



DOI: 10.18721/JEST.230219

УДК 658.512.4.07

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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕХА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Описана имитационная модель технологической подготовки производства цеха механической обработки, позволяющая оценить эффективность производственного процесса механической обработки исходя из анализа экономических показателей и показателей качества продукции. Оценка качества продукции производится на основе теоретического расчета суммарной погрешности обработки. Приведена математическая модель расчета точности механической обработки.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ; ТОЧНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ; МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА; ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ; РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ.

*Ссылка при цитировании:*

И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, П.И. Романов. Имитационная модель технологической подготовки производства цеха механической обработки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 215–222. DOI: 10.18721/JEST.230219

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

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

## **SIMULATION MODEL OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION OF THE MACHINING SHOP**

We have described a simulation model for the technological preparation of the production of a machining shop. The described simulation model allows to estimate the efficiency of the production process of machining based on the analysis of economic indicators and product quality indicators. The evaluation of product quality is based on the theoretical calculation of the total processing error. We have described a mathematical model for calculating the accuracy of machining.

SIMULATION MODEL; ACCURACY OF MECHANICAL TREATMENT; MACHINING; TECHNOLOGICAL EQUIPMENT; CUTTING MODES.

*Citation:*

I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrow, P.I. Romanov, Simulation model of technological preparation of production of the machining shop, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (02) (2017) 215–222, DOI: 10.18721/JEST.230219

Машиностроение — одна из крупнейших отраслей промышленности, продукция которой отличается большим разнообразием конструкторских решений и применяемых материалов. Обработка одной и той же номенклатуры деталей может иметь множество технологических решений в зависимости от применяемых методов обработки и средств технологического оснащения.

Технологическая подготовка производства — неотъемлемый этап выпуска продукции, кото-

рый позволяет организовать производственный процесс с оптимальным соотношением экономических показателей и показателей качества.

Согласно ГОСТ 14.004–83 технологическая подготовка производства — это совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства. К основным решаемым при этом задачам: относятся выбор оптимальных методов получения заготовки, методов формообразования поверхностей детали; выбор средств

технологического оснащения (технологическое оборудование, режущий и мерительный инструмент, установочно-зажимное приспособление); разработка маршрутов обработки деталей; назначение технологических параметров процесса обработки (скорости и глубины резания, подачи), обеспечивающих выполнения заданной параметров точности; определение оптимальной последовательности запуска деталей в производство; расчет количества и сроков поставок режущего инструмента и вспомогательных материалов. Реализация всех возможных вариантов производственного процесса на практике невозможна. Поэтому наиболее рациональным методом для решения поставленных задач является имитационное моделирование. Оно позволяет оценить поведение системы при изменении внешних условий [1]. В ряде литературных источников [2–13] описываются модели производственного процесса, в которых выбор оптимального варианта производится на основе анализа только экономических показателей и не учитывает параметры качества продукции (точность обработки).

#### **Постановка задачи исследования**

Целью работы — создание имитационной модели технологической подготовки производства цеха механической обработки для выбора наиболее рационального варианта производственного процесса обработки заданной номенклатуры деталей. Выбор рационального варианта производится на основе анализа двух групп показателей:

экономических показателей (коэффициент загрузки оборудования, длительность производственного цикла, минимизация вспомогательного времени на переналадку оборудования и др.);

показателей качества продукции (качество оценивается на основе расчета точности окончательной механической обработки для каждой партии деталей).

#### **Имитационная модель технологической подготовки производства цеха механической обработки**

Моделирование технологической подготовки производства цеха механической обработки включает четыре этапа:

анализ номенклатуры деталей и технологического оборудования цеха;

оптимизацию загрузки технологического оборудования цеха;

разработку производственного графика для каждой группы технологического оборудования; моделирование работы каждой единицы технологического оборудования.

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

#### **Описание этапов моделирования**

**Этап 1.** Анализ номенклатуры деталей и технологического оборудования цеха. Формирование отдельных групп деталей и групп технологического оборудования.

Анализ заданной номенклатуры деталей производится с целью определения необходимой точности технических параметров поверхностей деталей и допустимых методов их формообразования для достижения заданных параметров точности. В отдельную группу объединяются детали, для формообразования которых могут быть применены схожие методы обработки и средства технологического оснащения (технологическое оборудование, режущий инструмент, установочно-зажимные приспособления).

