УДК 65.011.56

Повышение эффективности технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства на основе имитационного моделирования

С.А.ЛЮБОМУДРОВ, И.Н.ХРУСТАЛЕВА[✉], А.А.ТОЛСТОЛЕС, А.П.МАСЛАКОВ

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

Технологическая подготовка производства является неотъемлемым этапом производственного процесса, который характеризуется высокой трудоемкостью, что в значительной степени ощущается в условиях единичного и мелкосерийного типов производства. Эффективность технологической подготовки производства повышается на основе автоматизации с применением имитационного моделирования. Задачей исследования является разработка имитационной модели, позволяющей определить рациональный вариант технологического процесса для обработки партии деталей. Описанная в статье имитационная модель позволяет произвести анализ производственного графика предприятия, построить технологические маршруты обработки, оценить варианты использования различных типов заготовок и технологического оснащения, определить допустимые значения режимов резания, выбрать рациональный вариант технологического процесса обработки партии деталей. Разработанная имитационная модель базируется на принципах модульных технологий, деталь рассматривается в виде сочетания отдельных элементарных поверхностей. Каждая элементарная поверхность содержит информацию о технологическом маршруте обработки, технологической оснастке и типе технологического оборудования, применяемых при ее изготовлении, режимах резания и величине припуска для каждого этапа обработки. Выбор рационального варианта технологического процесса производится на основе многокритериального анализа по трем критериям: величина переменных затрат, срок изготовления партии деталей и величина погрешности обработки. Произведен анализ данных критериев и определены параметры, которые оказывают наибольшее влияние на их значение. Описана разработанная классификация элементов поверхностей: конструкторские элементы, технологические элементы, базовые элементы, а также математическая модель, на основе которой производится расчет значений критериев для выбора рационального варианта.

Ключевые слова: имитационное моделирование; режимы резания; погрешность обработки; математическая модель; технологический маршрут обработки

Благодарность. Финансирование исследований производилось в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (номер соглашения 14.584.21.0022).

Как цитировать эту статью: Повышение эффективности технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства на основе имитационного моделирования / С.А.Любомудров, И.Н.Хрусталева, А.А.Толстолес, А.П.Маслаков // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 669-677. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.669

Введение. Технологическая подготовка производства является неотъемлемой частью производственного процесса. Технологическая подготовка производства (ТПП) представляет собой комплекс взаимосвязанных процессов, которые обеспечивают технологическую готовность предприятия к выпуску продукции требуемого качества при определенных сроках, объеме производства и затратах [3]. Основными этапами ТПП являются: анализ конструкции детали и постановка технологических задач, выбор метода получения заготовки, разработка технологических маршрутов обработки, выбор средств технологического оснащения, проектирование технологических операций, оформление комплекта технологической документации.

В настоящее время управление технологическими процессами в машиностроении является одним из наиболее перспективных направлений его развития [11]. Этап технологической подготовки производства является достаточно трудоемким процессом. Высокая трудоемкость данного этапа производственного процесса в значительной степени ощущается в условиях единичного и мелкосерийного производства, отличительными особенностями которых являются широкая номенклатура продукции с малым объемом выпуска, отсутствие специализированных рабочих мест, высокая трудоемкость и длительный производственный цикл изготовления изделий. Сокращение длительности этапа ТПП возможно за счет автоматизации на базе информационных технологий. Комплексная автоматизация технологической подготовки на базе информационных технологий обеспечивает [4]: сокращение сроков подготовки производства; оптимизацию затрат труда и средств на изготовление изделий; оперативное внедрение изменений в технологический процесс при изменении внешних условий с автоматическим пересчетом технологического процесса.

