

# ПРОГРЕССИВНОЕ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ

## PROGRESSIVE WOODWORKING EQUIPMENT AND TOOLS

УДК 621.914:674:004

**В. В. Раповец<sup>1</sup>, В. Г. Новоселов<sup>2</sup>, А. А. Гришкевич<sup>1</sup>,  
С. В. Медведев<sup>3</sup>, Б. М. Розин<sup>3</sup>**  
**(V. V. Rapovets<sup>1</sup>, V. G. Novoselov<sup>2</sup>, A. A. Grishkevich<sup>1</sup>  
S. V. Medvedev<sup>3</sup>, B. M. Rozin<sup>3</sup>)**

*(<sup>1</sup>БГТУ, г. Минск, РБ) dosy@bstu.unibel.by*  
*(<sup>2</sup>УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) stanki-in@yandex.ru*  
*(<sup>3</sup>ОИПИ, г. Минск, РБ) medv@newman.bas-net.by*

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОБАСТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

### MATHEMATICAL MODEL OF ROBUST OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF HIGH-SPEED BLADE PROCESSING OF WOOD MATERIALS ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA

*Данная статья посвящена возможности учета неопределенностей в моделях оптимизации. В реальных задачах оптимизации данные обычно неточны, в результате точно неизвестно, когда решение найдено. При традиционном подходе доли процентов неопределенности данных просто игнорируются, и проблема решается так, как если бы номинальные данные были идентичны фактическим данным. Однако эксперименты показывают, что уже довольно небольшие возмущения неопределенных данных могут привести к тому, что номинальное (т.е. соответствующее номинальным данным) оптимальное решение в значительной степени неосуществимо и, следовательно, практически бессмысленно. Например, в 13 из 90 задач линейного программирования из библиотеки NETLIB 0,01 % случайных возмущений неопределенных данных приводят к более чем 50 % нарушениям правых частей некоторых ограничений, оцениваемых при номинальных оптимальных решениях. Таким образом, в приложениях существует реальная потребность в методологии, которая дает робастные (т.е. надежные) решения, обладающие защитой против неопределенности исходных данных.*

*This article is devoted to the possibility of accounting for uncertainties in optimization models. Since data is usually inaccurate in real-world optimization problems, as a result, it is not known exactly when the solution was found. In the traditional approach, fractions of a percentage of data uncertainty are simply ignored and the problem is solved as if the nominal data were identical to the actual data. However, experiments show that even rather small perturbations of uncertain data can lead to the fact that the nominal (i.e., corresponding to nominal data) optimal solution is largely unrealizable and, therefore, practically meaningless. For example, in 13 out of 90 linear programming problems from the NETLIB library, 0.01 % of random perturbations of undefined data lead to more than 50 % violations of the right-hand sides of some constraints estimated for nominal optimal solutions. Thus, in applications, there is a real need for a methodology that provides robust (i.e. reliable) solutions that are defense against uncertainty in the underlying data.*

Традиционная методология этого типа предлагается стохастическим программированием, при котором возмущениям данных в заданной области назначается распределение вероятностей и исходные ограничения заменяются их «случайными версиями», налагающими на возможное решение требование удовлетворять ограничениям с вероятностью  $\geq 1-\varepsilon$ , где  $\varepsilon \ll 1$  является заданным допуском [1]. Однако во многих случаях, даже если известна область возможных значений, нет естественного способа присвоить возмущениям данных распределение вероятностей; кроме того, вероятностное стохастическое программирование обычно трудноразрешимо с вычислительной точки зрения.

Робастную оптимизацию можно рассматривать как дополнение к подходу стохастического программирования к решению проблем оптимизации с неопределенными данными. Как правило, в робастных моделях предполагается, что неопределенность исходных данных описывается известной ограниченной областью значений. При этом на возможное решение налагается требование быть *робастно допустимым*, т.е. удовлетворять ограничениям независимо от реализации данных из этой области. Предполагается, что целевая функция определена точно (т.е. на нее не влияют возмущения данных, фактически это предположение не ограничивает общности постановки задачи), затем ищется робастное оптимальное решение – робастное допустимое решение с наименьшим значением целевой функции. При таком подходе с исходной неопределенной задачей ассоциируется ее робастный аналог – задача построения робастного оптимального решения. Впервые подход робастной оптимизации был сформулирован в работе Сойстера [2] и в дальнейшем развит в работах Бен-Тала и А. Немировского [1, 3–6] и других авторов.