Анализ технологического оборудования цеха производится с целью выявления технологических возможностей каждой единицы оборудования. По результатам формируются группы технологического оборудования (ГТО). В одну группу объединяются станки, имеющие схожие технические характеристики и являющиеся взаимозаменяемыми в пределах своей группы.

**Этап 2.** Оптимизация загрузки технологического оборудования цеха.

Производственная мощность предприятия (цех, участок) — это максимально возможный выпуск продукции за определенный период и в определенных количественных соотношениях заданной номенклатуры при наиболее эффективном использовании набора производственных ресурсов (производственное оборудование и площади)<sup>1</sup>.

Задачей второго этапа моделирования является оптимальное распределение деталей между группами технологического оборудования с учетом их максимальных производственных мощностей. Выбор оптимального варианта произво-

<sup>1</sup> Производственный менеджмент: Учебник / Под ред. В.А. Козловского. М.: ИНФРА-М, 2003. 574 с.

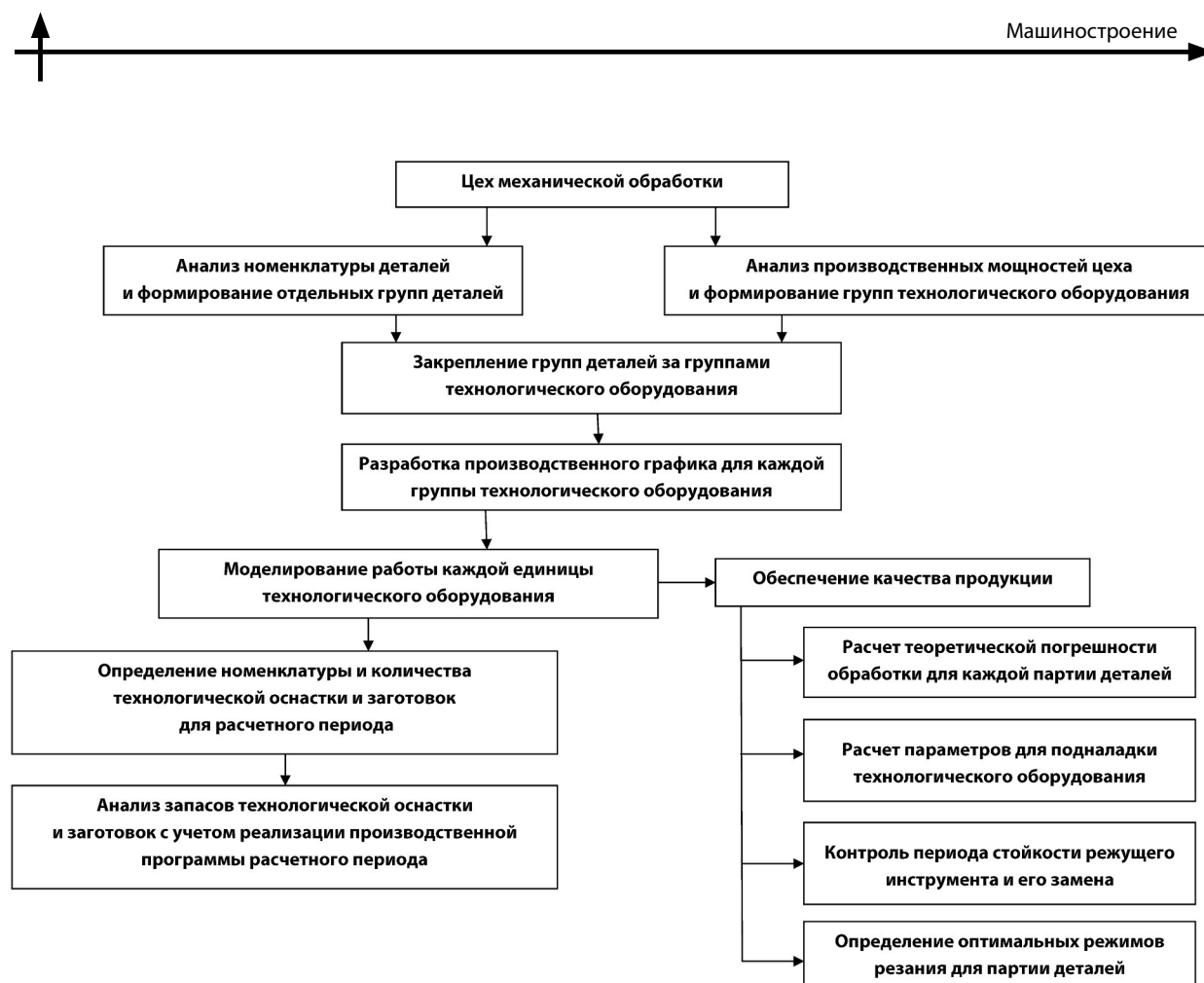


Рис. 1 Схема имитационной модели технологической подготовки производства цеха механической обработки  
Fig. Diagram of simulation model of technological preparation of production of the machining shop

дится на основе расчета коэффициента загрузки группы технологического оборудования (рис. 2).

