

DOI: 10.18721/JEST.240111
УДК 65.011.56

И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, П.И. Романов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Описана модель автоматизации технологической подготовки мелкосерийного и единичного типов производства. На основе описанной модели производится определение оптимального варианта технологического маршрута обработки партии деталей, сроков их изготовления, величины переменных затрат, оптимальных технологических параметров процесса обработки и управление запасами склада, а также формирование номенклатуры и количества необходимых средств производства. Моделирование производится на основе математических моделей по управлению запасами склада (комбинированная модель) и определению величины переменных затрат и нормы оперативного времени. Определение оптимального варианта производится на основе многокритериального анализа с использованием метода «идеальной точки» по трем параметрам: величина переменных затрат на изготовление партии деталей, минимальные сроки изготовления партии деталей, длительность изготовления партии деталей.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА; СРЕДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ; РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ; ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ОБРАБОТКИ; ЦЕХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.

Ссылка при цитировании:

И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, П.И. Романов. Автоматизация технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 113–121. DOI: 10.18721/JEST.240111.

I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrow, P.I. Romanov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION IN SINGLE-UNIT AND SMALL-BATCH MANUFACTURING

We have described a model of automation of technological preparation of production in single-unit and small-batch manufacturing. The model described allows to estimate the optimal technical route for processing a batch of components, production time, variable costs, optimal technological parameters of processing, to form a nomenclature and the number of necessary means of production, to manage warehouse stocks. Simulation is performed based on mathematical models for warehouse stock management (a combined model) and for determining the value of variable costs and the standard operational time. The definition of opti-

mal variance is based on multicriteria analysis using the method of ideal point by three parameters: amount of variable costs, production time and duration of production.

AUTOMATION OF PRODUCTION; MEANS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT; CUTTING MODES; TECHNOLOGICAL ROUTE OF PROCESSING; MECHANICAL WORKSHOP.

Citation:

I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrow, P.I. Romanov, Automation of technological preparation of production in single-unit and small-batch manufacturing, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 113–121, DOI: 10.18721/JEST.240111.

Технологическая подготовка производства — один из важнейших этапов процесса по выпуску изделий, которая в зависимости от сложности их конструкции может занимать значительную часть времени от длительности всего производственного цикла. Согласно ГОСТ 14.004–83 под технологической подготовкой следует понимать совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства. К одному из основных этапов технологической подготовки относятся построение оптимальных технологических маршрутов обработки, выбор параметров процесса резания (скорость резания, подача, глубина резания) и средств технологического оснащения (технологическое оборудование, режущий инструмент, установочно-зажимные приспособления).

Автоматизация производственных процессов, в том числе и технологической подготовки производства, способствует повышению эффективности работы и конкурентоспособности предприятия. В современных условиях автоматизация является одним из основных направлений оптимизации производственных процессов [1].

Процесс автоматизации технологической подготовки производства, описанный в научной литературе [2–11], в большинстве случаев базируется на принципе типизации конструкторских элементов и технологических процессов. В условиях мелкосерийного и единичного производства данный принцип не эффективен вследствие больших затрат на выполнение подготовительных работ (разработка классификаторов, типовых и групповых процессов и их элементов) [12].

В научной литературе с помощью автоматизации процесса технологической подго-

товки производства решаются следующие задачи: выбор экономически целесообразного варианта на основе анализа предельных затрат; прогноз себестоимости и производительности изготовления продукции; формирование базы знаний; управление рисками; поиск альтернативных вариантов изготовления деталей; выбор технологического метода изготовления деталей. Известные модели технологической подготовки производства не рассматривают вопросы управления производственными запасами, которые требуют решения следующих задач:

контроля за наличием ресурсов (средств производства), необходимых для производственного процесса по изготовлению деталей; определения оптимальной величины партий поставок и сроков поставки ресурсов для исключения их дефицита на складе.

Постановка задачи исследования

Цель данной работы — проектирование участка механической обработки в структуре судоремонтного предприятия. Проектируемый участок механической обработки предназначен для изготовления как деталей, необходимых для ремонта судов, так и продукции по кооперации в условиях мелкосерийного и единичного производства.

