

УДК 65.011.56: 621.01

DOI 10.18698/0536-1044-2017-12-51-65

Автоматизация поддержки принятия решений при многокритериальном проектировании пильного блока лесопильного станка

С.С. Гаврюшин¹, К.Д. Нгуэн², Х.М. Данг³, В.Б. Фунг¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона, Ханой, Вьетнам, ул. Хоанг Куок Вьет, 236

³ Хошиминский индустриальный университет, Хошимин, Вьетнам, район Го Вап, ул. Нгуен Ван Бао, 12

Automation of Decision-Making When Designing the Saw Unit of a Multirip Bench Using the Multiple-Criteria Approach

S.S. Gavryushin¹, C.D. Nguyen², H.M. Dang³, V.B. Phung¹

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Vietnam State Technical University, Hanoi, Vietnam, Hoang Quoc Viet St., Bldg. 236

³ Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh, Vietnam, District Go Vap, Nguyen Van Bao St., Bldg. 12



e-mail: gss@bmstu.ru, dinhnc@mta.edu.vn, danghoangminh@iuh.edu.vn, phungvanbinh.vp@gmail.com



Рассмотрено многокритериальное проектирование пильного блока лесопильного станка в рамках концепции управления жизненным циклом изделия. На основе требований к станку для различных этапов его жизненного цикла создана математическая модель пильного блока, включающая восемь управляющих параметров, девять функциональных ограничений и девять критериев качества. Для поддержки лиц, принимающих решение, разработан метод визуально-интерактивного анализа, базирующийся на идее классических методов принятия решений. Новый метод позволяет определять и контролировать область допустимых значений критериев качества, оценивать их взаимовлияние и указывать лицам, принимающим решение, рациональные критериальные ограничения, при которых существуют согласованные варианты проектирования. С помощью предложенного метода найдены рациональные согласованные варианты проектирования пильного блока, которые удовлетворяют требованиям различных специалистов, связанных с лесопильным станком, и даны рекомендации по его совершенствованию. Результаты расчета конструкции пильного блока в программном комплексе NX Nastran подтвердили преимущества рациональных схем пильного блока, разработанных с помощью метода визуально-интерактивного анализа.

Ключевые слова: управление ЖЦИ, принятие решений, многокритериальное проектирование, метод визуально-интерактивного анализа, пильный блок, лесопильный станок



This article examines the multiple-criteria design of the saw unit of a multirip bench in the framework of the product lifecycle management (PLM) concept. Based on the requirements to the machine for various stages of its life cycle, a mathematical model of the saw unit is created that includes eight control parameters, nine functional constraints and nine quality criteria. To support decision-makers, a visual interactive analysis method (VIAM) is

developed that is based on the ideas of classical decision-making methods. Using VIAM, it is possible to define and control the zone of acceptable values of the quality criteria, evaluate their mutual influence and indicate the rational criteria constraints, under which there are agreed design options. With the help of the proposed method, rational agreed design solutions for the saw unit are found that meet the requirements of various multirip bench specialists. Recommendations for further improvement of the multirip bench are given. The results of calculations in NX Nastran confirm the advantages of the rational schemes of the saw unit developed with the help of VIAM.

Keywords: product lifecycle management (PLM), decision-making, multi-criteria design, visual interactive analysis method, saw unit, multirip bench

Одним из эффективных направлений повышения конкурентоспособности изделия в современном машиностроении является использование концепции управления его жизненным циклом (ЖЦИ). В рамках концепции ЖЦИ все этапы рассматриваются взаимосвязано, в едином информационном пространстве [1, 2]. Специалисты могут не только критически проанализировать свои требования, но и оценить их влияние на требования, предъявляемые на других этапах ЖЦИ.

С применением концепции управления ЖЦИ процессы проектирования и производства ряда стандартных изделий стали более эффективными. Однако при проектировании наукоемких изделий наблюдается ряд проблем, к основным из которых относятся наличие несогласованности между отдельными этапами ЖЦИ и отсутствие комплексного описания модели изделия в едином информационном пространстве, а также исследований, учитывающих специфику конкретного изделия.

