

Ю.Л. Чигиринский, д.т.н.

(ФГБУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)

E-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru

Математические методы в технологическом проектировании

На основании анализа задач технологического проектирования показана возможность формализации начальных стадий технологической подготовки металлообрабатывающего производства за счет применения алгебраических структур дискретной математики, методов и алгоритмов теории вероятностей, теории сетей и графов, теории нечетких множеств.

Ключевые слова: технологическое проектирование; обеспечение точности и качества; математические методы; дискретная математика; алгебра логик; теория нечетких множеств.

Yu.L. Tchigirinsky, D. Eng.

(FSBI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia, 400005)

Mathematical methods in technological design

On the basis of the analysis of technological design problems there is shown a possibility for the formalization of initial stages of metal-working production technological preparation at the expense of algebraic structures of discrete mathematics, methods and algorithms of the probability theory, the theory of networks and graphs, the theory of fuzzy sets.

Keywords: technological design; accuracy and quality support; mathematical methods; discrete mathematics; logic algebra; theory of fuzzy sets.

Введение

Традиционная [7] последовательность проектирования технологии производства выстроена от формообразования к обработке, затем к сборке и испытаниям. При этом может возникнуть ситуация, когда отдельные этапы общего технологического процесса разрознены и не увязаны между собой и конечной целью. В результате возникает несоответствие между требованиями, предъявляемыми к изделию и реально обеспеченными свойствами. Подход [4], предложенный Б.С. Балакшиным и В.И. Комисаровым – от требований, предъявляемых к технологии общей сборки к требованиям процессов выполнения заготовок для деталей машин, – скрывает в себе угрозу того, что качество новой продукции будет определяться уровнем существующего производства. В результате применения каждого из традиционных подходов к технологическому проектированию возникает определенное несоответствие: либо завышенные, заведомо невыполнимые в условиях действующего производства требования, либо снижение требований в соответствии с возможностями производства.

Возможным решением указанной проблемы может быть сквозное [6] технологическое проектирование. По данному принципу технологии предлагается создавать в зависимости от требуемых свойств изделия, «двигаясь» в обратном направлении: от предусмотренных разработчиком свойств изделия к комплексу технических требований для сборки, далее – к предшествующим процессам обработки, и, в конечном итоге, – к процессам формообразования.

Особенность сквозной технологии состоит в том, что она позволяет решить вопрос сопряжения всех звеньев производства в единый технологический процесс, имеющий одну и ту же конечную цель – требуемые свойства изделия.

Для обеспечения заданного в конструкторской документации выходного свойства продукции необходимо обеспечивать это свойство, начиная с материала и первых процессов изменения его форм. Хотя технология реализуется по традиционной схеме – от формообразования, проектирование должно выполняться по-новому – от эксплуатационных

свойств изделия [5].

Необходимо целостное понимание технологии как единой системы, обладающей общими признаками и, следовательно, общими закономерностями развития. Для реализации принципа сквозной технологии надо уже на ранних стадиях проектирования продукции иметь в виду всю совокупность технологических процессов. При этом отличительными новыми свойствами этой совокупности, являющимися результатом реализации принципа сквозной технологии, будут сопряженность процессов и одна и та же конечная цель.

Такой подход требует, чтобы каждый технологический процесс получил своевременное развитие и имел ко времени начала производства новой продукции необходимые качества, обеспечивающие заданные конструкторской документацией характеристики. Для обеспечения такого развития технологии должны базироваться на двух началах:

- закономерность развития создаваемой продукции;
- внутренние закономерности развития самой технологии (вида технологии).

Множество частных (рис. 1) инженерных задач, к последовательному решению которых сводится деятельность специалиста, можно разделить на две группы. В отдельную группу выделяют задачи, решение которых сводится к выполнению расчетов по формулам – так называемые, формализованные (иногда говорят – рутинные) задачи. Именно для решения формализованных проектных задач были разработаны первые САПР, реализованные на промышленном уровне. К числу рутинных задач относятся расчеты по известным методикам, оформление технической документации, а также поиск информации, необходимой для выполнения процесса проектирования.