В судоремонтном производстве лишь незначительная часть времени (около 15 %) затрачивается инженером-технологом на принятие решения, а остальное — на поиск нужной информации и оформление документации [13]. Таким образом, задачей нашего исследования является разработка модели, позволяющей сократить длительность технологической подготовки производства в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Описание производственного участка

При проектировании участка механической обработки в структуре судоремонтного предприятия ориентировались на непоточный метод организации производства.

Для решения поставленных технологических задач были выбраны следующие виды технологического оборудования:

- 1) универсальный токарный станок с числовым программным управлением SE1020 РМЦ 8000 (2 шт.);
- 2) горизонтальный фрезерно-расточной станок TOS VARNSDORF 110;
- 3) токарно-винторезный станок мод. 1В625МП РМЦ2000;
- 4) горизонтально-фрезерный станок с ЧПУ X6150;
- 5) круглошлифовальный станок M1450;
- 6) настольный сверлильный станок JET JDP-8L.

При планируемых объемах работ по ремонту судов загрузка производственных мощностей механического цеха оказывается неполной, что будет компенсировано изготовлением деталей по кооперации. Номенклатура деталей, изготавливаемых по кооперации, определяется техническими возможностями и загрузкой технологического оборудования.

Модель технологической подготовки производства в условиях мелкосерийного и единичного типов производства.

Разрабатываемая модель технологической подготовки мелкосерийного и единичного типов производства решает следующие задачи:

1. Формирование допустимых вариантов технологических маршрутов обработки партии деталей.
2. Формирование перечня средств производства, необходимых для изготовления партии деталей.
3. Определение оптимальных технологических параметров процесса обработки (скорость резания, подача, глубина резания).

4. Определение размера партии и ритма поставки необходимых ресурсов.

5. Определение сроков изготовления партии деталей и величины переменных затрат.

6. Выбор оптимального технологического маршрута изготовления партии деталей.

Схема разрабатываемой модели технологической подготовки производства представлена на рис. 1.

Описание этапов моделирования

Разрабатываемую модель технологической подготовки производства можно разделить на три этапа.

Первый этап основан на применении модульного принципа в машиностроении, под которым понимают построение различных технических систем с разнообразными характеристиками путем компоновки их из типовых модулей ограниченной номенклатуры [14].

На первом этапе моделирования решаются следующие задачи:

1. Анализ конструкции детали и определение технологических задач (точность размеров, чистота поверхности, физико-механические свойства).

2. Формирование множества модулей поверхностей (МП), образующих контур детали. Выбор моделей поверхностей для описания контура детали производится из множества стандартных МП, для которых определены оптимальные методы формообразования и технологические параметры процесса резания.

3. Определение допустимых методов обработки каждого модуля поверхностей в зависимости от типа и технических характеристик имеющегося технологического оборудования.

4. Формирование модулей операций (МО) и определение комплектов режущего инструмента для каждого МО. Формирование допустимых вариантов модулей поверхностей производится на основе различных сочетаний МП.

Схема первого этапа моделирования представлена на рис. 2.