Примером наукоемкого изделия может служить пильный блок (ПБ) лесопильного станка

нового типа (рис. 1) с круговым поступательным движением пильных полотен (ПП) [3, 4]. При проектировании ПБ его конструкция должна удовлетворять целому ряду технических требований (рис. 2), что может привести к проблеме их несогласованности при многокритериальном проектировании ПБ.

Помимо стандартных требований (таких как прочность, долговечность и жесткость), существуют и специфические, характерные для данного ПБ: устойчивость ПП, необходимость отстройки резонансных режимов для ПП, уравновешенность конструкции и т. д. [5–8]. Кроме того, при рассмотрении этого изделия в процессе жизненного цикла возникает проблема несогласованности (см. рис. 2), а иногда и противоречивости требований отдельных этапов [7]. Например, снижение массы станка может привести к ухудшению жесткости и устойчивости ПП, повышение его производительности (путем увеличения частоты вращения пильных модулей) — к сокращению периода устойчивой работоспособности ПП, а утолщение ПП (для улучшения жесткостных и прочностных характеристик) его к повышенным потерям древесины на опилки и возрастанию массы (см. рис. 2).

Очевидно, что проектирование ПБ станка является многокритериальной задачей. Расширение проблемы с ростом количества рассмотренных этапов и участвующих специалистов делает постановку задачи, с одной стороны, более точной, а с другой — более трудоемкой. Задача усложняется при увеличении количества параметров математической модели, наложенных ограничений и критериев качества.

Цель работы — создание методики автоматизированного управления процессом принятия решений при проектировании наукоемких изделий путем обеспечения совместимости и интеграции совокупных требований к конструкции на примере ПБ лесопильного станка.

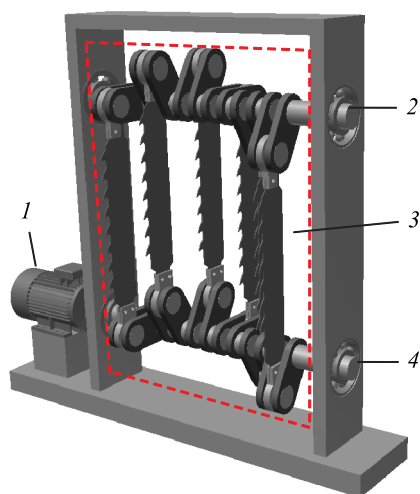


Рис. 1. Схема ПБ лесопильного станка нового типа:
1 — двигатель; 2 и 4 — верхний и нижний вал;
3 — пильный блок