Современные инженерные задачи имеют, как правило, ситуационный характер, так как для современного производства характерны высокие темпы развития, глубокие изменения технической базы под влиянием технического прогресса, мобильность, скоротечность процессов и, как следствие этого, быстрая смена ситуаций и обстоятельств, в которых осуществляется производство.

В условиях традиционного проектирования большая часть времени отводится на решение задач, которые условно называют неформализованными – задач, для которых не установлены функциональные соотношения или алгоритмы, позволяющие формально, без привлечения интуиции и опыта инженера, получать

решения, отвечающие техническим требованиям.



Рис. 1. Структура технологического проектирования

В самом общем случае проектная деятельность инженера начинается с концептуального выбора технического решения, и эта задача оказывается наиболее трудной в плане формализации. Следует отметить, что в условиях комплексной автоматизации проектных работ удельная доля рутинных проектных манипуляций может быть существенно (до 70...75 %) увеличена – в первую очередь за счет уменьшения трудоемкости решения неформализованных задач.

Основным преимуществом применения математических методов и информационных технологий на этапе концептуального проектирования является возможность проведения всестороннего экономического и технического

анализа альтернативных решений до окончательного утверждения концептуального проекта.

В то же время, следует учесть, что возникновение ошибок, особенно на начальных стадиях проектирования – на этапе принятия концептуального решения, – приводит к резкому увеличению трудоемкости подготовки производства и, как следствие, к запоздалому запуску изделия в производство. Затраты, возникающие в связи с исправлением ошибок, повторными циклами изготовления, испытаниями и корректировки опытных образцов ведут к серьезным экономическим потерям. Эти соображения и диктуют необходимость поиска формализованных методов решения задач, возникающих на начальных этапах технологического проектирования.

До последнего времени автоматизация труда инженера базировалась на принципах, преимущественно, геометрического моделирования и компьютерной графики. При этом системы компьютеризации труда конструкторов, технологов, технологов-программистов, инженеров-менеджеров и производственных мастеров развивались автономно и инженерные знания – основа проектирования – оставались вне компьютера.

В настоящее время речь идет о комплексной автоматизации и компьютеризации инженерной деятельности на всех этапах (CALS) жизненного цикла изделий. При использовании CALS-технологий основой проектирования является комплексная информационная [5] модель изделия. В современных и перспективных системах автоматизации инженерного проектирования построение информационных моделей базируется на методах дискретной математики и алгебры множеств.

Математическое обеспечение технологического проектирования

Развитие современного производства основывается на целевом применении к решению производственных задач достижений фундаментальных наук. Ранее [10] было определено, что технологическое проектирование является процессом, рассмотрение (и прогнозирование результатов) которого возможно с позиций экономико-математического моделирования. В частности, вполне оправданным является рассмотрение задач технологии как оптимизационных.

Для большинства задач технологического проектирования можно найти множество «корректных» решений, т.е. решений, удовле-

творяющих системе технических ограничений, и выделить в этом множестве оптимальное решение. Основные требования, определяющие «корректность» [1, 2, 6,10] технологического процесса, заключаются в необходимости достижения заданных требований точности и качества изготавливаемых изделий. В качестве критерия оптимизации мы предлагаем, в соответствии с ранее выполненным анализом проблемы, какой-либо из критериев экономического [3, 10] характера, например, себестоимость обработки.

Традиционно разработку технологического процесса механической обработки рекомендуется [7] вести в следующей последовательности: анализ объекта производства; определение типа производства и предварительный, укрупненный выбор оборудования и оснастки; выбор исходной заготовки; анализ возможных способов формообразования отдельных поверхностей; разработка последовательности обработки поверхностей заготовки; выбор технологических баз; уточнение выбора оборудования; разработка планов выполнения отдельных операций.