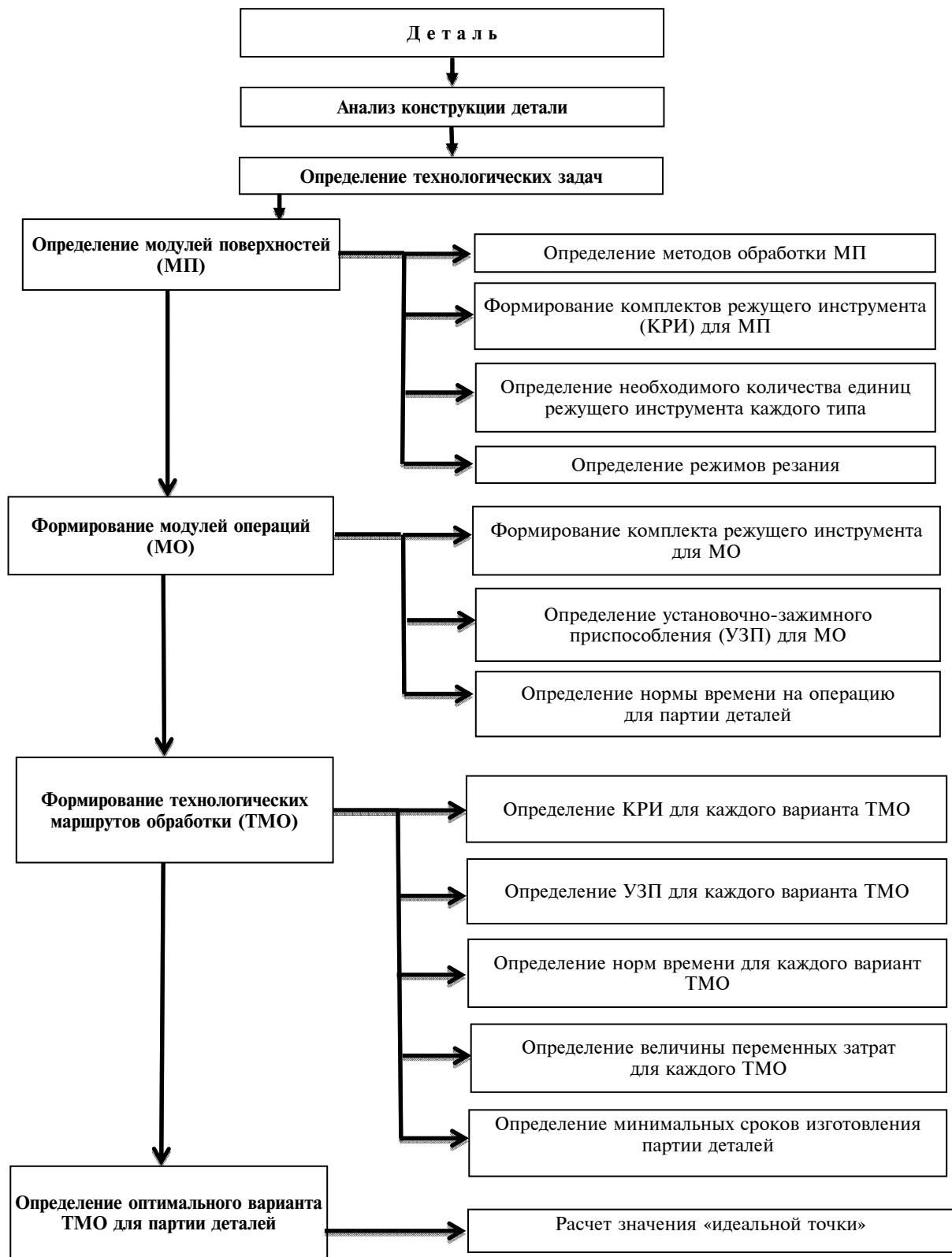


Рис. 1. Схема модели технологической подготовки производства
 Fig. 1. Scheme of the model of technological preparation of production

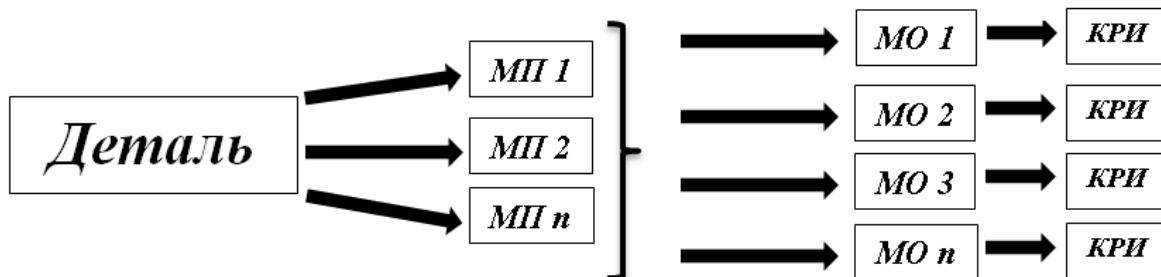


Рис. 2. Схема первого этапа моделирования
Fig. 2. Scheme of the of the first stage of modeling