Проблемам автоматизации технологической подготовки производства посвящено большое количество научных статей. В статье [14] описана модель технологической подготовки производства, позволяющая на основе трехмерной параметрической модели, конструкторской документации и сведениях о материале спроектировать маршрутный технологический процесс, цеховой маршрут и выбрать предварительные схемы обработки отдельных поверхностей. В статье [1] описана автоматизированная система для выбора стратегий обработки конструкторско-технологических элементов (КТЭ), по результатам работы которой формируются рекомендации по инструментальной стратегии обработки КТЭ, режущему инструменту, режимам резания, а также предварительный расчет времени и стоимости обработки. В моделях, описанных в научной литературе [1, 2, 6-9, 13-20], не рассматривается многовариантность проектирования технологического процесса и выбора рационального варианта изготовления партии деталей на основе многокритериального анализа.

Задачей исследования является разработка имитационной модели технологической подготовки производства, позволяющей на основе имитационного моделирования производственного процесса выбрать рациональный вариант изготовления партии деталей с учетом анализа различных технологических параметров (технологический маршрут обработки, тип и параметры технологического оборудования, режущего инструмента, значения режимов резания и т.д.).

Описание имитационной модели. Разработанная имитационная модель технологической подготовки производства базируется на принципах модульных технологий, согласно которым деталь разбивается на отдельные элементарные поверхности. Для реализации модульного принципа была разработана классификация элементов детали, согласно которой все элементы детали разделены на три типа.

- Конструкторские элементы (КЭ): элементарные поверхности детали, образующие ее контур (наружные цилиндрические и конические поверхности, паз, резьбовая поверхность и т.д.).

- Технологические элементы (ТЭ): элементы припуска для каждого этапа обработки.

- Базовые элементы (БЭ): элементы детали, образующие комплект технологических баз на каждом этапе обработки.

На рис.1 представлена схема модульного описания отдельных поверхностей детали.

В качестве конструкторских элементов выступают отдельные поверхности или сочетания поверхностей, образующие контур детали (наружные и внутренние поверхности вращения, пазы, резьбовые поверхности, шлицевые поверхности и т.д.). Конструкторские элементы делятся на два типа:

- элементарные поверхности (ЭП) – цилиндрическая поверхность, коническая поверхность, резьбы и т.д.;

- функциональные блоки (ФБ) – совокупность элементарных поверхностей различного типа, выполняющие определенную функцию (крепежные отверстия, центровые отверстия и т.д.).

Конструкторские элементы описываются следующими параметрами:

$$КЭ = \{B_{КЭ}, T_{КЭ}, P_{КЭ}\},$$

где $B_{КЭ}$ – вид конструкторского элемента; $B_{КЭ} = 1$ – элементарные поверхности; $B_{КЭ} = 2$ – функциональные блоки; $T_{КЭ}$ – тип конструкторского элемента; $P_{КЭ}$ – параметры конструкторского элемента.

Рис.1. Схема модульного описания отдельных поверхностей детали

Для элементарной поверхности (ЭП) $V_{КЭ} = 1$:

$$T_{КЭ} = T_{КЭ}^{ЭП} = \{T_1; T_2\},$$

где T_1 – тип элементарной поверхности (наружная поверхность вращения и т.д.); T_2 – вид элементарной поверхности (коническая, цилиндрическая и т.д.);

$$P_{КЭ} = P_{КЭ}^{ЭП} = \{ГП_{КЭ}, ИТ_{КЭ}, Ra_{КЭ}, ФМС_{КЭ}, ТМО_{КЭ}\},$$

$ГП_{КЭ}$ – геометрические параметры ЭП; $ИТ_{КЭ}$ – точность изготовления поверхности (поле допуска) ЭП; $Ra_{КЭ}$ – чистота поверхности (шероховатость) ЭП; $ФМС_{КЭ}$ – физико-механические свойства ЭП; $ТМО_{КЭ}$ – технологический маршрут обработки ЭП.

Для функционального блока (ФБ) $V_{КЭ} = 2$:

$$T_{КЭ} = T_{КЭ}^{ФГ} = \left\{ \sum_{i=1}^n (T_{КЭ}^{ЭП})_n \right\};$$

$$P_{КЭ} = P_{КЭ}^{ФГ} = \left\{ ТМО_{ФГ}; \sum_{i=1}^n (T_{КЭ}^{ЭП})_n \right\},$$

где $ТМО_{ФБ}$ – технологический маршрут обработки функционального блока.