В основе проектирования технологии механической обработки лежат проблемы формирования заданного качества деталей. Качество большинства изделий машиностроения, в целом, определяется не столько геометрической точностью отдельных поверхностей, сколько точностью взаимного расположения поверхностей – обеспечиваются, в основном, выбором базовых поверхностей на каждом этапе обработки, – и микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками обработанных поверхностей, что определяется технологическими режимами и возможностями методов обработки. Здесь же необходимо учитывать и проблемы, связанные с технологической наследственностью. Отметим, что для решения задач выбора последовательности обработки и последовательности переменных баз можно использовать методы дискретной математики.

Наиболее удачной попыткой формализации связей между последовательностью применения методов обработки отдельных поверхностей и точностными показателями изделия в целом является размерный анализ (Ивашенко И.А., Калачев О.Н., Матвеев В.В., Шамин П.Ю. и др.) технологических процессов, позволяющий представить технологическую последовательность в виде системы линейных уравнений. Вычислительный математический аппарат решения таких систем не отличается

особой сложностью и традиционно изучается в курсе высшей математики технического вуза. Этого нельзя сказать о неформализованной задаче генерации системы уравнений по описанию последовательности обработки.

Если рассматривать проектную документацию – технологический маршрут и комплект операционных эскизов – как структурно-временную таблицу, можно представить систему размерных связей технологического процесса в виде неориентированного графа. Тогда, за счет использования основных понятий дискретной математики, задача автоматической генерации системы размерных цепей может быть сведена к известной «задаче Эйлера» или «задаче о кенигсбергских мостах». Используя любой из алгоритмов поиска Эйлеровых путей в графе, можно проверить наличие связей между границами замыкающих звеньев и, таким образом, получить описание графа в виде системы линейных уравнений.

Аналогичные рассуждения можно применить к проблеме нахождения возможных последовательностей методов обработки, обеспечивающих получение поверхностей детали с заданными точностными показателями. В этом случае анализ таблиц точности обработки позволяет построить «граф обработки поверхности», в котором можно искать либо Эйлеровы пути – все возможные последовательности, либо кратчайший (задав критерий длины каждого ребра графа) маршрут, – оптимальную последовательность. Экономический характер подобных задач определяется выбором критерия оптимизации – выше было отмечено, что в качестве критерия правильности чаще всего применяется величина затрат на производство.

Элементарный маршрут обработки отдельной поверхности устанавливаются, исходя из требований рабочего чертежа и характеристик принятой заготовки. По заданному качеству точности и шероховатости поверхности с учетом размера, массы и формы детали выбирают возможные методы окончательной обработки [9]. Особенности выполнения отдельных операций не позволяют дать заключение о точности обработки по аналогии с другими операциями, так как между ними не бывает всестороннего сходства. В частности, отличаются размеры и форма обрабатываемых заготовок, состояние оборудования, режимы обработки и другие технологические факторы. Хотя таблицы (табл. 1) точности [9] дают только общее представление о возможной точности обработки, они необходимы как справочные дан-

ные при проектировании технологических процессов.

1. Пример таблицы точности обработки

Метод обработки		Параметр шероховатости поверхности Ra , мкм	Квалитет точности
Обтачивание	обдирочное	100...50	17–14
	черновое	50...25	14–12
	получистовое или однократное	12,5...3,2	12–10
	чистовое	6,3...1,6	11–7
	тонкое	0,8...0,4	7–6
Шлифование	предварительное	1,6...0,8	8–7
	чистовое	0,8...0,4	7–6
	тонкое	0,4...0,1	5–3

Для упрощения рассмотрим только два критерия: высоту микронеровностей, как показатель качества обработанной поверхности и номер квалитета – показатель точности обработки. Каждый метод обработки определяется диапазоном достижимых показателей качества и точности. Предельные значения диапазона определяются из соображений экономичности (для нижних границ) или достижимости по технологическим возможностям метода – для верхних.

Так, например, обработку поверхности с шероховатостью Ra 1,6 мкм можно выполнять чистовым точением (верхняя граница диапазона), но вероятность получения заданного качества поверхности будет недостаточно высокой – потребуется, вероятно, некоторое занижение режимов обработки, либо использование инструмента со специальной геометрией – что приведет к неоправданному увеличению затрат на обработку. В то же время, использование метода предварительного шлифования (нижняя граница) позволит гарантированно получить требуемое качество поверхности при минимальных затратах на обработку.