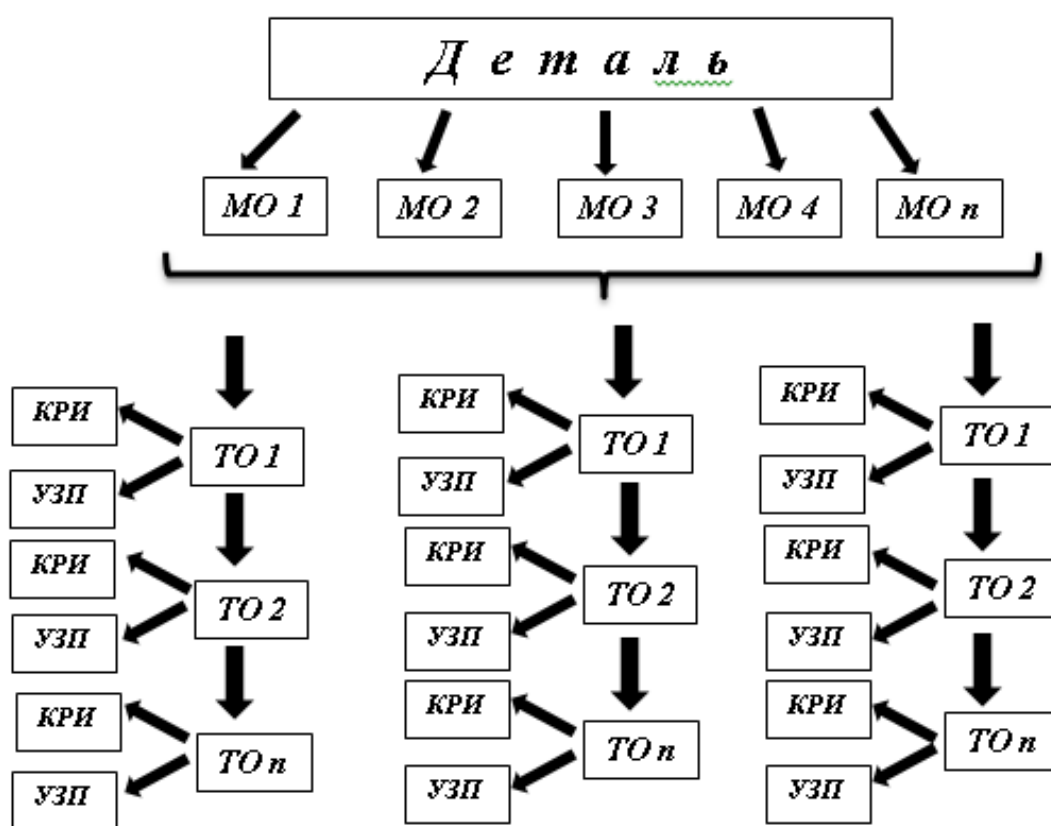


Рис. 3. Схема второго этапа моделирования
Fig. 3. Scheme of the of the second stage of modeling

На втором этапе моделирования решаются следующие задачи:

1. Формирование допустимых технологических маршрутов обработки. Технологический маршрут обработки определяется на основе разработанных МО.

2. Определение комплектов режущего инструмента (КРИ) и установочно-зажимных приспособлений (УЗП) для каждого варианта технологического маршрута обработки.

3. Определение нормы времени обработки для каждого варианта технологического маршрута.

4. Определение необходимого количества единиц режущего инструмента каждого наименования для всех допустимых вариантов технологического маршрута обработки.

Схема второго этапа моделирования представлена на рис. 3.

На третьем этапе моделирования производится выбор оптимального варианта

технологического маршрута обработки и средств технологического оснащения. На данном этапе решаются следующие задачи:

1. Определение величины переменных затрат на изготовление партии деталей для каждого варианта технологического маршрута.

2. Определение минимальных сроков изготовления партии деталей для каждого технологического маршрута, которые производятся на основе анализа загрузки технологического оборудования, наличия необходимых средств производства и сроков их поставки.

3. Определение сроков и размеров партий поставки средств производства (режущий инструмент, заготовки и др.) с учетом имеющихся материалов и емкости склада.

4. Определение оптимального варианта технологического маршрута обработки на основе анализа группы показателей.