Однако для ряда практических задач, в частности оптимизации процессов обработки новых древесных материалов новыми типами режущих инструментов, отсутствует наработанная экспериментальная база, позволяющая достоверно оценить не только номинальные значения, но и границы диапазонов возможных значений исследуемых характеристик технологического процесса для различных значений его параметров. В результате возникает проблема повышения надежности (робастности) принимаемых проектных решений при использовании имеющихся неточных экспериментальных данных о зависимости характеристик процесса (усилия, мощности резания, степени износа инструмента) от параметров режимов (скорости резания, толщины снимаемой стружки) и времени обработки с учетом ограничений на значения этих характеристик, вытекающих из требований к качеству обработки.

Предлагаемый для таких ситуаций робастный подход основан на предположениях: а) экспериментальные значения характеристик процесса определяются с погрешностями, б) границы области неопределенности характеристик не определены. Подход заключается в учете типа ограничения ( $\leq$  либо  $\geq$ ) на характеристику и, исходя из этого типа, соотнесения экспериментальному значению сравнительной степени риска нарушения ограничения в зависимости от его величины (для ограничения  $\leq$  более вероятным является большее значение характеристики). Последнее основано на свойстве, что риск превышения значения характеристики (для близких по аргументам экспериментальных точек) уменьшается с ростом ее значения. Практически для ограничений типа  $\leq$  экспериментальные значения характеристики в левой части неравенства, которые не принадлежат вогнутой оболочке экспериментальных характеристик (для 2-мерного случая – вогнутой поверхности), отбрасываются либо корректируются в сторону увеличения так, чтобы они ей принадлежали.

Построение такой выпуклой оболочки для описания зависимости характеристики от параметров режимов позволяет интерполировать вероятные максимальные

значения исследуемой характеристики для промежуточных (экспериментально не исследованных) значений параметров режимов. Аналогично для ограничения типа  $\geq$  строится выпуклая оболочка (вогнутая вниз гиперповерхность).

Для сформулированной ранее (см. отчет за 2018 г.) модели оптимизации технологических процессов деревообработки резанием предложена ее робастная модификация, в которой одна из основных характеристик (мощность резания) рассматривается как неточно определяемая по результатам экспериментов вследствие воздействия на нее неопределенных факторов. Причем в связи с большим разнообразием свойств обрабатываемых материалов и недостаточным количеством проведенных экспериментов отсутствуют характеристики области неопределенности исследуемой характеристики для используемых значений параметров технологического процесса.

Целью такого моделирования является повышение устойчивости оптимальных (по выбранным критериям) параметров технологического процесса по отношению к неопределенности исследуемой характеристики. Рассмотрен подход к модификации экспериментальных данных исследуемой характеристики, основанный на построении ее вогнутой оболочки по результатам экспериментов с учетом типа ограничений на ее значения в задаче оптимизации. Разработан алгоритм построения указанной вогнутой оболочки по результатам экспериментов, который программно реализован для случая зависимости функции мощности от двух переменных параметров режимов (толщины снимаемой стружки и скорости резания). Проведены тестовые расчеты на базе 135 натуральных экспериментов для различных сочетаний параметров припуска при фрезеровании и угла между обрабатываемой поверхностью и задней кромкой фрезы, когда управляемые параметры процесса изменяются в заданных диапазонах.

Рассматривается задача определения наилучших режимов высокоскоростной одноинструментальной обработки деталей из древесных материалов в условиях серийного производства на примере фрезерования. Критериями качества рекомендуемых режимов является принимаемый набор основных (зависящих от искомых режимов обработки) технико-экономических показателей технологического процесса. Этот набор может включать, в частности, такие показатели, как производительность, себестоимость, энергоемкость и др. Искомые режимы обработки должны удовлетворять ряду ограничений, учитывающих, в частности, следующие организационно-технические, технологические и экономические факторы:

- заданные диапазоны возможных режимов обработки;
- требуемое качество обрабатываемой поверхности;
- предельно допустимые для используемого оборудования усилия резания, угловые скорости, крутящий момент и мощность на шпинделе;
- заданный набор предпочтительных интервалов календарного времени работы оборудования между сменами инструмента.

