

DOI:10.6060/snt.20216501.0010

УДК 62-5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.Н. Павлова, О.В. Кузнецова

Александра Николаевна Павлова

Проектно-конструкторское бюро АО «Производственное объединение «Севмаш»

АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега»

E-mail: alexandrapavlova@yandex.ru

Статья посвящена применению математического моделирования и оптимизации технологических процессов механической обработки деталей в судостроении. Выделены разделы математического моделирования, которые могут быть использованы на разных этапах проектирования элементов техпроцесса. Определены наиболее часто используемые критерии и сформулирована задача оптимизации технологического процесса. В качестве наиболее перспективного метода оптимизации техпроцесса определен метод структурного проектирования и построен график поэтапной оптимизации элементов техпроцесса. Построена математическая модель механической обработки детали типа «вал червячный». Разработана игровая модель обоснования принятия решения о выборе между временем выполнения технологической операции и стоимостью оснастки. Материалы исследования могут быть применены в работе конструкторско-технологических подразделений машиностроительных предприятий.

Ключевые слова: математическая модель технологического процесса

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

A.N. Pavlova, O. V. Kuznetsova

Alexandra Nikolaevna Pavlova

Design Bureau of JSC "Production Association "Sevmash"

JSC "Research Design and Technology Bureau" Onega"

E-mail: alexandrapavlova@yandex.ru

The article concentrates on mathematical modeling and optimization of the mechanical operation of the component parts in ship-building. The study describes the branches of the mathematical modeling, which can be applied on different stages of the constructional design. It defines the most frequently used criteria and states the goal of the technological process optimization. The article defines the structural design method as the most advanced optimization method, which is demonstrated by the graph of the technological process optimization by stages. The study develops a mathematical model of the mechanical operation of worm shafts and develops a gaming model of decision making between the technological operation execution time and equipment cost. The research materials can be applied in the work of design and technological subdivisions of machine-building enterprises.

Key words: mathematical model of the technological process

На современном этапе развития машиностроения складывается общее понимание невозможности управления технологическими процессами без адекватной информационной поддержки, основанной на математическом моделировании.

Следует учитывать, что изготовление изделий в механических цехах судостроительного предприятия, являющегося объектом исследования, характеризуется широкой номенклатурой, что связано с выпуском продукции по индивидуальным заказам или

партиями небольшого размера. Современному судостроительному производству, самостоятельно изготавливающему комплекты для уникальных механизмов, свойственна частая смена выпускаемых изделий.

Большая номенклатура изделий, снижение серийности и сокращение партий их выпуска увеличивают потери времени, связанные с частыми переналадками технологического оборудования и оснастки [2]. Вследствие этого можно констатировать увеличение сроков изготовления деталей, снижение эффективности их производства и повышение общей себестоимости изделия. Для решения этих проблем может быть использован метод математического моделирования.

Каждый изучаемый процесс можно описать математическими моделями, отражающими отдельные черты исследуемого объекта. Их использование позволяет яснее увидеть взаимосвязь причин и следствий, входов и выходов, быстрее сделать необходимые выводы, принять обоснованное решение.

Теоретической и методической основой данной работы послужили фундаментальные исследования ведущих отечественных и зарубежных ученых:

изучением прогрессивных технологических процессов в машиностроении занимались: А.В. Тихомиров, Ю.Г. Кулик и Б.А. Беликов;

общие подходы к разработке универсальной модели технологического процесса представлены в трудах Н.И. Марковой и В.А. Тихомирова, В.С. Никитина и П.Г. Яковенко;

оптимизации технологических процессов в машиностроении посвящены работы Д.Л. Скуратова, В.Н. Трусова, Д.А. Ласточкина и С.В. Илюшина;

математическим моделированием процесса базирования заготовок посвящены работы С.А. Томилина, Ю.С. Сысоева, Н.А. Сысоева, В.В. Маневича;

функционально-структурное моделирование на разных этапах проектирования технологического процесса применя-

лось в исследованиях Г.А. Киселева Г.А., В.Ю. Гуленкова, С.К. Лавровского, С.С. Сафаревича и И.Л. Туккеля, а также Н.Н. Трушина и Н.В. Кучмы.