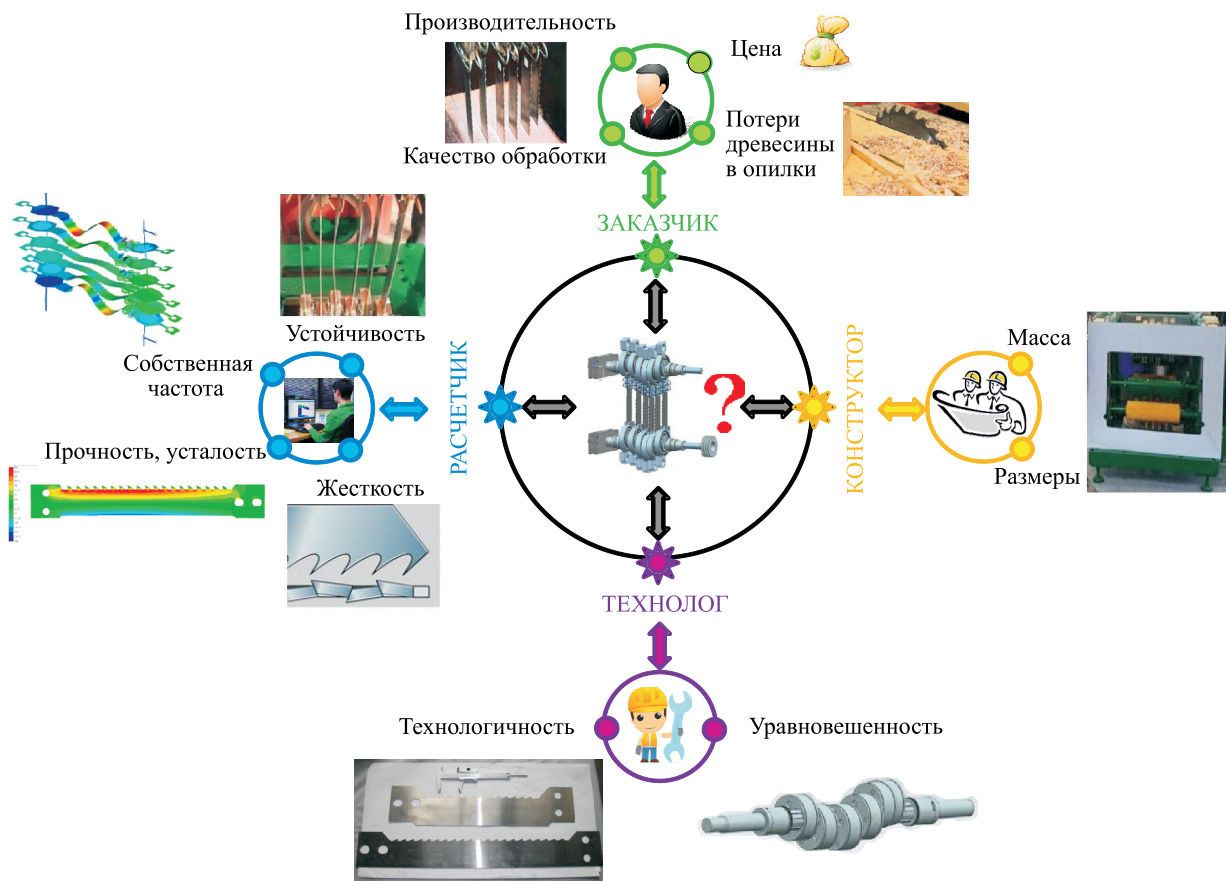


Рис. 2. Схема, поясняющая проблему несогласованности требований при многокритериальном проектировании ПБ

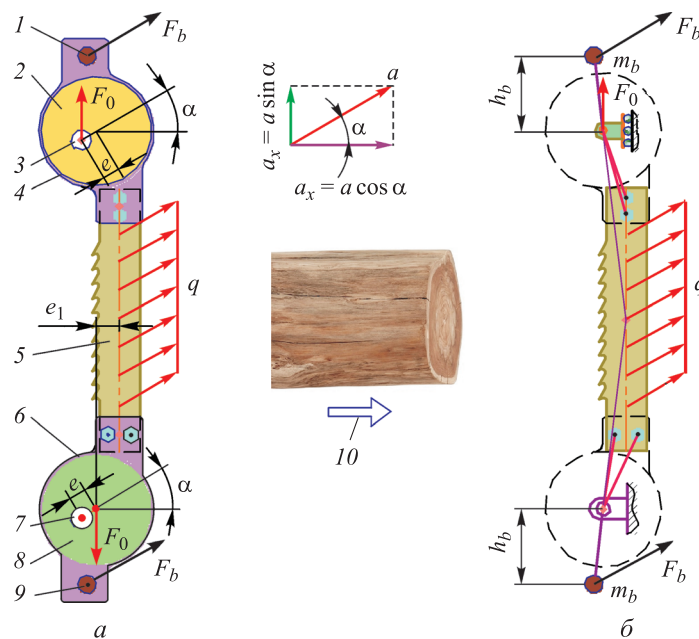


Рис. 3. Схема (а) и расчетная модель (б) пильного модуля:
 1 и 9 — верхний и нижний противовес; 2 и 8 — верхний и нижний эксцентрик;
 3 и 7 — верхний и нижний вал; 4 и 6 — верхняя и нижняя корпусная деталь; 5 — ПП;
 10 — направление движения бревна; a — центростремительное ускорение; F_b — инерционная сила противовеса;
 F_0 — сила натяжения; q — распределенная нагрузка ПП; m_b — масса противовеса

Математическая модель пильного модуля. ПБ состоит из шести одинаковых пильных модулей. Схема и расчетная модель пильного модуля приведены на рис. 3, а принцип его работы подробно описан в работах [5–7].