Оптимальный вариант технологического маршрута обработки определяется на основе анализа следующих показателей: величины переменных затрат на изготовление партии деталей; минимальных сроков изготовления партии деталей; длительности изготовления партии деталей. Выбор оптимального варианта технологического маршрута обработки производится на основе метода «идеальной точки». Для определения расстояния до «идеальной точки» применяется формула взвешенного евклидова расстояния [15]:

$$d_{в\ E}(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p w_k (x_i^{(k)} - x_j^{(k)})^2}, \quad (1)$$

где $d_{в\ E}$ – взвешенное евклидово расстояние; $x_i^{(k)}$ – значение k -го свойства объекта i ; $x_j^{(k)}$ – значение k -го свойства объекта j ; w_k – «вес» k -го критерия; p – количество критериев.

Оптимальным вариантом технологического маршрута обработки будет считаться вариант с минимальным значением взвешенного евклидова расстояния.

Математическая модель

При разработке модели технологической подготовки мелкосерийного и единичного типов производства были использованы следующие математические модели:

1) определение величины переменных затрат на изготовление продукции;

2) определение нормы оперативного времени ($T_{оп}$);

3) комбинированная модель управления запасами.

Определение величины переменных затрат на изготовление продукции. Оценка величины переменных затрат на изготовление продукции производится на основе расчета следующих экономических элементов: материальных расходов; затрат на оплату труда; отчислений на обязательное государственное социальное страхование.

Сумма материальных затрат M предприятия определяется по формуле [16]:

$$M = \sum_{j=1}^m \Pi_{mj} M_j, \quad (2)$$

где Π_{mj} – покупная цена натуральной единицы j -го материального ресурса, руб/ед; M_j – количество натуральных единиц j -го материального ресурса; m – число наименований материальных ресурсов.

Расходы на оплату труда (3) определяются по формуле [16]

$$З = \alpha Ч \left(1 + \frac{P_{дз}}{100} \right), \quad (3)$$

где α – средняя основная заработная плата одного работника предприятия за расчетный период времени, руб/чел; $Ч$ – средняя численность персонала за этот же период, чел; $P_{дз}$ – средняя величина дополнительной заработной платы в процентах к основной, %.

Величина отчислений на обязательное государственное социальное страхование (O , руб.) рассчитывается по формуле [16]

$$O = 3 \frac{P}{100}, \quad (4)$$

где p – рассчитываемый на основе законодательства суммарный процент отчисле-

ния, %, в фонды от суммы расходов на оплату труда.

Определение нормы времени на изготовление партии деталей. Норма оперативного времени ($T_{оп}$) равна сумме основного (машинного) времени и вспомогательного неперекрываемого времени и определяется по формуле [17]

$$T_{оп} = T_o + T_{вн}, \quad (5)$$

где T_o – основное (машинное) время, мин; $T_{вн}$ – вспомогательное время, неперекрываемое основным, мин.

Основное (машинное) время зависит от режимов работы оборудования и определяется по формуле [17]

$$T_o = T_{ак} + T_m, \quad (6)$$

где $T_{ак}$ – время автоматического холостого хода, связанного с подводами, отводами инструмента или детали, поворотами детали, мин; T_m – собственно машинное время, мин.

Машинное время рассчитывается на основе заданных режимов резания (глубина резания, подача и скорость резания).

Комбинированная модель управления запасами (детерминированная модель. Для управления запасами необходимо определить следующие параметры: точку заказа; величину резервного запаса; величину текущей партии.

Точка заказа – это уровень запаса, при котором должен быть сделан заказ очередной партии. Значение точки заказа определяется по формуле [18]

$$H_{тз} = T_{пост} I_{max}, \quad (7)$$

где $T_{пост}$ – время исполнения заказа; I_{max} – максимальная интенсивность потребления ресурса.

Величина резервного запаса на складе определяется по формуле [18]

$$H_{рез} = H_{тз} - T_{пост} I_{ср} = T_{пост} \frac{I_{max} - I_{min}}{2}, \quad (8)$$

где $H_{рез}$ – величина резервного запаса на складе; $I_{ср}$ – средняя интенсивность потребления ресурса; I_{min} – минимальная интенсивность потребления ресурса;

$$I_{ср} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}. \quad (9)$$

Величина текущей партии поставки определяется по формуле [18]

$$n_{тек} = H_{скл} - T_{пост} (I_{max} - I_{тек}), \quad (10)$$

где $n_{тек}$ – величина партии поставки; $H_{скл}$ – объем склада;

$$(n_{тек})_{max} \geq H_{тз}; \quad (11)$$

$$T_{пост} \leq \frac{H_{скл} - (n_{тек})_{min}}{I_{max} - I_{min}}, \quad (12)$$

$(n_{тек})_{max}$ – максимальный размер партии поставки.