Объектом исследования является технологический процесс (ТП) изготовления деталей в механических цехах судостроительного предприятия. Предметом исследования являются методы, модели математического моделирования и оптимизация технологического процесса изготовления деталей в механических цехах машиностроительного предприятия.

Методы построения моделей, предложенные в исследованиях перечисленных авторов, трудоемки и предполагают наличие сложных корреляций. Оптимизация параметров технологического процесса – это область, требующая более подробного изучения. Поэтому применение математического моделирования и оптимизация многооперационного технологического процесса изготовления деталей механизированных цехов является актуальной задачей, как в научном, так и в практическом смысле.

Технологический процесс, как объект проектирования, можно представить в виде иерархической структуры, расчлененной на несколько взаимосвязанных уровней. Оптимальный выбор проектных процедур при разработке ТП основан на применении математического моделирования.

В результате анализа современных направлений применения математического моделирования к технологическим процессам было принято решение остановиться на разделах, возможных для применения, представленных в таблице 1. Выбранный математический аппарат широко применяется в научных исследованиях в области технологии машиностроения для описания и оптимизации ТП и отдельных технологических операций.

Так, например, в области математического описания процесса формообразования, рассматривая уравнения относительного движения режущих кромок инструмента и технологических баз деталей, содержащих в качестве аргументов действующие факто-

ры и величины, отражающие свойства технологической системы, её количественные характеристики и величины погрешности, используют статистические методы исследования и построения регрессионной модели.

При разработке рекомендаций по повышению точности геометрических форм изделий посредством распределения припусков базирования при механической об-

работке резанием используют методы аналитической геометрии [3].

Методы линейного программирования и многокритериальной оптимизации используются для генерации и выбора оптимальных размерных структур технологии механической обработки.

В таблице 1 приведены разделы, используемые при оптимизации структурных элементов ТП.

Таблица 1

Применение математического моделирования на разных этапах оптимизации элементов структуры ТП

Разделы математического моделирования	Элементы структуры ТП							
	Переходы	Установы		Операции		Варианты ТП		
		Базирование	Позиция	Режимы	Время	Станок	Приспособление	Инструменты
Теория множеств	+					+		
Теория графов	+	+	+	+				
Теория оптимизации	+	+		+		+	+	+
Общая теория статистики				+	+	+	+	
Теория функций					+			+
Аналитическая геометрия		+	+					+
Математический анализ					+		+	+
Теория игр						+	+	+

Как видим, наиболее часто используемыми являются теория оптимизации, теория графов и общая теория статистики.

Под математической моделью ТП и его элементов будем понимать систему математических объектов и их соотношений (чисел, переменных, множеств, графов, матриц и т.д.), описывающих с требуемой точностью изучаемый объект и его поведение в действительных производственных условиях [4].

Задачи проектирования ТП являются многовариантными.

К ним относятся, например, задачи выбора оборудования, режущего инструмента, расчета режимов резания и т.д. Число возможных комбинаций переходов, схем базирования, методов обработки и компо-

новок операций даже для простых деталей может быть значительно.

Разные варианты ТП изготовления одной и той же детали вследствие различий в структуре, применяемом оборудовании, инструменте, режимах резания и т.д. имеют различные выходные показатели: производительность, себестоимость, расход металла, загрузку оборудования и др. [1]

Наличие нескольких вариантов решения задачи (вариантов ТП) естественным путем приводит к задаче выбора наилучшего варианта. В нашем случае таковым будет вариант ТП, обеспечивающий выполнение в конкретных производственных условиях все требования чертежа детали и обуславливающий наилучшее значение выходных показателей. Такой ТП носит название оп-

тимального, а задача проектирования ТП по своей природе является оптимизационной.

Рассмотрим постановку задачи проектирования оптимального ТП. ТП называется оптимальным, если он обеспечивает:

выполнение системы ограничений, отражающих условия протекания ТП и требования, предъявляемые к нему и детали;

экстремум целевой функции.

ТП, оптимальный для одной целевой функции, может быть далеко не оптимальным для другой.

Например, максимум производительности операции может не соответствовать минимуму ее себестоимости. Поэтому при постановке задачи проектирования оптимального ТП весьма важным является выбор критерия оптимальности.