Однако следует признать, что надежность справочных данных недостаточно высока. Исследования [11] подтверждают гипотезу о сущности – до 15...40 %, в зависимости от характера справочных величин, – различий однородных данных, взятых из различных источников. Причина такого расхождения лежит, во-первых, в «отраслевой природе» применяемой справочной литературы и, во-вторых, в достоверности статистических методик, используемых при формировании справочных массивов.

Кроме того, недостаточной следует признать также полноту справочной информации. В частности, только в последнее время проблема технологического обеспечения физико-механических характеристик поверхностного слоя сформулирована как глобальная. Об этом говорится в программных документах Национальной Технологической Инициативы (НТИ) в части описания барьеров рынка TechNET.

Как правило, опыт инженера-технолога позволяет дополнить таблицы точности обработки сведениями о возможностях каждого метода обработки в части повышения качества обрабатываемой поверхности или точности выполняемых размеров. В настоящее время эти показатели методов обработки определяются в зависимости от технологических традиций предприятия, эмпирически, с учетом рекомендаций справочной литературы [9], либо, достаточно часто, при проектировании используется субъективный опыт технолога. И в одном и в другом случае вероятны ошибки технологии, выявление и исправление которых становится возможным на самых последних стадиях технологической подготовки производства.

Для примера рассмотрим технологическую цепочку из двух последовательно выполняемых переходов: чернового и получистового точения наружной цилиндрической поверхности. По данным табл. 1, в результате возможно получение поверхности с высотой микронеровностей (по Ra) от 12,5 до 3,2 мкм.

Сравнивая вероятные значения шероховатости по правилам приближенных (1) вычислений – т.е. так, как рекомендовано выполнять расчеты по справочным исходным данным – получим, что высота микронеровностей обработанной поверхности на последнем переходе может уменьшиться в 2...16 раз (9 ± 7).

$$\delta_{IT}^{\min} = IT_i^{\min} - IT_{i-1}^{\max}; \delta_{IT}^{\max} = IT_i^{\max} - IT_{i-1}^{\min} \text{ или}$$

$$\delta_{Ra}^{\min} = \frac{Ra_i^{\min}}{Ra_{i-1}^{\max}}; \delta_{Ra}^{\max} = \frac{Ra_i^{\max}}{Ra_{i-1}^{\min}}. \quad (1)$$

Однако неформальные – сравнение проведем по отдельности (2) для верхних и для нижних границ диапазона – данные говорят, что в данном случае «улучшение» качества поверхности возможно не более чем в 4...8 раз (6 ± 2).

$$\delta_{IT}^{\min} = IT_i^{\min} - IT_{i-1}^{\min}; \delta_{IT}^{\max} = IT_i^{\max} - IT_{i-1}^{\max} \text{ или}$$

$$\delta_{Ra}^{\min} = \frac{Ra_i^{\min}}{Ra_{i-1}^{\min}}; \delta_{Ra}^{\max} = \frac{Ra_i^{\max}}{Ra_{i-1}^{\max}}. \quad (2)$$

Аналогичные рассуждения в отношении точности выполняемых размеров позволяют получить величину уточнения в пределах 1...3 номеров квалитетов (2 ± 1) против формального значения, находящегося в пределах от -1 (снижение точности) до 5 номеров квалитетов (2 ± 3). Очевидно, статистические данные, определенные с размахом значений, больших номинала, заслуживают некоторого недоверия. Проблеме достоверности справочной информации в части повышения качества/точности изделия в процессе обработки посвящены исследования различных технологических научных школ России.

Предположим, однако, что проблема решена. Статистически достоверные данные о повышении качества поверхности и точности выполняемых размеров (уменьшение номера квалитета точности и относительное снижение высоты микронеровностей обработанной поверхности) для каждого технологического метода получены и обоснованы. Тогда можно дополнить существующие справочные массивы этими сведениями (табл. 2). В этом случае появляется возможность применения математических методов для анализа точности обработки.