На основе требований специалистов, предъявляемых к многопильному станку (рис. 4), разработана комплексная математическая модель ПБ [7]. Модель позволяет в достаточной мере описать функциональные характеристики станка и содержит восемь управляющих параметров, девять функциональных ограничений и девять критериев качества (табл. 1–3). Модель

включает в себя формулы и алгоритмы, позволяющие по заданному вектору управляющих параметров автоматически провести вычисление всех критериев качества станка с учетом функциональных ограничений (см. рис. 4).

Необходимо определить значения управляющих параметров так, чтобы получить рациональные согласованные значения критериев качества ПБ, которые удовлетворяют требованиям лиц, принимающих решение (ЛПР). В данном случае ЛПР — коллектив специалистов, непосредственно участвующих в процессе проектирования и выбора решений для ПБ станка.

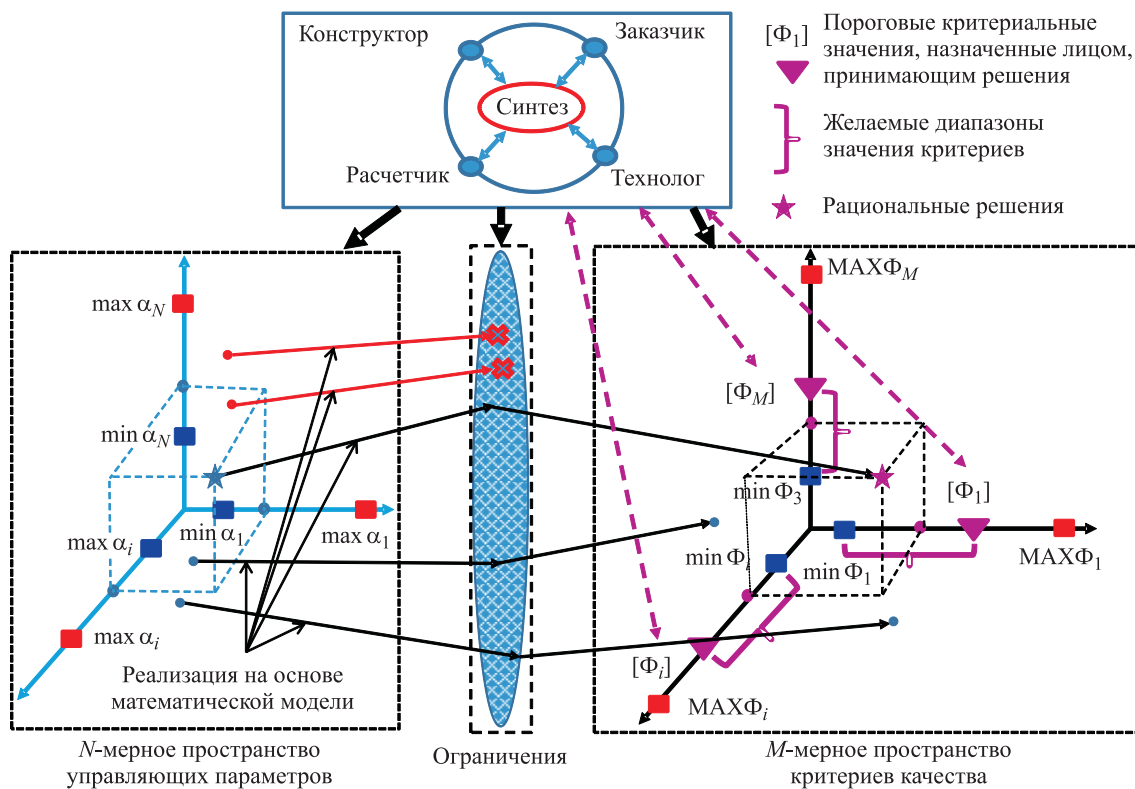


Рис. 4. Модель многокритериального проектирования ПБ

Таблица 1

Управляющие параметры

Обозначение		Название	Размерность	Значение	
в модели	условное			минимальное	максимальное
α_1	e	Эксцентриситет кругового движения	м	0,03	0,035
α_2	b	Ширина ПП	м	0,06	0,1
α_3	t	Толщина ПП	мм	1	2
α_4	e_1	Эксцентриситет натяжения	м	0	0,08
α_5	h_b	Расстояние	м	0,1	0,2
α_6	m_b	Масса противовеса	кг	0	1
α_7	F_0	Сила натяжения	Н	500	2 000
α_8	n	Частота вращения валов	об./мин	2 000	3 000