Технологические элементы описываются также на основе двух групп параметров – технические и технологические:

$$TЭ = \{T_{КЭ}^{ЭП}, T_{хП}; T_{лП}\},$$

$$T_{хП} = \{ГП_{ТЭ}, ИТ_{ТЭ}, Ra_{ТЭ}, ФМС_{ТЭ}\},$$

$$T_{лП} = \{ЭО_{ТЭ}, МО_{ТЭ}, ТО_{ТЭ}, РИ_{ТЭ}, РР_{ТЭ}\},$$

где $T_{хП}$ – технические параметры; $T_{лП}$ – технологические параметры; $ГП_{ТЭ}$ – геометрические параметры технологического элемента; $ИТ_{ТЭ}$ – поле допуска технологического элемента; $Ra_{ТЭ}$ – шероховатость поверхности технологического элемента; $ФМС_{ТЭ}$ – физико-механические свойства технологического элемента; $ЭО_{ТЭ}$ – этап обработки, к которому принадлежит технологический элемент; $МО_{ТЭ}$ – метод обработки, с помощью которого происходит обработка технологического элемента; $ТО_{ТЭ}$ – технологическое оборудование, на котором производится обработка технологического элемента; $РИ_{ТЭ}$ – режущий инструмент, с помощью которого производится обработка технологического элемента; $РР_{ТЭ}$ – режимы резания, на которых производится обработка технологического элемента.

Сочетание базовых элементов (БЭ) образует комплект технологических баз (КТБ), который имеет следующие параметры:

$$КТБ = \{ЭО_{ТГ}; \sum_{i=1}^n KЭ_n; \sum_{i=1}^m TЭ_m\},$$

где $ЭО_{ТГ}$ – этап обработки, к которому принадлежат технологические элементы, обрабатываемые при данном комплекте технологических баз; $KЭ_n$ – конструкторские элементы, образующие комплект технологических баз; $TЭ_m$ – технологические элементы, образующие комплект технологических баз;

На рис.2 представлена схема имитационной модели технологической подготовки производства. Выбор рационального варианта технологического процесса можно разделить на 7 этапов. На первом этапе определяются множества конструкторских и технологических элементов, задаются их параметры, а также формируется комплект технологических баз на основе базовых элементов.

На втором этапе формируются блоки поверхностей (БП) и технологические группы (ТГ). Под блоком поверхностей следует понимать совокупность элементарных поверхностей, схожих по технологическому признаку. Технологической группой является совокупность технологических элементов, которые могут быть обработаны в структуре одного технологического перехода.

Конструкторские элементы могут быть объединены в блок поверхностей, если выполняются следующие условия:

Рис.2. Схема имитационной модели технологической подготовки производства

- конструкторские элементы, входящие в блок поверхностей, принадлежат к одному типу – наружная поверхность вращения, внутренняя поверхность вращения и т.д.;
- на каждом этапе обработки технологические элементы имеют хотя бы по одному общему значению для каждого параметра – метод обработки, технологическое оборудование, режущий инструмент.

Технологические элементы могут быть объединены в технологические группы, если выполняются следующие условия:

- технологические элементы, входящие в технологическую группу, принадлежат к одному этапу обработки $\text{ЭО}_{\text{ТЭ}} = \text{const}$;
- для каждого технологического элемента, входящего в технологическую группу, значение параметра $\text{КТБ}_{\text{ТЭ}}$ (комплект технологических баз для обработки ТЭ) одинаковое.

На третьем этапе формируются допустимые технологические маршруты обработки, которые определяются на основе анализа имеющегося технологического оборудования и применяемых методов получения заготовок.

На четвертом этапе производится анализ производственного графика по следующим условиям:

- наличие свободных интервалов времени, которые могут быть использованы для обработки партии деталей;
- расположение свободных интервалов времени должно соответствовать технологическому маршруту обработки (рис.3);
- величины свободных интервалов времени должны быть больше или равны продолжительности соответствующих технологических операций.