**Этап 3.** Разработка производственного графика для каждой группы технологического оборудования. Задача данного этапа моделирования — разработка оптимальной последовательности обработки деталей для каждой единицы технологического оборудования с учетом длительности изготовления каждой партии деталей, сроков сдачи готовой продукции и минимизации вспомогательного времени на переналадку технологического оборудования (рис. 3).

**Этап 4.** Моделирование работы каждой единицы технологического оборудования. Задачи четвертого этапа — определение номенклатуры и количества технологической оснастки и заготовок, необходимых для обработки деталей в расчетном периоде, и обеспечение качества выпускаемой продукции на основе прогнозирования точности обработки. Закупка необходимых наименований режущего инструмента

и заготовительного материала производится с учетом допустимых объема склада и сроков поставки.

Обеспечение качества изготавливаемой продукции производится на основе теоретического расчета точности механической обработки, которая оценивается суммарной погрешностью обработки для партии деталей. По результатам расчета определяются оптимальные режимы резания и параметры для подналадки технологического оборудования. Обеспечение качества выпускаемой продукции производится также за счет контроля периода стойкости режущего инструмента и его своевременной заменой.

#### Математическая модель технологической подготовки производства

При реализации разработанной имитационной модели технологической подготовки производства цеха механической обработки были использованы следующие математические модели:

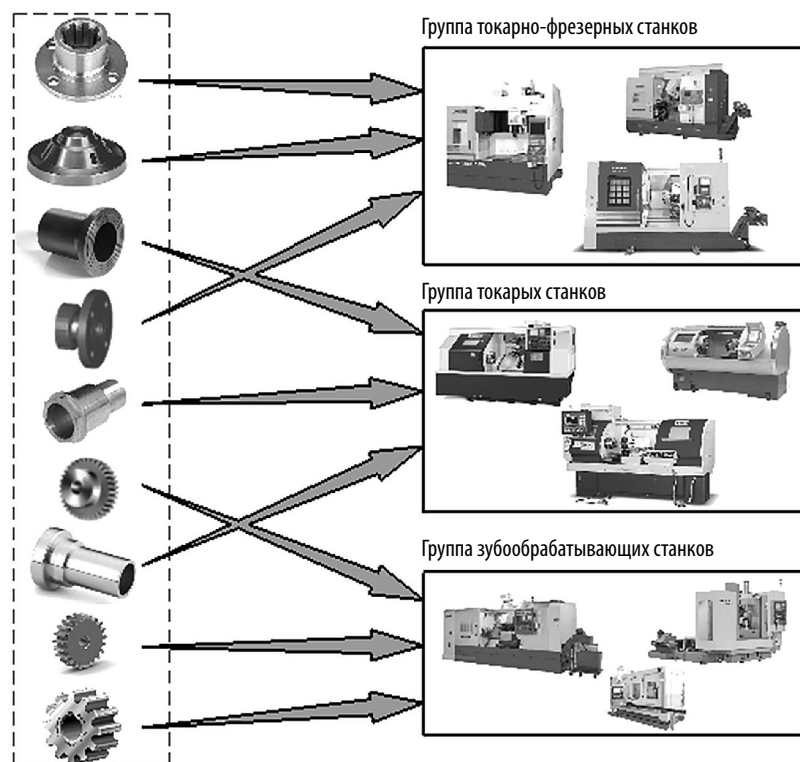


Рис. 2. Схема второго этапа моделирования

Fig. 2. Scheme of the second stage modeling

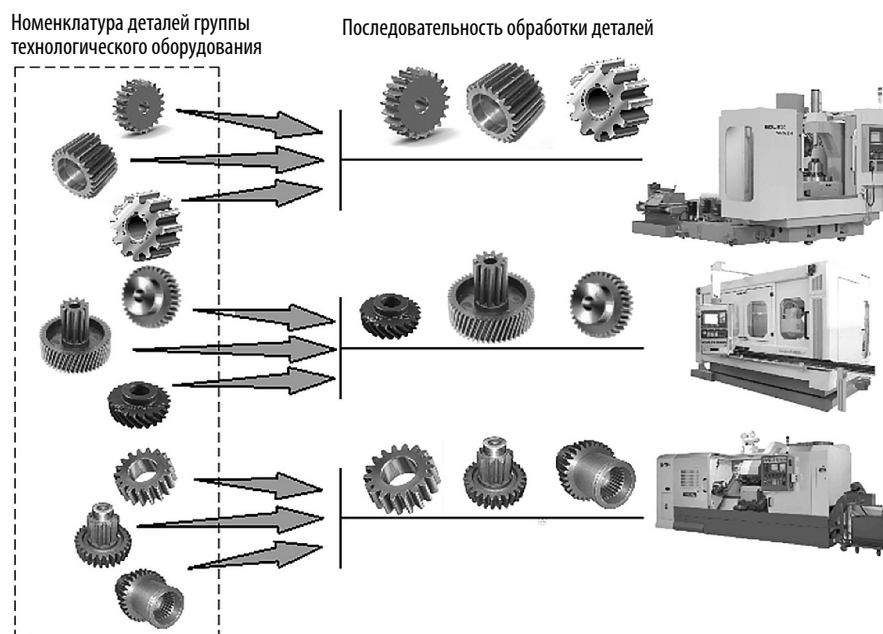


Рис. 3. Схема третьего этапа моделирования

Fig. 3. Scheme of the third stage modeling

определение суммарной погрешности обработки.

определение коэффициента загрузки группы технологического оборудования.

**Определение суммарной погрешности обработки.** В общем виде уравнение для расчета суммарной погрешности обработки можно представить следующей зависимостью [14]:

$$Y_i = f_1(x_1, x_2, \dots) + f_2(x_1, x_2, \dots) + \varepsilon_i,$$

где  $f_1, f_2$  — составляющие погрешности (тепловые и силовые деформации технологической системы, износ режущего инструмента и т. д.);  $x_1, x_2$  — входные параметры и возмущающие воздействия, которые характеризуют состояние обрабатываемых заготовок, режущего инструмента и станка, режимы резания и т. д.

Определение суммарной погрешности обработки производится на основе расчета отдельных погрешностей, к которым относятся размерный износ режущего инструмента ( $\Delta_{ин}$ ), упругие деформации технологической системы ( $\Delta_{упр}$ ) и тепловые деформации технологической системы ( $\xi$ ). Расчет значений данных погрешностей обработки производится по формулам [15]

$$\Delta_{ин} = \frac{2u_3 14 D l}{s};$$

$$\Delta_{упр} = \frac{j C_z V^{az} S^{bz} R^{dz}}{C_y V^{ay} S^{by} R^{dy} C_p S^{0,75}};$$

$$P_y = C_y V^{ay} S^{by} R^{dy};$$

$$P_z = C_z V^{az} S^{bz} R^{dz};$$

$$\xi = K(\tau + A)(1 - e^{-\alpha\tau});$$

$$A = C_A V^{aA} S^{bA} R^{dA};$$

$$K = C_K V^{aK} S^{bK} R^{dK};$$

$$\alpha = C_\alpha V^{a\alpha} S^{b\alpha} R^{d\alpha},$$

где  $u$  — относительный размерный износ режущего инструмента, мкм;  $D$  — диаметр заготовки, мм;  $l$  — длина обработки, мм;  $S$  — подача, мм/об;  $R$  — радиус при вершине режущей пластины, мм;

$V$  — скорость резания;  $j$  — жесткость системы, Н/мм<sup>2</sup>;  $P_y, P_z$  — составляющие силы резания, Н;  $C_p$  — поправочный коэффициент, зависящий от материала детали;  $C_y, C_z$  — поправочные коэффициенты, зависящие от геометрии и материала инструмента;  $ay, by, dy, az, bz, dz$  — показатели степени;  $K, A$  — коэффициенты, зависящие от режимов резания, материала детали, материала и формы резца;  $\tau$  — расчетный момент времени, мин;  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от материала и формы режущего инструмента;  $e$  — основание натурального логарифма.