Известен и применяется ряд различных критериев оптимальности, используемых для оптимизации как ТП в целом, так и при решении отдельных частных технологических задач.

Наиболее часто используются следующие критерии оптимальности ТП:

штучное время $T_{шт}$ (целевая функция $T_{шт} \rightarrow \min$);

производительность Q (целевая функция $Q \rightarrow \max$);

себестоимость детали C (целевая функция $C \rightarrow \min$).

В целом же для постановки задачи оптимизации ТП необходимо сформировать математическую модель процесса обработки детали (сборки изделия), которая должна включать в себя:

критерий/критерии оптимальности ТП;

целевую функцию;

систему ограничений;

четко определенные входные, выходные и внутренние параметры;

управляемый (варьируемый) параметр или управляемые (варьируемые) параметры, которые выделяются из числа внутренних параметров.

После формирования математической модели необходимо определить метод решения задачи оптимизации.

Различают три вида оптимизации ТП:

структурную;

параметрическую;

структурно-параметрическую.

Структурная оптимизация – это определение оптимальной структуры ТП (вида заготовки, технологического маршрута, модели оборудования, типоразмера инструмента и т.д.). Параметрическая оптимизация ТП заключается в расчете оптимальных припусков и межпереходных размеров, режимов резания и т.д. Структурно-параметрическая оптимизация представляет собой комбинацию двух первых.

Принципиальное отличие структурной оптимизации от параметрической оптимизации состоит в сущности оптимизируемых параметров. При структурной оптимизации они по своей природе являются неупорядоченными переменными. В параметрической оптимизации параметры представляют собой переменные, для которых существует понятие больше или меньше и которые естественным образом могут быть размещены в координатной системе. В структурной же оптимизации эти параметры не являются по существу числовыми. Параметрами структурной оптимизации являются, например, модели станков, типы инструментов, схемы базирования, т.е. варианты типовых решений.

Структурная оптимизация рассматривает последовательно каждую задачу технологического проектирования. Таким образом, весь процесс проектирования расчленяется на несколько взаимосвязанных уровней. Процесс проектирования на каждом уровне представляет собой многовариантную процедуру [5].

В результате проектирования на всех уровнях образуется граф допустимых вариантов ТП, отвечающих заданным ограничениям (рис. 1).

Проблема интенсификации производства ставит задачу повсеместной оптимизации технических решений на всех уровнях производственного процесса обработки деталей. Важное значение имеет ра-

циональное решение этой задачи в условиях многономенклатурности и уникальности среднесерийного производства механических цехов машиностроительного предпри-

ятия в современных условиях конкурентной среды, требующей внедрения методов производственной системы.

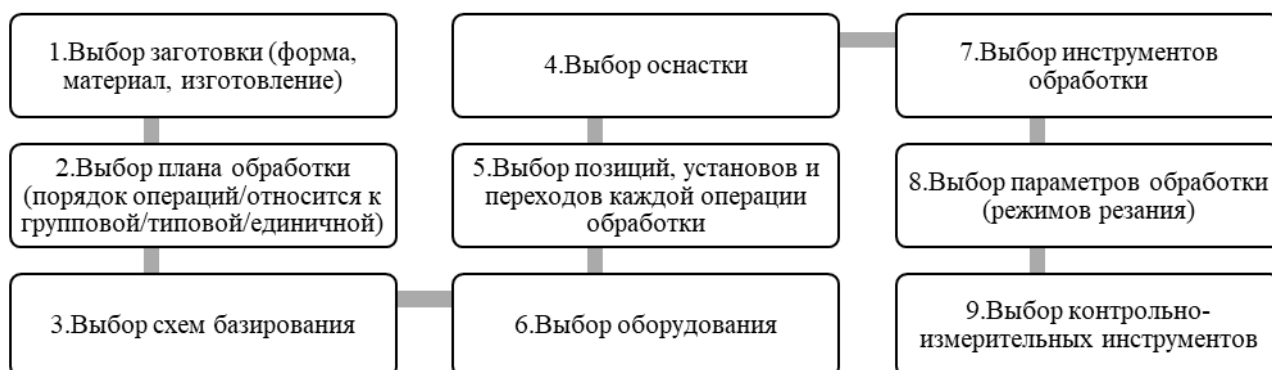


Рис. 1. Граф допустимых вариантов оптимизации ТП

В конкретных условиях производства любая технологическая операция обработки определяется взаимодействием конструктивных, технологических, экономических и эксплуатационных факторов. Возьмем для примера обработку деталей типа