Рис.3. Анализ производственного графика

Рис.4. Алгоритм формирования множества допустимых вариантов

На основе проведенного моделирования производится коррекция множества допустимых технологических маршрутов обработки. Из допустимого множества исключаются варианты технологических маршрутов обработки, которые не удовлетворяют хотя бы одному из условий. На рис.4 представлен алгоритм формирования множества допустимых вариантов обработки.

Условные обозначения на рис.3, 4: ТО – технологическое оборудование; $T_{оп}$ – норма оперативного времени; T_i – срок изготовления партии деталей; $T_{идоп}$ – допустимый срок изготовления партии деталей; $T_{вр.инт}$ – величина временного интервала на производственном графике; $V_{ср}$ – среднее значение скорости обработки; V_{max} – значение максимальной скорости обработки.

На пятом этапе формируются технологические операции для каждого допустимого маршрута обработки. Каждая технологическая операция в структуре одного технологического маршрута является многовариантой. Многовариантность технологической операции заключается в наличии альтернативных вариантов применения различных типов заготовок, технологической оснастки (режущего инструмента) и режимов резания.

На шестом этапе производится анализ множества технологических маршрутов обработки с учетом многовариантности технологических операций. Анализ каждого технологического маршрута обработки производится на основе производственного графика с учетом загрузки каждой единицы технологического оборудования.

На седьмом этапе производится выбор рационального варианта технологического процесса. Рациональный вариант технологического процесса определяется на основе анализа трех критериев: величина переменных затрат, длительность производственного цикла и величина погрешности обработки. Для разработки математической модели были проанализированы данные критерии и выявлены параметры, которые оказывают наибольшее влияние на их значение. Наиболее существенное влияние оказывают следующие параметры: тип и геометрия режущего инструмента, тип и технические характеристики технологического оборудования, метод получения заготовки, метод обработки, квалификация основных производственных рабочих.

Содержание и параметры каждого этапа моделирования представлены в таблице.

Параметры имитационной модели

Этап обработки	Содержание этапа	Входные параметры	Выходные параметры
1	Анализ конструкции детали Формирование множества конструкторских элементов Формирование множества технологических элементов Формирование множества базовых элементов (комплекты технологических баз)	Конструкторская документация (чертеж детали): технические параметры отдельных поверхностей	Множество конструкторских элементов Множество технологических элементов Множество базовых элементов (комплекты технологических баз)
2	Формирование блоков поверхностей БП Формирование технологических групп ТГ в каждом блоке поверхностей	Множество конструкторских элементов $M_{КЭ}$ Множество технологических элементов $M_{ТЭ}$ Множество базовых элементов (комплекты технологических баз) $M_{БЭ}$	Множество блоков поверхностей $M_{БП}$ Множество технологических групп $M_{ТГ}$
3	Анализ технологических групп Формирование технологических маршрутов обработки	Множество технологических групп Тип и технические параметры технологического оборудования	Множество технологических маршрутов обработки $M_{ТМО}$
4	Анализ производственного графика Определение текущей загрузки технологического оборудования Выявление свободных временных интервалов для каждой единицы оборудования Определение размеров свободных временных интервалов	Производственный график	Размер и расположение свободных временных интервалов
5	Формирование структур технологических операций для каждого маршрута обработки	Множество технологических групп Множество технологических маршрутов обработки	Комплект технологической документации
6	Моделирование каждого технологического маршрута с учетом его многовариантности Определение длительности производственного цикла, величины переменных затрат, точности обработки наиболее ответственных поверхностей для каждого варианта технологического процесса с учетом его многовариантности	Комплекты технологической документации Параметры производственного процесса	Длительность производственного цикла Величина переменных затрат Точность обработки наиболее ответственных поверхностей
7	Определение значения целевой функции для каждого варианта технологического процесса с учетом весовых коэффициентов Выбор рационального варианта на основе значений целевой функции	Длительность производственного цикла Величина переменных затрат Точность обработки наиболее ответственных поверхностей	Рациональный вариант технологического процесса

Описание математической модели. Для определения рационального варианта технологического процесса обработки партии деталей производится расчет следующих параметров:

- срок изготовления партии деталей $T_{ИЦ}$;
- величина переменных затрат $Z_{пер}$;

- точность механической обработки y_i .