Таблица 2

Функциональные ограничения

Обозначение	Ограничение	Условие
f_1	≤ 0	Для отстройки резонансных режимов ПП
f_2	≥ 0	Устойчивости плоской формы ПП под действием инерционных сил при рабочей частоте вращения
f_3	≤ 0	Балансировки пильного модуля
f_4	≥ 0	По силе натяжения ПП
f_5	≥ 0	Прочности ПП
f_6	≥ 0	Долговечности ПП
f_7	≥ 0	Жесткости ПП
f_8	≥ 0	Устойчивости плоской формы ПП при пилении
f_9	≥ 0	По собственной частоте колебаний

Таблица 3

Критерии качества

Обозначение	Название	Размерность
Φ_1	Суммарная масса ПП и противовесов	кг
Φ_2	Габаритный размер	м
Φ_3	Собственная частота колебаний пильного модуля	Гц
Φ_4	Критическая частота вращения валов	об./мин
Φ_5	Сила натяжения ПП	Н
Φ_6	Рабочая частота вращения валов	об./мин
Φ_7	Устойчивая способность ПП при резании	Н
Φ_8	Начальная жесткость ПП	Н/мм
Φ_9	Толщина ПП	мм

Метод визуально-интерактивного анализа (МВИА) для поддержки процесса принятия решения при проектировании ПБ. Теории и методам многокритериальной оптимизации посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов [9–11]. Основная идея большей части методов многокритериальной оптимизации заключается в приведении критериев к одному эквивалентному (скалярный подход). В общем случае эквивалентный критерий имеет вид

$$\Psi(\alpha) = convolution\{\Phi_1(\alpha), \Phi_2(\alpha), \dots, \Phi_M(\alpha)\},$$

где $\alpha = (\alpha_1, \alpha_1, \dots, \alpha_N)$ — вектор N управляемых параметров; Φ_i — i -й критерий ($i = 1, \dots, M$); *convolution* — обобщенное обозначение оператора «свертки» критериев. Для определения оптимального значения эквивалентного критерия $\Psi(\alpha)$ применяют алгоритмы однокритери-

альной оптимизации, базирующиеся на различных методах: прямом, гибридном, генетическом, градиентном и др. [9–11].

Кроме алгоритмов, основанных на скалярных методах, в последние годы получили развитие и другие подходы для решения многокритериальных проблем, такие как теоретико-игровые методы [12], теория нечетких множеств [13] и др.

Однако у большей части этих методов отсутствуют инструменты, позволяющие специалистам наглядно представить диапазоны возможных значений критериев в процессе решения. Отсутствие наглядности затрудняет обоснованный и согласованный выбор решений. Полученные решения могут не полностью соответствовать требованиям специалистов, несмотря на то что они принадлежат множеству Парето и являются в определенном смысле оптимальны-

ми решениями. Например, один из критериев может оказаться избыточно хорошим, а другой едва удовлетворяет требованиям специалистов.

Таким образом, если требуется гибкий механизм согласования, то лучше рассматривать каждый критерий в отдельности без использо-

вания сверток, чтобы иметь возможность наглядно сравнивать конкурирующие варианты решения. При необходимости специалисты должны уступать друг другу и принимать согласованные решения. Эти аспекты вызывают потребность в создании инструмента — гибкой