«вал червячный» (рис. 2), являющихся составляющими зубчато-винтовой кинематической пары, привода на четверть оборота с червячной коробкой передач, предназначенной для ручного управления клапанами или заслонками на трубопроводах.

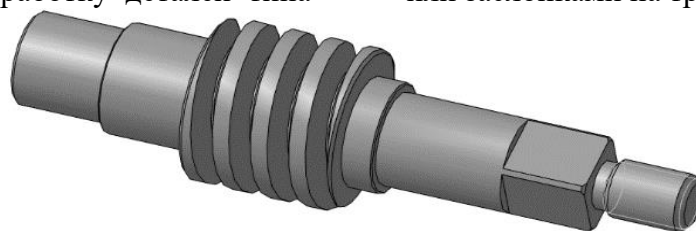


Рис. 2. Деталь типа «вал червячный»

Факторы, определяющие структуру ТП (конструкция червяка, точность и производительность его обработки, материальные затраты на операцию, металлоемкость и физико-механические свойства обрабатываемого вала) взаимообусловлены и связаны между собой сложными зависимостями [6]. В технологической операции вышеупомянутые факторы реализуются через исходные, переменные и выходные параметры, объединяемые соответственно в множества C , D и E . Формализованную модель токарно-фрезерной операции обработки детали типа «вал червячный» можно представить,

$$C_i = \{T_{\text{ВЫХ}(i-1)}, P_{\text{К}(i+1)}, Z_{i-1}, \tau, Rz_{i-1}, Z_{\text{РАСЧ.}i}, U_{\text{А}(i-1)}\} \quad (1)$$

как систему взаимодействия исходных и переменных технологических параметров с выходными параметрами операции (рис. 3).

К исходным данным следует отнести: конструкцию обрабатываемого червячного вала, его технические характеристики (расчетный модуль m , число витков z , ход витка p_z , делительный угол подъема линии витка $tg\gamma$, длина нарезанной части червяка, материал вала, его конфигурация, типоразмер) и объем выпуска.

Исходные параметры i -ой операции можно представить множеством C , и записать в виде:

где: $T_{ВЫХ(i-1)}$ – выходная точность предыдущей технологической операции;

$PK_{(i+1)}$ – тип производящего контура инструмента, определяемый последующей операцией;

Z_{i-1} – форма заготовки с предыдущей операции;

τ – такт выпуска валов червячных;

$Rz_{(i-1)}$ – высота микронеровностей боковых поверхностей червяков, полученных на предшествующей операции;

$Z_{РАСЧ.(i-1)}$ – величина расчетного припуска на выполняемой операции;

$U_{A(i-1)}$ – глубина дефектного слоя после выполнения предыдущей операции.

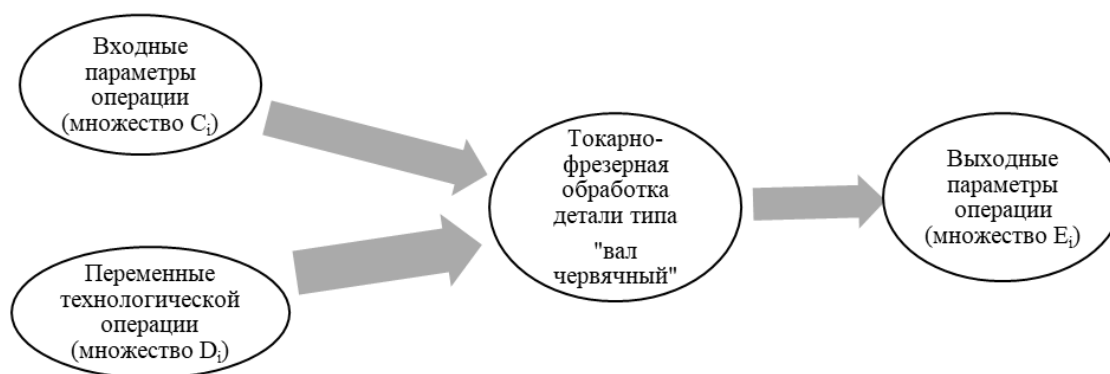


Рис. 3. Схема взаимодействия параметров технологической операции обработки вала червячного