**Расчет коэффициента загрузки группы оборудования.** Коэффициент загрузки группы технологического оборудования рассчитывается по формулам [14]

$$K_3 = \frac{q_p}{q_\Phi};$$

$$q_p = \frac{T_{пл}}{F_{эф}};$$

$$T_{пл} = \frac{1}{P_{вн}} \sum_{j=1}^j (N_B^j T_j + \Delta H_{нз}^j);$$

$$\Delta H_{нз}^j = \sum_{j=1}^j (O_{вр}^j - O_{вф}^j) T_j,$$

где  $K_3$  — коэффициент загрузки группы технологического оборудования;  $q$  — количество единиц технологического оборудования, необходимое для выполнения плана;  $q_\Phi$  — фактическое количество единиц технологического оборудования в группе;  $T_{пл}$  — требуемое число нормочасов по группе оборудования на весь выпуск товарной продукции и на изменение заделов незавершенного производства;  $F_{эф}$  — эффективный фонд времени работы единицы оборудования;  $J$  — число видов продукции, изготавливаемой на группе оборудования;  $P_{вн}$  — планируемый средний коэффициент выполнения норм времени по группе оборудования;  $N_B^j$  — годовой выпуск продукции  $j$ -го вида, изготавливаемой на группе оборудования;  $T_j$  — трудоемкость изготовления продукции  $j$ -го вида, изготавливаемой на группе оборудования;  $\Delta H_{нз}^j$  — трудоемкость изменения остатка незавершенного производства продукции  $j$ -го вида по группе оборудования;  $O_{вр}^j, O_{вф}^j$  — расчетное

и фактическое опережение выпуска продукции  $j$ -го вида по группе оборудования.

### Анализ результатов

В статье описана имитационная модель технологической подготовки производства, позволяющая сформировать допустимые варианты производственного процесса обработки заданной номенклатуры деталей, определить оптимальные режимы резания и оценить точность готовой продукции. Также на основе описанной

имитационной модели выполняются разработка производственных графиков и формирование перечня необходимой технологической оснастки для расчетного периода.

Применение разработанной имитационной модели на этапе технологической подготовки производства позволяет значительно сократить время и затраты при производстве продукции за счет предварительного анализа множества допустимых вариантов производственного процесса и выбора из них оптимального.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Claudius Ptolemaeus.** System Design, Modeling and Simulation using Ptolemy II. Ptolemy. ogr, 2014. 674 p.
2. **Дмитриевский Б.С., Савцова И.О., Филина А.Е.** Модель технологической подготовки производства в машиностроении // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т. 21. № 1. С. 174–184.
3. **Переверзев П.П.** Функциональное моделирование процессов организации производства на машиностроительных предприятиях // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. [Электрон. издание] URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=604>(дата обращения: 23.06.2017).
4. **Дмитриевский Б.С., Савцова И.О.** Моделирование технической подготовки производства в мелкосерийной инновационно-производственной системе // Вопросы современной науки и практики. Университет им.В.И. Вернадского. 2013. № 2 (46). С. 54–59.
5. **Селиванов С.Г., Панышина О.Ю., Поезжалова С.Н., Бородкина О.А.** Разработка системы инновационной подготовки производства в машиностроении // Инновации. 2013. № 3(173). С. 78–84.
6. **Дмитриевский Б.С., Дмитриева О.В.** Автоматизированное управление производственной системой: построение модели и перевод к инновационное состояние // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 2. С. 284–291.
7. **Митин С.Г., Бочкарев П.Ю., Бокова Л.Г.** Особенности создания автоматизированной системы планирования технологических процессов в условиях многономенклатурного механообрабатывающего производства // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2012). Труды 12-й международной конференции / Под ред. Е.И. Артамонова. М.: ООО «Аналитик», 2012. С. 305–309.
8. **Балановская Л.Н.** Математическое моделирование технологической подготовки производства с использованием некоторых моделей дискретной оптимизации // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2012. С. 74–77.
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. **Люттов А.Г., Рябов Ю.В.** Модель комплексного автоматизированного управления процессами в машиностроении // СТИН. 2016. № 5. С. 2–8.
11. **Хаймович И.Н.** Разработка принципов построения бизнес-процессов конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–9. С. 1709–1714.
12. **Mourtzis D., Doukas M., Bernidaki D.** Simulation in Manufacturing: Review and Challenges // CIRP Sponsored DET 2014 Conference. 2014. P. 213–229.
13. **Seleim A., Azab A., AlGeddawy T.** Simulation Methods for Changeable Manufacturing // 45<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems. 2012. P. 179–184.
14. **Козарь И.И., Колодяжный Д.Ю., Радкевич М.М., Цимко Т.А.** Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 2(195). С. 194–201.
15. **Козарь И.И., Колодяжный Д.Ю., Ларионов Е.О.** Оценка погрешности обработки резанием деталей из труднообрабатываемых материалов в авиадвигателестроении // Современное машиностроение. Наука и образование. 2016. № 5. С. 936–945.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХРУСТАЛЕВА Ирина Николаевна** — старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