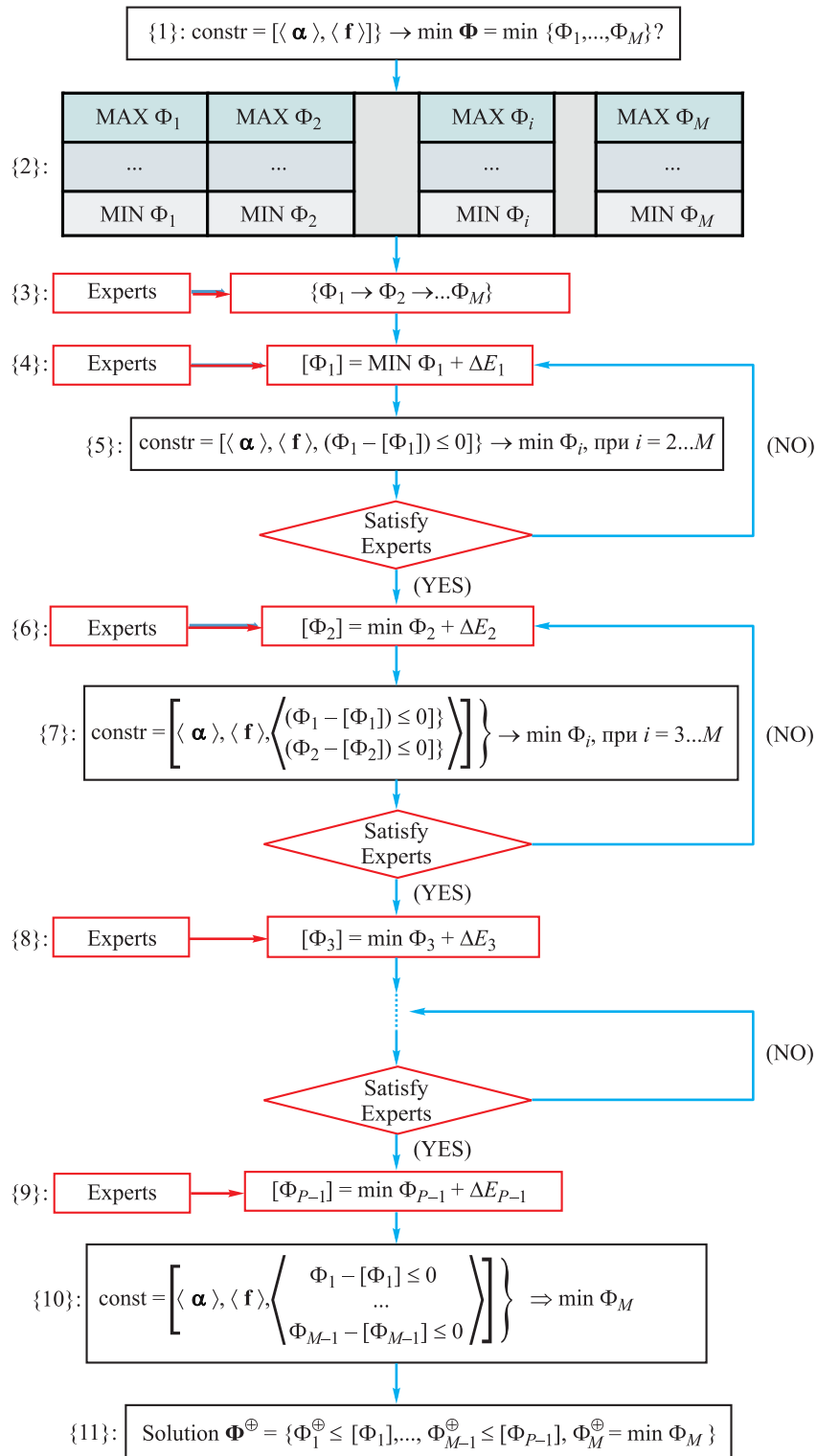


Рис. 5. Блок-схема алгоритма МВИА

методики с наглядными интерактивными и прикладными возможностями.

Для решения этой задачи предлагается метод визуально-интерактивного анализа, основанный на классических методах теории принятия решений, в том числе на методах исследования пространства параметров [14, 15], последовательных уступок [16] и интерактивных представлений [11]. Изложению теории и методов принятия решений посвящены работы Г. Вагнера, Н.Н. Моисеева, В.В. Подиновских, Р.Б. Статникова, Yotaro Hatamura и др. [10, 14–18].