Для определения исходных (входных) параметров каждой операции необходимо иметь совокупность правил и формул, устанавливающих зависимости между параметрами операции и исходными данными. Так, тип производящего исходного кон-

тура инструмента определяется с учетом делительного диаметра червяка, диаметра вершин и впадин, числа зубьев и длины нарезной части. Переменные технологические параметры i -й операции, могут быть представлены множеством D_i :

$$D_i = \{H_i, O_i, P_{ОБ.i}, K_{СТ.i}, C_{ИН.i}, J_{Х.У.З.i}\} \quad (2)$$

где: H_i – способ воздействия на металл (резание или пластическое деформирование), принятый на i -й операции;

O_i – параметры оснастки;

$P_{ОБ.i}$ – режимы обработки;

$K_{СТ.i}$ – качество станка;

$C_{ИН.i}$ – затраты на инструмент;

$J_{Х.У.З.i}$ – жесткость технологической системы.

Множество D характеризует всю совокупность допустимых значений технологических переменных параметров, определяющих возможные варианты протекания токарно-фрезерной операции обработки вала червячного. Если каждый элемент множества D обозначить через $\langle d \rangle$, то можно задать это множество при помощи обозначения:

$$D_i = \{d | d_{min} \leq d \leq d_{max} \} d \subseteq D_i \quad (3)$$

Эта запись говорит о том, что каждый элемент множества D_i представляет собой подмножество d , элементы которого есть совокупность значений переменного технологического параметра операции в пределах области его регулирования.

Эти значения технологических параметров операции образуют множество D_0 . Так как D_0 содержится в D , то множество D_0 является «строгим» или «истинным» подмножеством D . Множества D_0 и D являются конечными упорядоченными множествами,

так как они состоят из конечного числа элементов, расположенных в определенной последовательности.
Множество E можно записать в виде:

$$E_i = \{C_i, T_{ВЫХ.i}, Rz_i, T_{A.i}, K_{T.i}, Z_{РАСЧ.i}\} \quad (4)$$

где C_i – суммарные затраты на выполняемую операцию;
 $T_{ВЫХ.i}$ – выходная точность операции;
 Rz_i и $T_{A.i}$ – высота микронеровностей и глубина дефектного слоя на боковых поверхностях зубьев вала червячного;
 $K_{T.i}$ – коэффициент точности операции;
 $Z_{РАСЧ.i}$ – величина расчетного припуска под последующую операцию.

При решении задачи повышения эффективности i -й токарно-фрезерной операции обработки червячного вала отыскиваются такие значения переменных технологических параметров, которые обеспечивают получение минимальных затрат на операцию, наивысшей точности обработки при удовлетворении требований по производительности, заданному качеству червячных валов по точности и форме модификации червяка, обеспечивающей наибольшую их прочность.

Внутри множеств, характеризующих исходные, переменные и выходные параметры операции, как правило, имеет место функциональная связь между некоторыми

элементами. Эти элементы множеств являются «отмеченными» и связаны между собой определенными отношениями.

Помимо отношений между отдельными элементами внутри множеств C , D и E имеются отношения между элементами этих множеств. Отношения между элементами двух множеств (D и E или C и D) называются бинарными отношениями, устанавливающими соответствие элементов одного множества элементам другого множества. Бинарные отношения могут быть заданы, в одном случае, совокупностью упорядоченных пар, которые являются элементами множества $C \times D$. Они могут задаваться некоторыми свойствами, выражениями в словесной или символической форме.

Бинарные отношения между упорядоченными парами двух множеств можно также задавать с помощью ориентированных графов. Для рассмотренного случая пример такого графа G показан на рисунке 4. Вершины графа соответствуют элементам множеств, а дуги – отношениям между ними.

