question of the implementation of automated project management systems in the shipbuilding and ship repair enterprises. *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta = Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2017;52:73–79. (In Russ.)
6. Rabinskiy LN, Ripetskiy AV, Zelenov SV, Kuznetsova EL. Analysis and monitoring methods of technological preparation of the additive production. *Journal of Industrial Pollution Control.* 2017. Available from: https://www.icontrolpollution.com/articles/analysis-and-monitoring-methods-of-technologicalpreparation-of-the-additive-production.php?aid=86082&view=mobile [Accessed 12th March 2020].
7. Svetlík J, Baron P, Dobránsky J, Kočiško M. Implementation of computer system for support of technological preparation of production for technologies of surface processing. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;613:418–425. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.613.418
8. Burdo GB. Improving the technological preparations for manufacturing production. *Russian Engineering Research*. 2017;37(1):49–56. https://doi.org/10.3103/S1068798X17010051
9. Tkachev AA, Ivanenko YuG, Zarubin VV, Olgarenko IV. Automation of water distri-bution management during the reconstruction of main irrigation canals. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2019;537(3):032070. https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032070
10. Zyablov OK, Funtikova EV. Automation of technological preparation of ship repair production. *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta*. 2014;38:49–53. (In Russ.)
11. Saharov VV, Kuz'min AA, Chertkov AA. Adopting optimal decisions with application Krylov matrix algorithm in ship-repair companies. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova*. 2014;3:81–89. (In Russ.)
12. Zyablov O, Kochnev Y. The creation of automatic system for projecting technological processes of repairing river ships. *Rechnoj transport (XXI vek) = River transport (XXIst century).* 2017;2:43–45. (In Russ.)
13. Reş M-D, Bresfelean VP. Means to enhance the performance of ERP systems' per-sonalized production modules. *Emerging Markets Queries in Finance and Business*. 2014;15:262–270. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00499-7
14. Grechishnikov VA, Khusainov RM, Akhkiyamov DR, Yurasov SYu, Yurasova OI. Identifying the primary rigidity axes in the elastic system of a metal-cutting machine. *Russian Engineering Research*. 2016;36(8):673–676. https://doi.org/10.3103/S1068798X16080104
15. Khusainov RM, Sharafutdinov IF. Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using UNIGRAPHICS NX. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;134(1):012042. https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012042
16. Krastyaninov PM, Khusainov R. Selection of equipment for machining processing of parts using NX and TEAMCENTER programs. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;134(1):012041. https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012041
17. Govorkov AS, Zhilyaev AS. Practical application of "Manufacturability analysis system" during the control of aircraft elements manufacturability. *Trudy Moskovskogo aviacionnogo instituta*. 2014;74:21. (In Russ.)
18. Subrahmanyam S, Wozny M. An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided process planning. *Computers in industry*. 1995;26:1–21.
19. Akhatov R, Govorkov A, Zhilyaev A. Software solution designing of «The analysis system of workability of industrial product» during the production startup of aeronautical products. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(21):42560–42562.
20. Govorkov AS, Akhatov RH. Analysis of product manufacturability aviation technology-based image information products. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2011;13(6):285–292. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фокин Игорь Владимирович,
ассистент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: fokiniv@ex.istu.edu

Смирнов Антон Николаевич,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: horror512@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Fokin,
Assistant Professor of the Department of Aircraft Engineering and Operation of Aviation Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: fokiniv@ex.istu.edu

Anton N. Smirnov,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: horror512@yandex.ru

Заявленный вклад авторов
Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье
Статья поступила в редакцию 02.04.2021; одобрена после рецензирования 11.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

Contribution of the authors
The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests
The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article
The article was submitted 02.04.2021; approved after reviewing 11.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.