Основная идея МВИА [19] заключается в использовании современных методов однокритериальной оптимизации [9] в качестве инструмента для нахождения допустимых решений многокритериальной проблемы [11].

МВИА включает в себя следующие этапы (рис. 5).

1. Создание математической модели: формирование диапазонов управляющих параметров α , составляющих вектор $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$, и определение функциональных ограничений $f = \{f_1(\alpha), f_2(\alpha), \dots, f_k(\alpha)\}$ и критериев качества $\Phi = \{\Phi_1(\alpha), \Phi_2(\alpha), \dots, \Phi_M(\alpha)\}$. Ограничения *constr* включают в себя ограничения параметров α и функций f (шаг {1}).

2. Формирование интерактивной таблицы. Определение предельных наихудших $MAX\Phi_i$ и наилучших $MIN\Phi_i$ значений для каждого отдельного критерия (с помощью различных методов однокритериальной оптимизации). Для удобства представления и анализа максимизируемые значения критериев берутся с отрицательными знаками. Результаты заносятся в интерактивную таблицу (шаг {2}), которая представляет собой важный интерактивный инструмент для специалистов (Experts) в процессе анализа и выбора оптимальных согласованных решений (рис. 6). Если окончательное решение (Solution)

является вектором $\Phi^\oplus = \{\Phi_1^\oplus, \Phi_2^\oplus, \dots, \Phi_M^\oplus\}$, значение которого удовлетворяет требованиям всех специалистов, то он принадлежит областям $\Phi_i^\oplus \in [MIN\Phi_i; MAX\Phi_i]$.

3. Определение порядка значимости критериев ЛПР. Например, $\{\Phi_1 \mapsto \Phi_2 \mapsto \dots \Phi_M\}$ (шаг {3}).

4. Назначение ЛПР критериального ограничения $[\Phi_1]$ для первого критерия (шаг {4}). Можно использовать сразу же лучшее значение данного критерия $[\Phi_1] = MIN\Phi_1$, которое было найдено на втором шаге {2}. Однако проблема заключается в том, что при таком жестком требовании к критерию Φ_1 полученное решение обычно оказывается несогласованным. Таким образом, специалистам придется выбирать какое-то пороговое значение $[\Phi_1]$, отличающееся от $MIN\Phi_1$: $[\Phi_1] = MIN\Phi_1 + \Delta E_1$ ($\Delta E_1 > 0$). Среди допустимых решений, при которых $\Phi_1 \leq [\Phi_1]$, можно выделить такие решения, которые позволят следующим критериям достичь наилучшего значения.

5. Определение минимальных значений всех оставшихся менее значимых критериев (шаг {5}). Проверка: удовлетворяют ли найденные минимальные значения оставшихся критериев $\min\Phi_i$ требованиям специалистов. Если нет, то делается уступка для назначенного критерия. Если да, то задается пороговое значение $[\Phi_2] = \min\Phi_2 + \Delta E_2$ для второго критерия (шаг {6}). Далее добавляется второе ограничение

$$\begin{cases} \Phi_1 - [\Phi_1] \leq 0, \\ \Phi_2 - [\Phi_2] \leq 0 \end{cases}$$

при определении оптимальных значений оставшихся критериев $\min\Phi_i$ (шаг {7}).

6. Этапы 4–5 повторяются до нахождения лучшего значения последнего критерия (шаг {10}).

7. Получено согласованное решение $\Phi^\oplus = \{\Phi_1^\oplus, \Phi_2^\oplus, \dots, \Phi_p^\oplus\}$ (шаг {11}).