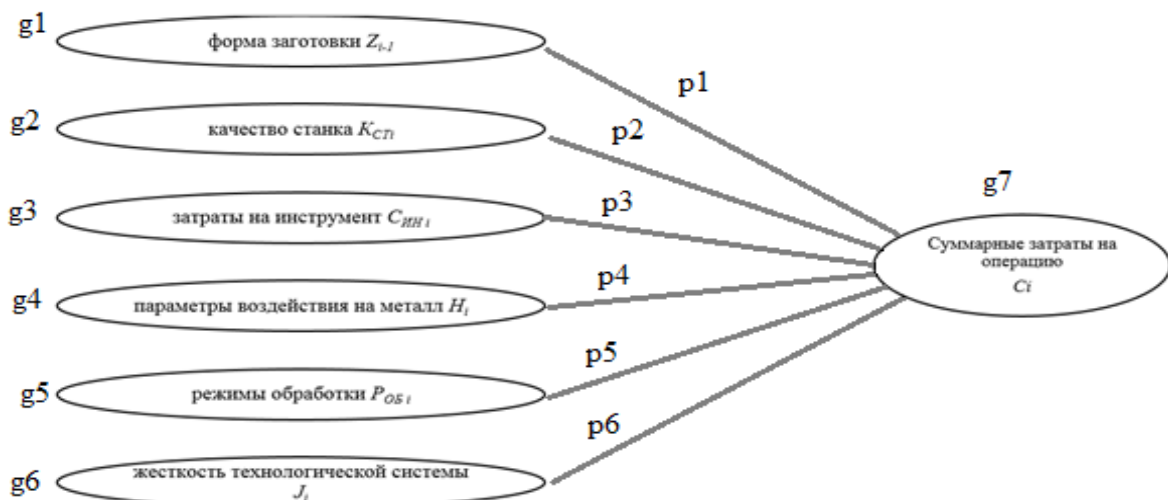


Рис. 4. Графическое отображение параметров связи элементов множеств
p1, p2, p3, p4, p5 и p6 – дуги графа; g1, g2, g3, g4, g5, g6 и g7 – вершины

Суммарные затраты на токарно-фрезерную операцию обработки червячного вала зависят от выбора оптимальной формы заготовки, качества оборудования и инструмента, времени наладки, режимов резания, жесткости технологической системы.

Как правило, бинарные связи между отдельными технологическими параметрами этапов ТП устанавливают с помощью аналитических зависимостей или на основании многофакторного эксперимента. Альтернативным методом установления бинарных связей, актуальным к применению в современных условиях неопределенности рынка, может служить разработанная авторами игровая модель.

Качественная определенность процесса обработки деталей типа «вал червяч-

$$T_{шт} = T_o + T_{всп} + T_{орм} + T_{отд} \quad (5)$$

где $T_{орм}$ – время на организацию рабочего места, затраченное на смазывание станка, удаление стружки, уборку рабочего места, установку и снятие режущего инструмента, мин.

$T_{отд}$ – время на отдых, мин.

$T_{всп}$ – вспомогательное время, затраченное на управление станком, установку, закрепление и снятие детали, подвод и отвод режущего инструмента, измерение детали, мин.

T_o – основное (машинное) технологическое время, мин, — время, затраченное на резание:

$$T_o = \frac{L}{S \cdot n} i, \quad (6)$$

где L – длина обработки, мм;

S – подача, мм/об;

n – частота вращения шпинделя, мин⁻¹;

i – число рабочих ходов (проходов).

$$L = l_0 + l_1 + l_2, \text{ мм,}$$

ный» обусловлена структурой технологического процесса, под которой понимается совокупность устойчивых отношений между его частями. Изменение качественного состава и количества переходов и установов в токарно-фрезерной операции при обработке одного и того же червячного вала вызывает изменение структуры технологического процесса.

Рассмотрим варианты, позволяющие производить оптимизацию на этапе определения количества переустановов токарно-фрезерной операции.

Штучное время выполнения технологической операции определено по формуле:

где: l_0 – длина обрабатываемой поверхности в направлении обработки, мм;

l_1 – длина врезания, мм;

l_2 – перебеги режущего инструмента, мм.