Для наглядности модифицированная таблица точности представлена в виде, так называемой, «вероятностной» матрицы (рис. 2), представляющей собой формальное описание (матрицу смежности) графа формирования показателей точности/качества обработки поверхности.

Значения величин изменения показателей качества показаны выше «главной диагонали» вероятностной таблицы. Ниже главной диагонали, симметрично этим значениям, приведены вероятностные оценки достоверности изменения качества. Например (см. рис. 2), снижение высоты микронеровностей при чистовом зенкерованием после получистового в 1,12 раза возможно с вероятностью не более 68%.

Подобная информационная структура создается для каждого нормируемого (и, соответственно, обеспечиваемого при обработке и контролируемого) показателя точности/качества. Например, если конструктор устанавливает требования в отношении качества точности и шероховатости поверхности изделия, то результирующий информационный массив должен содержать два «слоя». Если на рабочем чертеже дополнительно установлена норма в отношении глубины, так называемого,

«дефектного» слоя – то информационный массив, на основании которого проектируется последовательность обработки, должен быть трехслойным. Таким образом, граф обработки,

формально описываемый «многослойной» вероятностной таблицей точности, является многомерным.

2. Пример дополненной таблицы точности обработки

Метод обработки		Шероховатость		Точность	
		Ra, мкм	Улучшение	IT	Улучшение
Обтачивание	черновое	50...25	2	14–12	2...3
	получистовое или однократное	12,5...3,2	4...8	12–10	2
	чистовое	0,8...0,4	2...4	7–6	1...4
Шлифование	тонкое	0,4...0,1	2...4	5–3	2...3

Предыдущий переход		Допуск		Повышение качества (отношение)						
				Следующий переход						
				1	2	3	4	5	6	
1.	зенкер. черновое	10	20			1,15	1,29	2,22	4,4 ²	← номер следующего перехода
2.	сверление	10	20			1,15	1,29	2,22		
3.	зенкер. получист.	4	16	0,91	0,81		1,12			изменение показателя качества (в 1,12 раза) с вероятностью 0,68
4.	зенкер. чистовое	4	10	1	1	0,68				
5.	разверт. получист.	1,25	6,30	1	1	1				
6.	шлиф. получист.	1,25	3,20	1	1					
7.	разверт. чистовое	1,00	3,20	1	1					
8.	шлиф. чистовое	0,40	1,25							
9.	разверт. тонкое	0,32	1,25							
10.	шлиф. тонкое	0,16	0,							

границы технологического допуска

номер и название предыдущего перехода в технологической цепочке

Рис. 2. Элементы слоя вероятностной таблицы точности

Для снижения трудоемкости формализованного решения задач маршрутного проектирования предлагается устанавливать доверительную вероятность, определяющую порог значимости изменения величин технологических показателей для каждой пары методов обработки, смежных в маршруте. Использование доверительной вероятности позволяет перейти от математических операций теории нечетких множеств на многомерных алгебраических структурах (рис. 2, табл. 3) к методам логики «исключенного третьего» (операциям классической алгебры логик) на плоском графе (табл. 4).

Поиск возможных маршрутов, в этом случае, может быть выполнен, например, с помощью известного «Алгоритма Дейкстры».

Сетевая модель обработки позволяет учесть величины затрат (энергетических, временных, материальных) на обработку, которые опреде-

ляются в зависимости от вида выполняемой обработки (так же, как в традиционном проектировании) и в зависимости от всех ранее выполненных и последующих технологических операций. Затраты рассматриваются как весовые показатели дуг сети. Аналогичным образом, в качестве весового показателя можно рассматривать и вероятностную оценку достоверности изменения технологического показателя. Суммарный «вес» дуг сети, составляющих маршрут обработки, представляет собой целевую функцию при нахождении оптимального маршрута.