При принятых предположениях и допущениях сформулированная выше задача определения наилучших режимов одноинструментальной обработки деталей из древесных материалов в условиях серийного производства при фиксированных  $h, \alpha$  сводится к следующей задаче многокритериальной оптимизации:

$$\{\Phi(a, V), \tilde{C}_o(a, V), \tilde{E}(a, V)\} \rightarrow \text{opt}, \quad (1)$$

$$\underline{a} \leq a \leq \bar{a}, \quad (2)$$

$$\underline{V} \leq V \leq \bar{V}, \quad (3)$$

$$\underline{n} \leq n \leq \bar{n}, \quad (4)$$

$$F(a, V, t) \leq \bar{F}, \quad t \in [0, t(a, V, \tau_0)], \quad (5)$$

$$M(a, V, t) \leq \bar{M}, \quad t \in [0, t(a, V, \tau_0)], \quad (6)$$

$$k_1 P(a, V, t) \leq \bar{P}, \quad t \in [0, t(a, V, \tau_0)], \quad (7)$$

$$\rho(a, V, t(a, V, \tau_0)) \leq \bar{\rho}(a, V), \quad \tau_0 \in U, \quad (8)$$

где 
$$t(a, V, \tau_0) = \frac{l_p(\tau_0 K - \tau_{cm})}{l_x + S(a, V)\tau_g}.$$

В качестве основной характеристики, подверженной воздействию неопределенных факторов, рассмотрена потребляемая при обработке мощность  $P = P(a, V, \rho)$ . При этом предполагается, что для исследуемого процесса фрезерования древесного материала не проводилось предварительных экспериментальных исследований для оценки номинальных значений мощности и возможных отклонений от этих значений для входных параметров процесса. На основании исследований аналогичных процессов предполагается, что номинальная мощность при непрерывном изменении входных параметров процесса изменяется непрерывно и обладает свойствами гладкости.

Таким образом, сформулирована задача многокритериальной оптимизации параметров процесса высокоскоростной деревообработки для частного случая одноинструментального фрезерования деталей при крупносерийном их выпуске. Для аппроксимации характеристик процесса на базе неточных экспериментальных данных набором степенных функций предполагается построение вогнутых (выпуклых) оболочек экспериментальных точек на множестве варьирования параметров процесса. Ограничения многокритериальной задачи (1)–(8) для оптимизации режимов деревообработки вычисляются на базе модифицированных экспериментальных данных. Для аппроксимации физических характеристик процесса резания и износа инструмента используются наборы степенных функций. С учетом свойств характеристик их аппроксимация строится по методу наименьших квадратов.

Для решения сформулированной задачи с учетом невыпуклости в общем случае области допустимых значений параметров режимов используется эвристический метод роя частиц, хорошо зарекомендовавший себя при решении ряда задач, аналогичных исследуемой в работе.

Приведем алгоритм построения вогнутой оболочки многогранным множеством на двумерной сетке экспериментальной характеристики  $F(x, y)$ , входящей в ограничение в модели задачи

$$F(x, y) \leq \bar{F}.$$

Предполагается, что формируемая аппроксимация является непрерывной и вогнутой функцией по каждой из своих переменных  $x, y$  функцией. При этом никаких предположений на характер исходной экспериментальной зависимости не накладывается.

Приведенный ниже алгоритм строит по экспериментальным значениям  $F(x_i, y_k)$  функции  $F(\cdot, \cdot)$  функцию  $\tilde{F}(x_i, y_k)$  для всех  $i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m$  такую, что она является вогнутой по  $x_i$  при любом фиксированном  $y_k, k=1, \dots, m$  и вогнутой по  $y_k$  при любом фиксированном  $x_i, i = 1, \dots, n$ .

Алгоритм заключается в итеративной по координатной корректировке значений аппроксимируемой функции.

Сравнительный анализ результатов решения  
исходной оптимизационной задачи и робастного решения

*Для исходной постановки задачи*

Найденные оптимальные параметры:

Время между сменами инструмента = 480 (мин).

Угол между задней кромкой резца и поверхностью обработки = 20°.

Толщина срезаемого слоя = 1 мм.

Толщина стружки = 0,299 мм.

Скорость резания = 25,228 м/с.

Энергопотребление = 0,6128 кВт·ч/см.

*Для робастной постановки задачи.*

Найденные оптимальные параметры:

Время между сменами инструмента = 480 (мин).

Угол между задней кромкой резца и поверхностью обработки = 20°.

Толщина срезаемого слоя = 1 мм.

Толщина стружки = 0,299 мм.

Скорость резания = 25,228 м/с.

Энергопотребление = 0,6239 кВт·ч/см.