Выводы

Описанная в статье модель технологической подготовки мелкосерийного и единичного производства позволяет выбрать оптимальный вариант технологического маршрута обработки партии деталей на основе многокритериального анализа и сформировать перечень средств производства, необходимых для процесса обработки, определить оптимальные технологические параметры процесса резания, величину переменных затрат и сроки изготовления партии деталей.

Применение разработанной модели позволит сократить длительность технологической подготовки производства за счет ее автоматизации, что будет служить значительным конкурентным преимуществом в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Применение разработанной модели позволяет обеспечить отсутствие простоев технологического оборудования по причине отсутствия на складе средств производства, необходимых для процесса обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stephen Kalas.** Small-Scale Automation in Shipbuilding. Norwegian University of Science and Technology, 2015. 92 p.
2. **Швецова О.В., Белашов М.В.** Применение общих технологических процессов при подготовке производства новых изделий машиностроения // Модели, системы, сети в экономике, природе и обществе. 2013. № 4. С. 212–216.
3. **Гордеев А.С.** Построение многофакторной модели технологической подготовки производства промышленных предприятий в условиях дискретно-нестабильных программ выпуска // Вестник экономики, транспорта и промышленности. 2015. № 52. С. 33–37.
4. **Свирский Д.Н., Климентьев А.Л.** Автоматизация принятия технологических решений в компактном производстве машиностроительной продукции // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2010. № 2. С. 54–62.
5. **Краснов А.А., Рыбаков А.В., Евдокимов С.А.** Управление технологической подготовкой производства деталей, изготавливаемых на оборудовании с ЧПУ в условиях мелкосерийного производства // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2015. № 1(32). С. 69–73.
6. **Трусов А.Н.** Методика выбора оптимального варианта автоматизации конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 1(89). С. 81–83.
7. **Сидоренко С.А., Власенко М.А.** Исследование методов автоматизации для конструкторско-технологической подготовки производства на предприятиях мелкосерийного и серийного типов производства // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 3(36). С. 107–110.
8. **Болдырева В.К., Костюков В.Д., Островерх А.И., Петухов А.П.** Концепция создания базы знаний по автоматизации технологической подготовки производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2013. № 4(152). С. 267–271.
9. **Mujber T.S., Szecsi T., Hashmi M.S.J.** Virtual reality applications in manufacturing process simulation // Journal of Materials Processing Technology. 2004. № 155–156. P. 1834–1838.
10. **Seleim A., Azab A., AlGeddawy T.** Simulation Methods for Changeable Manufacturing // 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 2012. P. 179–184.
11. **Pokorny P., Kuznetsov A.** Automation of the Selection of the Integrated, Strategies // International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, 2016. P. 380–383.
12. **Жуков Э.Л., Козарь И.И., Мурашкин С.Л., Розовский Б.Я., Дегтярев В.В., Соловейчик А.М.** Основы технологии машиностроения. Производство деталей машин / Под общ. ред. С.Л. Мурашкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 412 с.
13. **Зяблов О.К., Фунтикова Е.В.** Автоматизация технологической подготовки судоремонтного производства // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2014. № 38. С. 49–53.
14. **Базров Б.М.** Модульные технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с., ил.
15. **Айвазян С.А., Мхитарян В.С.** Прикладная статистика и основы эконометрика. М.: ЮНИТИ, 1998. 1005 с.
16. **Минко И.С.** Основы экономики предприятия. СПб.: СПбГУНиПТ, 2000. 89 с.
17. **Бычин В.Б., Малинин С.В.** Нормирование труда / Под ред. Ю.Г. Одегова. М.: Экзамен, 2003. 320 с.
18. **Производственный менеджмент** / Под ред. В.А. Козловского. М.: Инфра-М, 2003. 574 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ХРУСТАЛЕВА Ирина Николаевна — старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

ЛЮБОМУДРОВ Сергей Александрович — кандидат технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

РОМАНОВ Павел Иванович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.10.2017