Время на закрепление детали в трехкулачковый самоцентрирующий патрон ($T_{всп}$) варьируется в зависимости от способа закрепления, выверки и массы детали [7].

Для определения максимального и минимального возможного времени закрепления заготовки в трехкулачковом патроне был проведен анализ каталогов и выбраны граничные значения (таблица 2). Для оптимизации затрат на закупку оснастки также был проведен анализ цен. Ограничения приведены в таблице 2. Понятно, что самые дорогие патроны – это патроны импортные, а самая низкая цена у российских производителей. Однако, чем дороже патрон, тем меньше времени тратиться на закрепление в нем заготовки.

Таблица 2

Исходные данные к постановке задачи оптимизации выбора оснастки

Патрон	Цена на патрон, руб.	Время на закрепление, мин
С гидравлическим зажимом	35000	0,25
С механическим зажимом	10700	1,90
ИТОГО	45700	2,15

Для определения оптимального выбора оснастки воспользуемся геометрической интерпретацией игровых моделей размера 2×2 .

$$\begin{pmatrix} 0,766 & 0,116 \\ 0,234 & 0,884 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0,116 \\ 0,234 \end{matrix} \quad V_H = \alpha = 0,284$$

$$\begin{matrix} 0,766 & 0,884 \\ V_B = \beta = 0,766 \end{matrix}$$

V_H – нижняя цена игры;

V_B – верхняя цена игры.

По результатам видим, что $\alpha \neq \beta$ и «седловой точки» нет.

Найдем оптимальные смешанные стратегии.

Пусть для «игрока» S стратегия задается вектором $P(p_1, p_2)$.

$$\begin{cases} 0,766 \cdot p_1 + 0,116 \cdot p_2 = V & (\text{при } L_1) \\ 0,234 \cdot p_1 + 0,884 \cdot p_2 = V & (\text{при } L_2) \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases}$$

Решением системы будут значения вероятностей $p_1 = 0,64$ и $p_2 = 0,36$.

Для геометрической интерпретации игры построим график (рис. 5): в системе координат XOY . Каждой точке на отрезке $[0; 1]$ соответствует смешанная стратегия игрока L . Среди них оптимальной будет та, которая определяется самой низкой точкой

Формализуем исходные данные, применив метод нормализации несоизмеримых параметров (цены и времени), построив матрицу игры A и проверим наличие «седловой точки»:

Цена игры равна V .

Тогда, при применении «игроком» L чистой стратегии L_1 или L_2 «игрок» S получит средний выигрыш, равный цене игры, т.е.

ломанной $СМВ$, т.е. точкой M – точкой пересечения прямой AB , построенной по точкам с координатами $A(0; 0,234)$ и $B(1; 0,766)$ и прямой CD , построенной по точкам с координатами $C(0; 0,884)$ и $D(1; 0,116)$. Оптимальной стратегии игрока L соответствуют координаты точки $M(0,64; 0,36)$.

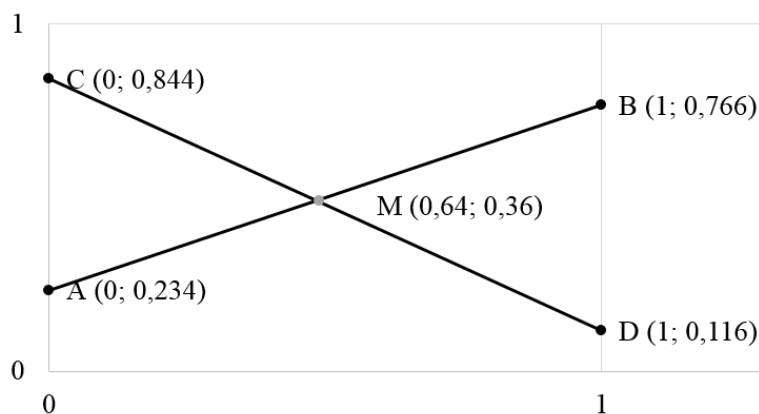


Рис. 5 Геометрическая интерпретация игровой модели 2×2

Таким образом, оптимизируя по критерию цены и критерию времени на зажим трехручачкового самоцентрирующего па-

трона с точки зрения выбора решения игры (точки M) следует выбрать патрон по цене 29 тысяч рублей ($0,64 \times 45700$ рублей), время

закрепления установки которого составляет 1,14 минут (0,36×2,15 минут)

Данная игровая модель может быть применена для обоснования выбора любой оснастки, используемой при обработке детали типа «вал червячный» при реализации оптимизированного технологического процесса. Разработанная модель является универсальной и может применяться для принятия решения по обоснованию выбора инструментов, оснастки, приспособлений, станков на основе любых, интересующих нас факторов.