Таким образом, рассматривая задачи технологического проектирования с точки зрения методов теории графов, классической теории множеств и теории нечетких множеств и классической логики, можно установить соответствие между инженерными задачами, решаемыми на начальных стадиях технологической

подготовки производства и т. наз., содержательными постановками задач дискретной математики:

- размерный анализ технологического процесса – задача Эйлера;
- расчет оптимальной последовательности обработки – задача о потоке минимальной

- стоимости или задача о кратчайшем пути;
- оперативное планирование производства;
- задача о максимальном потоке или задача перераспределения ресурсов;
- выбор оборудования для условий единичного и серийного производства – задача о назначениях.

3. Пример вероятностной таблицы точности (слой «глубина дефектного слоя»)

Предельный переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, h_c , мм			Достоверность (%) \ изменение h_c (кратность)								
		min	max	сред	следующий переход								
					1			2			3		
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1	черновое	0,145	0,445	0,295				3,41	3,96	3,81	9,67	6,85	7,38
2	чистовое	0,043	0,113	0,078	99,99						2,83	1,73	1,94
3	тонкое	0,015	0,065	0,040	0,00			99,12					

4. Описание плоского невзвешенного графа (доверительная вероятность 99,00 %)

Предельный переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, IT			Следующий переход					
		min	max	сред	Логическая возможность изменения IT					
					1		2		3	
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1	черновое	11,71	13,71	12,71			1		0	
2	чистовое	9,71	11,29	10,50	100,00				1	
3	тонкое	6,83	8,5	7,67	0,00		100,00			
Предельный переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, Ra , мкм			Логическая возможность изменения Ra					
		min	min	min	Логическая возможность изменения Ra					
					1		2		3	
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1		5,69	19,00	12,35			1		0	
2	5,69	1,64	5,13	3,39	99,99				1	
3	1,64	0,51	1,40	0,96	0,00		99,99			
Предельный переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, h_c , мм			Логическая возможность изменения h_c					
		min	max	сред	Логическая возможность изменения h_c					
					1		2		3	
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1	черновое	0,145	0,445	0,295			1		0	
2	чистовое	0,043	0,113	0,078	100,00				1	
3	тонкое	0,015	0,065	0,040	0,00		99,12			
Предельный переход	Фрезерование торцевой фрезой	Матрица смежности плоского графа (логическая возможность изменения всех технологических показателей)								
		1		2		3				
		min	max	min	max	min	max			
		min	max	min	max	min	max			
1	черновое			1		0				
2	чистовое	99,99				1				
3	тонкое	0,00		99,11						

Таким же образом к методам линейного программирования можно свести задачи расчета оптимальных режимов обработки, расчета межоперационных заделов, синхронизации по времени отдельных операций при проектировании поточного производства и т. д.

Таким же образом к методам линейного программирования можно свести задачи расчета оптимальных режимов обработки, расче-

та межоперационных заделов, синхронизации по времени отдельных операций при проектировании поточного производства и т. д.

Часть задач по обеспечению работоспособности машиностроительного производства следует отнести к задачам организационного характера, таким как, например, организация плановых ремонтов оборудования, занятого в производстве. При постановке оборудования

на плановый, а тем более на внеплановый, ремонт возникает необходимость перераспределения загрузки работающего оборудования. Подобная задача решается и в процессе производственной подготовки – при оснащении технологического процесса основным оборудованием и при проектировании планировок и компоновок производственных помещений.

Выводы

1. Применение сетевых математических моделей в сочетании с методами теории вероятностей, классической теории множеств и логической алгебры и теории нечетких множеств для представления информации о процессе обработки и о «мгновенном» состоянии изделия на каждом этапе производства позволяет использовать алгоритмы дискретной математики для формализации и алгоритмизации некоторых задач технологического проектирования.

2. Наиболее подходящей алгебраической структурой для представления процесса механической обработки является «транспортная сеть», представляющая собой взвешенный ориентированный граф с одним «источком» (заготовка) и одним «стоком». Любой узел сети задается некоторым набором параметров, определяющих состояние изделия в соответствующий момент времени («мгновенное» состояние), – например, характеристиками точности размеров, состояния поверхности и др.