Целевая функция может быть записана в следующем виде:

$$F_{\text{ПЦ}} = \frac{(T_{\text{ПЦ}})_i}{(T_{\text{ПЦ}})_{\min}} K_T + \frac{(Z_{\text{пер}})_i}{(Z_{\text{пер}})_{\min}} K_3 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{(\Delta_{\Sigma})_i}{(\Delta_{\Sigma})_{\min}} \right)_j K_{\Delta};$$
$$K_T + K_3 + K_{\Delta} = 1,$$

где $(T_{\text{ПЦ}})_i$ – длительность производственного цикла по i -му варианту технологического процесса; $(T_{\text{ПЦ}})_{\min}$ – минимальная длительность производственного цикла для ТМО, входящих в $M_{\text{ТМО}}^{\text{раб}}$; $(Z_{\text{пер}})_i$ – величина переменных затрат на изготовление партии деталей по i -му варианту технологического процесса; $(Z_{\text{пер}})_{\min}$ – минимальная величина переменных затрат для ТМО, входящих в $M_{\text{ТМО}}^{\text{раб}}$; $(\Delta_{\Sigma})_i$ – величина погрешности обработки, получаемого по i -му варианту технологического процесса; $(\Delta_{\Sigma})_{\min}$ – минимальная величина погрешности обработки для оцениваемого параметра, полученная при реализации ТМО, входящего в $M_{\text{ТМО}}^{\text{раб}}$; K_T , K_3 , K_{Δ} – весовые коэффициенты.

Длительность производственного цикла зависит от нормы оперативного времени и величины времени простоев. Норма оперативного времени определяется по формуле [5]:

$$T_{\text{оп}} = T_o + T_{\text{вн.}}$$

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

При определении переменных затрат на производство партии деталей учитывались следующие категории затрат: сумма материальных затрат M , расходы на оплату труда Z , отчисления на обязательное государственное социальное страхование O [12];

$$M = \sum_{j=1}^m \Pi_{mj} M_j,$$

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;

$$Z = \alpha \text{Ч} \left(1 + \frac{P_{\text{д.з}}}{100} \right),$$

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

$$O = 3 \frac{P}{100},$$

P – рассчитываемый на основе законодательства суммарный процент отчисления в фонды от суммы расходов на оплату труда (руб.).

Погрешность обработки (мкм) определяется по формуле [10]:

$$y_i = 2[\Delta(i) + u(\tau, i) - \xi_p(i, \tau, u, t) - \xi_d(\xi_p) + \Delta_y(\tau, u)] + \eta_i;$$

суммарная погрешность позиционирования

$$\Delta_i = K_1(i + 1) + K_2;$$

износ режущего инструмента

$$u(i, \tau) = K_3\tau + K_3(i - 1) + K_4 \left(1 - e^{-\frac{(i-1+\tau)}{K_5}} \right);$$

тепловая деформация режущего инструмента

Рис.5. Твердотельная модель детали «Втулка»

$$\xi_p(i, \tau, u, t) = K_6 t^{0,85} (1 + K_7 u) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{K_8}} \right) + e^{\frac{\tau_{охл}}{8}} \xi_{p(i-1)}^{\max} e^{-\frac{\tau}{K_8}};$$

тепловая деформация детали

$$\xi_d(\xi_p) = K_9 \xi_p;$$

упругие деформации технологической системы

$$\Delta_y(\tau, u) = K_{10} t (1 + K_{11} u) (1 - K_{12} \tau);$$

неуточненная часть случайной составляющей погрешности обработки

$$\eta_i = \pm \sigma,$$

где i – номер детали в партии; τ – время обработки i -й детали; t – глубина резания; $\tau_{охл}$ – время охлаждения режущего инструмента перед обработкой i -й детали; K_1 - K_{12} – коэффициенты, зависящие от параметров обработки (материал детали, материал режущей части инструмента, характеристики технологического оборудования и т.д.)