Применение математического моделирования и методов оптимизации, используемых в совокупности на разных этапах проектирования ТП, обеспечивает адекватную информационную поддержку при выборе из множества вариантов наиболее оптимальных структурных элементов ТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамян, В. (2019). Повышение технологичности выпускаемой продукции как ключевое направление снижения уровня затрат и роста эффективности машиностроительного производства // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. № 54(2). С. 8-14.

2. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения / Б.М. Базров. - М: Машиностроение. 2007. - 736 с.

3. Справочник конструктора-машиностроителя [Электронный ресурс]: [официальный сайт] – Режим доступа: <http://cncnc.ru/documentation/spravconstr/html/tom2/page/chapters8/ckm1.html>, свободный (дата обращения: 03.10.2019).

4. Павлова А.Н., Кузнецова О.В. Проектирование группового технологического процесса механической обработки деталей на основе применения инструментов математического моделирования // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2020. №61(1). С. 98-108.

5. Рыжков В.А., Паринов М.В., Юров А.Н., Чижов М.И. Формализация задачи проектирования с целью оптимизации сборочных технологических процессов. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12-2. С. 25-27

6. Рыжков, В.А. Формализация задач проектирования с целью автоматизации и оптимизации сборочных технологических процессов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации / сборник научных трудов XII-ой Международной научно-практической конференции: в 4-х томах. Ответственный редактор: Горохов А.А. 2015 – 419 с.

7. Томилин С.А., Симакова Н.А., Сысоев Ю.С. Модели, алгоритмы и программы для анализа формы и базирования заготовок призматических изделий // Материалы и технологии XXI века: Сб. ст. III международного науч.-техн. конф. - Пенза: ПДЗ. 2005.-С. 163 - 167.

REFERENCES

1. Abrahamyan, V. (2019). Improving the manufacturability of manufactured products as a key area for reducing the level of costs and increasing the efficiency of machine-building production // Modern science-intensive technologies. Regional application. 2018. No. 54 (2). pp. 8-14.

2. Bazrov, B.M. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya / B.M. Bazrov. - M: Mashinostroenie, 2007. - 736 s.

3. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya [Elektronnyj resurs]: [ofic. sajt] – Rezhim dostupa: <http://cncnc.ru/documentation/spravconstr/html/tom2/page/chapters8/ckm1.html>, svobodnyj (data obrashcheniya: 03.10.2019). – Zagl. s ekrana.

4. Pavlova A.N., Kuznetsova O.V. Designing a group technological process of machining parts based on the use of mathematical modeling tools // Modern high technology. Regional application. 2020. No. 61 (1). S. 98-108.

5. Ryzhkov V.A., Parinov M.V., YUrov A.N., CHizhov M.I. Formalizaciya zadachi proektirovaniya s cel'yu optimizacii sborocznyh tekhnologicheskikh processov. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. T. 8. № 12-2. S. 25-27

6. Ryzhkov, V.A. Formalizaciya zadach proektirovaniya s cel'yu avtomatizacii i optimizacii sborocznyh tekhnologicheskikh processov Modern instrumental systems, information technology and innovation / sbornik nauchnyh trudov XII-oy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii: v 4-h tomah. Otvetstvennyj redaktor: Gorohov A.A. 2015 – 419 s.

7. Tomilin S.A., Simakova N.A., Sysoev YU.S. Modeli, algoritmy i programmy dlya analiza formy i bazirovaniya zagotovok prizmaticheskikh izdelij // Materialy i tekhnologii XXI veka: Sb. st. III mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. - Penza: PDZ, 2005.-S. 163-167.