3. В зависимости от математической постановки, методы дискретной математики могут рассматриваться как средство решения инженерных задач обеспечения требований качества и точности изделий и задач организационного и технического проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/5141.html> – ЭБС «IPRbooks».
2. Технология машиностроения: в 2 т. / А.И. Кондаков, А.С. Васильев и др.; – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 480 с.
3. Численные методы оптимизации: учеб. пособ. / В.И. Рейзлин. – Томск: Изд-во Нац. исслед. Томского политех. ун-та, 2013. – 105 с.
4. Комиссаров, В.И., Леонтьев, В.И. Точность, производительность и надежность в системе проектирования технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
5. Научные основы управления качеством изделий путем модификации поверхностного слоя материалов / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, В.В. Золотарев // Научно-технические технологии на современном этапе развития машино-

строения: сб. науч. тр.: Матер. VIII междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 19-21 мая 2016 г.) / МАДИ. – Москва, 2016. – С. 201–204.

6. Основы автоматизации технологических процессов и производств : учеб. пособ. : в 2 т. / Г.Б. Евгеньев и др.; под ред. Г.Б. Евгеньева. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

7. Р 50-54-93-88: Рекомендации. Классификация, разработка и применение технологических процессов. – М.: Издательство стандартов, 1988.

8. Сафонов, С.В., Григорьев, С.Н. Оптимизация выбора технологических процессов на базе принципа подобия в машиностроении // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 37–42.

9. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т. 1. / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, А.Г. Косилова, Р. К. Мещеряков; под ред. А.М. Дальского. – 5-е изд. – М.: Машиностроение, 2001. 2003. – 910 с.

10. Чигиринский, Ю.Л. Математические методы управления процессами механической обработки: монография. – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2010. – 139 с.

11. Чигиринский, Ю.Л. Надежность справочных данных, применяемых в технологическом проектировании / Известия ОрелГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – №2-2/274(560). – С. 103–108.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Parts Surface Engineering* / authors' group under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320. Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/5141.html> – EBS «IPRbooks».
2. *Engineering Techniques*: in 2 Vol. / A.I. Kondakov, A.S. Vasiliev et al.; M.: Bauman STU of Moscow, 2016. – pp. 480.
3. *Numerical Methods of Optimization*: manual / V.I. Reizlin. – Tomsk: Publishing House of National Research Polytech. University of Tomsk, 2013. – pp. 105.
4. Komissarov, V.I., Leontiev, V.I. *Accuracy, Productivity and Reliability in System of Engineering Procedure Design*. – M.: Mechanical Engineering, 1985. – pp. 224.
5. Scientific fundamentals of product quality control through modification of material surface layers / S.F. Safonov, V.P. Smolentsev, V.V. Zolotaryov // *Science Intensive Technologies at Current Stage of Mechanical Engineering Development: Proceedings of the VIII-th Inter. Scientif. Tech. Conf.* (Moscow, May 19-21, 2016) / MADI. – Moscow, 2016. – pp. 201-204.
6. *Automation Fundamentals of Engineering Procedures and Productions*: manual: in 2 Vol. / G.B. Yevgenyev et al.; under the editorship of G.B. Yevgenyev. – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2015.
7. R 50-54-93-88: *Recommendations. Classification, Development and Application of Engineering Procedures*. – M.: Standards Publishing House, 1988.
8. Safonov, S.V., Grigoriev, S.N. Optimization of engineering process choice based on principle of similarity in mechanical engineering // *Bulletin of Solovievov State Aircraft Technological Academy*. – 2017. – No.2 (41). – pp. 37-42.
9. *Technologist-Mechanician's Reference Book*. In 2 Vol. Vol.1. / A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov; under the editorship of A.M. Dalsky. – 5-th Ed. – M.: Mechanical Engineering, 2001. 2003. – pp. 910.
10. Chigirinsky, Yu.L. *Mathematical Methods of Machining Control*: monograph. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2010. – pp. 139.
11. Chigirinsky, Yu.L. Reliability of reference data used in technological design / *Proceedings of OrelSTU. Series "Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology"*. – 2009. – No.2 – 2/274(560). – pp. 103-108.

Рецензент д.т.н. П.Ю.Бочкарев