Практическое применение модели. Описанная имитационная модель применяется на этапе технологической подготовки производства судоремонтного завода (г. Санкт-Петербург). Основным направлением деятельности предприятия является ремонт и обслуживание небольших судов, а также изготовление небольших партий деталей (единичное и мелкосерийное производство). На рис.5 представлена твердотельная модель детали «Втулка», которую необходимо изготовить в количестве 200 шт.

Решаемые технологические задачи. Наиболее точная поверхность – наружная цилиндрическая $\phi 23k6$, Ra0,8, точность изготовления остальных поверхностей в пределах 11-14 квалитетов с чистотой поверхностного слоя Ra6.3-Ra12,5.

Рассмотрены варианты заготовок – круглый прокат и поковка.

На предприятии установлено следующее технологическое оборудование: фрезерные станки BMV850 (2 шт.), токарно-фрезерный станок Multus B200, токарно-фрезерный станок Multus B300, токарные станки DUS400 (2 шт.), токарный станок DUS560, круглошлифовальный станок FCD200.

При моделировании производственного процесса изготовления партии деталей «Втулка» были рассмотрены восемь допустимых технологических маршрутов обработки. Для каждого технологического маршрута обработки спроектированы технологические процессы. Моделирование каждого технологического перехода производилось с использованием трех альтернативных вариантов режущего инструмента.

С учетом всех возможных вариантов технологических маршрутов обработки, технологического оборудования, типов заготовок, технологической оснастки смоделирован 2531 вариант технологического процесса. Для каждого варианта технологического процесса были рассчитаны срок изготовления партии деталей, величина переменных затрат и величина погрешности для наиболее точных поверхностей. На основе этих показателей для каждого варианта технологического процесса определено значение целевой функции с учетом весовых коэффициентов и выбран рациональный вариант. Были приняты следующие значения весовых коэффициентов: $K_T = 0,35$, $K_3 = 0,45$, $K_A = 0,2$.

Выводы. Разработанная имитационная модель технологической подготовки производства позволяет решить следующие задачи:

- произвести анализ производственного графика;
- сформировать множество допустимых вариантов технологического процесса обработки для партии деталей;
- произвести анализ каждого варианта технологического процесса с учетом его многовариантности (применения различных вариантов технологической оснастки, режимов резания, типов заготовок и т.д.);
- для каждого варианта технологического процесса определить длительность производственного цикла, величину переменных затрат, величину погрешности обработки для наиболее ответственных поверхностей.

• выбрать рациональный вариант технологического процесса обработки партии деталей на основе многокритериального анализа.