**ЛЮБОМУДРОВ Сергей Александрович** — кандидат технических наук заведующий кафедрой технологии машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

**РОМАНОВ Павел Иванович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

### REFERENCES

1. **Claudius Ptolemaeus**. System Design, Modeling and Simulation using Ptolemy II. Ptolemy. ogr. 2014. 674 p.
2. **Dmitriyevskiy B.S., Savtsova I.O., Filina A.Ye.** Model tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v mashinostroyenii. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. T. 21. № 1. S. 174–184. (rus.)
3. **Pereverzev P.P.** Funktsionalnoye modelirovaniye protsessov organizatsii proizvodstva na mashinostroyitelnykh predpriyatiyakh. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012. № 2. [Электрон. издание] URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=604> (дата обращения: 23.06.2017). (rus.)
4. **Dmitriyevskiy B.S., Savtsova I.O.** Modelirovaniye tekhnicheskoy podgotovki proizvodstva v melkoseriynoy innovatsionno-proizvodstvennoy sisteme / Universitet im.V.I. Vernadskogo. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki*. 2013. № 2 (46). S. 54–59. (rus.)
5. **Selivanov S.G., Panshina O.Yu., Poyezhalova S.N., Borodkina O.A.** Razrabotka sistemy innovatsionnoy podgotovki proizvodstva v mashinostroyenii. *Innovatsii*. 2013. № 3(173). S. 78–84. (rus.)
6. **Dmitriyevskiy B.S., Dmitriyeva O.V.** Avtomatizirovannoye upravleniye proizvodstvennoy sistemoy: postroyeniye modeli i perevod k innovatsionnoye sostoyaniye. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. T. 20. № 2. S. 284–291. (rus.)
7. **Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Bokova L.G.** Osobennosti sozdaniya avtomatizirovannoy sistemy planirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v usloviyakh mnogomenklaturnogo mekhanooobrabatyvayushchego proizvodstva. *Sistemy proyektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta (CAD/CAM/PDM-2012)*. *Trudy 12-y mezhhdunarodnoy konferentsii / Pod red. Ye.I. Artamonova*. M.: ООО «Analitik», 2012. S. 305–309. (rus.)
8. **Balanovskaya L.N.** Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva s ispolzovaniyem nekotorykh modeley diskretnoy optimizatsii. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v neftegazovoy otrosli i obrazovanii. Materialy V Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhhdunarodnym uchastiyem*. 2012. S. 74–77. (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. **Lyutov A.G., Ryabov Yu.V.** Model kompleksnogo avtomatizirovannogo upravleniya protsessami v mashinostroyenii// *STIN*. 2016. № 5. S. 2–8. (rus.)
11. **Khaymovich I.N.** Razrabotka printsipov postroyeniya biznes-protsessov konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva na osnove informatsionno-tekhnologicheskikh modeley. *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2014. № 8–9. S. 1709–1714. (rus.)
12. **Mourtzis D., Doukas M., Bernidaki D.** Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *CIRP Sponsored DET 2014 Conference*. 2014. P. 213–229.
13. **Seleim A., Azab A., AlGeddawy T.** Simulation Methods for Changeable Manufacturing. 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012. P. 179–184.
14. **Kozar I.I., Kolodyazhnyy D.Yu., Radkevich M.M., Tsimko T.A.** Matematicheskaya model pogreshnosti pri tochenii trudnoobrabatyvayemykh splavov. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. № 2(195). S. 194–201. (rus.)
15. **Kozar I.I., Kolodyazhnyy D.Yu., Larionov Ye.O.** Otsenka pogreshnosti obrabotki rezaniyem detaley iz trudnoobrabatyvayemykh materialov v aviadvigatelestroyenii. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye*. 2016. № 5. S. 936–945. (rus.)

#### **AUTHORS**

**KHRUSTALEVA Irina N.** — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

**LYUBOMUDROW Sergei A.** — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

**ROMANOV Pavel I.** — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

**Дата поступления статьи в редакцию: 29.03.2017.**