**Вывод:** для того же режима фрезерования энергопотребление возросло на 1,8 %.

Для разработанной ранее модели многокритериальной оптимизации параметров режимов технологических процессов деревообработки [7] предложен метод повышения надежности решения, основанный на построении вогнутой (либо выпуклой) оболочки экспериментально получаемых характеристик процесса.

Проведены тестовые расчеты на основе полученных экспериментальных данных по проведенным 135 натурным экспериментам процесса фрезерования заготовок.

Полученные результаты показали, что наилучшими режимами как для исходных, так и для модифицированных характеристик, обеспечивающими минимальную удельную себестоимость обработки в заданных диапазонах управляемых параметров (толщины стружки и скорости резания), являются режимы, обеспечивающие максимальную производительность (с наибольшей минутной подачей). Энергоемкость при этом незначительно возрастает.

Решения робастной и исходной постановок задач по единственному критерию максимальной производительности либо минимальной себестоимости совпадают. Решение же однокритериальной задачи по критерию энергопотребления для робастной постановки оказалось хуже по целевой функции на 1,8 %.

### Библиографический список

1. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust Convex Optimization // Math. of Oper. Res. 23:4 (1998), 769–805.
2. Soyster A. L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming // Oper. Res. (1973), 1154–1157.
3. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust solutions of uncertain linear programs // OR Letters 25 (1999), 1–13.
4. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data // Math. Progr. 88 (2000), 411–424.
5. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust Optimization – methodology and applications // Math. Progr. Series B 92 (2002), 453–480.
6. Ben-Tal A., Nemirovski A. On tractable approximations of uncertain linear matrix inequalities affected by interval uncertainty // SIAM J. on Optimization 12 (2002), 811–833.

7. Раповец В. В. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2017. – № 2 (198). – С. 360–364.

УДК 674.914:674.338

С. А. Гриневич<sup>1</sup>, В. Г. Новоселов<sup>2</sup>, А. А. Гришкевич<sup>1</sup>  
(S. A. Grinevich<sup>1</sup>, V. G. Novoselov<sup>2</sup>, A. A. Grishkevich<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>(БГТУ, г. Минск, РБ) dosy@belstu.by

<sup>2</sup>(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) stanki-in@yandex.ru

### ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ЗАВЕС ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ УПОРОВ В КРУГЛОПИЛЬНЫХ СТАНКАХ

### WAYS TO INCREASE THE RIGIDITY OF CURTAINS OF SAFETY STOPS IN CIRCULAR SAWING MACHINES

*Наиболее травмоопасным деревообрабатывающим оборудованием являются круглопильные станки для продольной распиловки. Для предотвращения обратного выброса заготовки в данных станках применяются когтевые завесы.*

*В работе приведены и проанализированы требования, предъявляемые к осям когтевых завес. На основании полученных данных определена жесткость конструкции, предложены варианты ее увеличения.*

*The most traumatic woodworking equipment is circular sawing machines for longitudinal sawing. To prevent the reverse ejection of the workpiece claw curtains are used in these machines.*

*The paper presents and analyzes the requirements for axes of claw curtains. On the basis of the obtained data the rigidity of the structure is determined, options for it increasing are proposed.*

Деревообрабатывающее оборудование имеет повышенную травмоопасность, поэтому при его эксплуатации обеспечение безопасности оператора является одной из важнейших задач. Решение данной задачи обеспечивается путем разработки и соблюдения специальных мер безопасности, обучением персонала безопасным приемам работы и проектированием специальных устройств, исключающих или снижающих вероятность возникновения опасных производственных факторов. Наиболее часто встречающимися причинами несчастных случаев на деревообрабатывающем оборудовании являются соприкосновение оператора с подвижными частями оборудования, в том числе и с режущим инструментом, а также обратный выброс режущим инструментом заготовки или ее фрагмента.

К наиболее травмоопасному оборудованию относятся круглопильные станки для продольной распиловки древесины. Данный тип оборудования характеризуется высокими скоростями резания и встречной подачей, что предопределяет высокую вероятность обратного выброса заготовки. Для защиты оператора и предотвращения вылета заготовки или его фрагментов из станка конструкцией оборудования предусматривается применение завес из подвижных предохранительных упоров (когтевых завес).

Основные требования к конструкции когтевых завес приведены в ГОСТ 12.2.026.0-2015 «Станки деревообрабатывающие. Требования безопасности к конструкции» [1].