Таким образом, применение разработанной имитационной модели позволяет в значительной степени снизить трудоемкость этапа технологической подготовки производства и выбрать рациональный вариант изготовления партии деталей на основе многокритериального анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверченков А.В. Автоматизация выбора стратегии обработки конструкторско-технологических элементов деталей в технологической подготовке производства изделий // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Вып. 3(48). С. 76-80.
2. Андреев В.В. Динамическая модель управления конструкторско-технологическим взаимодействием САПР / В.В.Андреев, Е.В.Тесленко, В.П.Хранилов // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. Вып. 3. С. 64-67.
3. Балакина В.А. Роль системы автоматизации процессов управления при технологической подготовке производства // Вестник научных конференций. 2017. № 6-3(22). С. 18-20.
4. Берлинер Ю.М. САПР технолога машиностроителя / Ю.М.Берлинер, О.В.Таратынов. М.: ФОРУМ, 2015. 336 с.
5. Бычин В.Б. Нормирование труда / В.Б.Бычин, С.В.Малинин. М.: «Экзамен», 2003. 320 с.
6. Вороненко В.П. Информационная модель базового производственно-технологического решения для адаптации технологического процесса к текущему состоянию системы предприятия / В.П.Вороненко, В.А.Долгов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. Вып. 3(15). С. 173-177.
7. Калачев О.Н. Опыт реализации единого информационного пространства на машиностроительном предприятии / О.Н.Калачев, Д.А.Калачева // Инновации в машиностроении: Сборник трудов IX международной научно-практической конференции. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. С. 246-252.
8. Карнаев С.А. Интегрированная модель системы оперативного календарного планирования в условиях контрактного производства // Информатика и вычислительная техника: Сборник научных трудов; УлГТУ. Ульяновск, 2016. С. 136-143.
9. Краснов А.А. Управление технологической подготовкой производства деталей, изготавливаемых на оборудовании с ЧПУ в условиях мелкосерийного производства / А.А.Краснов, А.В.Рыбаков, С.А.Евдокимов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2015. Вып. 1(32). С. 69-73.
10. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов / И.И.Козарь, Д.Ю.Колодяжный, М.М.Радкевич, Т.А.Цимко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного университета. 2014. Вып.2(195). С. 194-201.
11. Максarov В.В. Технологическое обеспечение параметров точности и шероховатости станин на основе совершенствования торцевого фрезерования на станках с ЧПУ / В.В.Максаров, Р.Р.Рахманкулов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технической академии им. П.А.Соловьева. 2017. Вып. 1(40). С. 268-276.
12. Минко И.С. Основы экономики предприятия. СПб.: СПбГУНиПТ, 2000. 89 с.
13. Назарьев А.В. Формирование структуры комплекса проектных процедур для автоматизации технологической подготовки производства высокоточных изделий / А.В.Назарьев, П.Ю.Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. Вып. 9 (204). С. 128-132.
14. Пономарев В.В. Автоматизация ускоренной технологической подготовки производства пилотных экземпляров продукции в условиях серийного выпуска изделий. / В.В.Пonomарев, С.А.Чевычелов // Известия Курского государственного технического университета. 2010. Вып. 4(33). С. 82-87.
15. Kuznetsov A. Automation of Synthesis of Structures, Systems Engineering Strategies for Production / A.Kuznetsov, V.Stefan; International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM. 2016 // Procedia Engineering. 2016. Vol. 149. P. 212-215.
16. Using a learning factory approach to transfer Industrie 4.0 approaches to small- and medium-sized enterprises / Andreas Wank, Siri Adolph, Oleg Anokhin, Alexander Arndt, Reiner Anderl, Joachim Metternich; 6th CIPP Conference on Learning Factories // Procedia CIRP. 2016. Vol. 54. P. 89-94.
17. Mujber T.S. Virtual reality applications in manufacturing process simulation / T.S.Mujber, T.Szecs, M.S.J.Hashmi // Journal of Materials Processing Technology. 2004. № 155-156. P. 1834-1838.
18. Moreno-Doru Res. Means to Enhance the Performance of ERP Systems' Personalized Production Modules / Moreno-Doru Res, Vasile Paul Bresfelean; Emerging Markets Queries in Finance and Business // Procedia Economica and Finance. 2014. Vol. 15. P. 262-270.
19. Seleim A. Simulation Methods for Changeable Manufacturing / A.Seleim, A.Azab, T.AIGeddawy; 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012 // Procedia CIRP. 2012. Vol. 3 (1). P. 179-184.
20. Pokorny P. Automation of the Selection of the Integrated, Strategies / P.Pokorny, A.Kuznetsov; International Conference on Manufacturing Engineering and Materials. ICMEN 2016 // Procedia Engineering. 2016. Vol. 149. P. 380-383.

Авторы: С.А.Любомудров, канд. техн. наук, директор Высшей школы машиностроения, yubomudrow@yandex.ru (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), И.Н.Хрусталева, старший преподаватель, irina.khrustaleva@mail.ru (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), А.А.Толстолес, ассистент, gmlaletol@gmail.com (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), А.П.Маслаков, ассистент, alex.maslakov.ftk@gmail.com (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 2.05.2019.

Статья принята к публикации 26.07.2019.