REFERENCES

- [1] **Stephen Kalas.** Small-Scale Automation in Shipbuilding. Norwegian University of Science and Technology, 2015. 92 p.
- [2] **Shvetsova O.V., Belashov M.V.** Primenenie obshchikh tekhnologicheskikh protsessov pri podgotovke proizvodstva novykh izdelii mashinostroeniia. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, prirode i obshchestve.* 2013. № 4. S. 212–216. (rus.)
- [3] **Gordeev A.S.** Postroenie mnogofaktornoi modeli tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva promyshlennykh predpriatii v usloviakh diskretno-nestabil'nykh programm vypuska. *Vestnik ekonomiki, transporta i promyshlennosti.* 2015. № 52. S. 33–37. (rus.)
- [4] **Svirskii D.N., Kliment'ev A.L.** Avtomatizatsiia priniatiia tekhnologicheskikh reshenii v kompaktnom proizvodstve mashinostroitel'noi produktsii. *Vestnik polovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost'. Prikladnye nauki.* 2010. № 2. S. 54–62. (rus.)
- [5] **Krasnov A.A., Rybakov A.V., Evdokimov S.A.** Upravlenie tekhnologicheskoi podgotovkoi proizvodstva detalei, izgotavlivaemykh na oborudovanii s ChPU v usloviakh melkoseriinnogo proizvodstva. *Vestnik MGTU STANKIN.* 2015. № 1(32). S. 69–73. (rus.)
- [6] **Trusov A.N.** Metodika vybora optimal'nogo varianta avtomatizatsii konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki mashinostroitel'nogo proizvodstva. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2012. № 1(89). S. 81–83. (rus.)
- [7] **Sidorenko S.A., Vlasenko M.A.** Issledovanie metodov avtomatizatsii dlia konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na predpriatiiakh melkoseriinnogo i seriinnogo tipov proizvodstva. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta.* 2013. № 3(36). S. 107–110. (rus.)
- [8] **Boldyreva V.K., Kostiukov V.D., Ostroverkh A.I., Petukhov A.P.** Kontsepsiia sozdaniia bazy znaniy po avtomatizatsii tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve.* 2013. № 4(152). S. 267–271. (rus.)
- [9] **Mujber T.S., Szecsi T., Hashmi M.S.J.** Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of Materials Processing Technology.* 2004. № 155–156. P. 1834–1838.
- [10] **Seleim A., Azab A., AlGeddawy T.** Simulation Methods for Changeable Manufacturing. *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems.* 2012. P. 179–184.
- [11] **Pokorny R., Kuznetsov A.** Automation of the Selection of the Integrated, Strategies. *International Conference on Manufacturing Engineering and Materials,* 2016. P. 380–383.
- [12] **Zhukov E.L., Kozar' I.I., Murashkin S.L., Rozovskii B.Ia., Degtiarev V.V., Soloveichik A.M.** Osnovy tekhnologii mashinostroeniia. Proizvodstvo detalei mashin / Pod obshch. red. S.L. Murashkina. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2008. 412 s. (rus.)
- [13] **Ziablov O.K., Funtikova E.V.** Avtomatizatsiia tekhnologicheskoi podgotovki sudoremontnogo proizvodstva. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta.* 2014. № 38. S. 49–53. (rus.)
- [14] **Bazrov B.M.** Modul'nye tekhnologii v mashinostroenii. M.: Mashinostroenie, 2001. 368 s., il. (rus.)
- [15] **Aivazian S.A., Mkhitarian V.S.** Prikladnaia statistika i osnovy ekonometrika. M.: IuNITI, 1998. 1005 s. (rus.)
- [16] **Minko I.S.** Osnovy ekonomiki predpriatiia. SPb.: SPbGUNIPT, 2000. 89 s. (rus.)
- [17] **Bychin V.B., Malinin S.V.** Normirovanie truda / Pod red. Iu.G. Odegova. M.: Ekzamen, 2003. 320 s. (rus.)
- [18] Proizvodstvennyi menedzhment / Pod red. V.A. Kozlovskogo. M.: Infra-M, 2003. 574 s. (rus.)

AUTHORS

KHRUSTALEVA Irina N. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

LYUBOMUDROW Sergei A. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

ROMANOV Pavel I. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

Received: 24.10.2017