Значения критериев ↓ Направление улучшения	$MAX\Phi_1$	$MAX\Phi_2$	$MAX\Phi_i$	$MAX\Phi_{M-1}$	$MAX\Phi_M$	Предельные наихудшие значения
	
	$[\Phi_1]$	$[\Phi_2]$	$[\Phi_i]$	$[\Phi_{M-1}]$	$[\Phi_M]$	Критериальные ограничения $[\Phi_i]$, назначенные ЛПР
	
	$\min\Phi_1$	$\min\Phi_2$	$\min\Phi_i$	$\min\Phi_{M-1}$	$\min\Phi_M$	Лучшие значения критериев с учетом критериальных ограничений
	
	$MIN\Phi_1$	$MIN\Phi_2$	$MIN\Phi_i$	$MIN\Phi_{M-1}$	$MIN\Phi_M$	Предельные наилучшие значения
	Критерии качества					

Рис. 6. Интерактивная таблица

Отметим, что улучшение значения какого-либо критерия может привести к ухудшению остальных. Чтобы помочь специалистам оценить такую ситуацию, следует провести численный эксперимент по регулированию области критериев $\Phi_i^{\oplus} = \min \Phi_i + \Delta E_i$ для получения согласованного решения. Практика показывает, что во многих случаях такой подход позволяет найти лучшие решения.

Использование МВИА предоставляет следующие возможности:

- контроль информации об областях значений критериев и их изменении в процессе решения;
- визуальное представление с помощью интерактивной таблицы, позволяющее оценить «стоимость» улучшения одного из критериев и его влияние на остальные критерии, значения которых могут ухудшаться;
- помощь в выборе разумных критериальных ограничений, при которых существуют согласованные решения;
- автоматический поиск рациональных решений, удовлетворяющих требованиям ЛПР.

Управление процессом принятия решений при проектировании ПБ. Рассмотрим пример задачи управления процессом многокритериального проектирования ПБ многопильного станка нового типа. Решение осуществляется авторской прикладной программой VIAM, составленной по изложенному выше МВИА на языке Maple. В процессе обсуждения, назначения критериальных ограничений и уступок участвуют все специалисты, связанные с этим станком.

На основе диапазонов управляющих параметров и функциональных ограничений определены предельные значения для каждого критерия, которые введены в интерактивную таблицу. Максимизируемые значения критериев берутся с отрицательными знаками. Для удобства анализа, сравнения и назначения рациональных критериальных ограничений в интерактивной таблице представлены значения критериев существующего станка. Для визуального представления различных решений на одном графике все критерии приведены в относительном безразмерном виде:

$$\Phi_i^s \mapsto \frac{\Phi_i - \text{MIN}\Phi_i}{\text{MAX}\Phi_i - \text{MIN}\Phi_i} \quad (i = 1 \dots 9).$$

Рассмотрим три возможные ситуации.

В ситуации I предполагаем, что на основе требования заказчика специалистами выбраны семь наиболее важных критериев, порядок приоритетов которых имеет следующий вид:

$$\{\Phi_1 \mapsto \Phi_6 \mapsto \Phi_5 \mapsto \Phi_9 \mapsto \Phi_3 \mapsto \Phi_4 \mapsto \Phi_7\}.$$

Значения остальных критериев не ограничены. Процесс решения задачи для ситуации I приведен в табл. 4. В прямоугольниках показаны «согласованные» специалистами значения критериев.

Оптимальное значение критерия: $\text{MIN}\Phi_1 = 0,37$. После обсуждения специалисты решили, что $\Phi_1 \leq 0,5$ является достаточно хорошим условием, поэтому назначили пороговое значение $[\Phi_1] = 0,5$ в целях нахождения большего количества решений, среди которых можно будет выделить те, которые улучшат значения других критериев.

Добавлено ограничение $(\Phi_1 - [\Phi_1] \leq 0)$ в процессе поиска минимального значения критерия 6. В результате получено решение (S1) с лучшим значением критерия 6 $\min \Phi_6 = -2\,963,7$ (после уступки критерия 1). Специалисты решили, что если бы скорость вращения вала достигла 2 800 об./мин, то процесс поиска считался бы успешным. Поэтому они выбрали пороговое значение $[\Phi_6] = -2\,800$.

Добавляя ограничение $(\Phi_6 - [\Phi_6] \leq 0)$ при поиске минимального значения критерия 5, получаем решение (S2). Согласно этому решению, хотя критерии 1 и 6 считаются удовлетворительными, критерий 5 стремился к лучшему значению, $\Phi_9 = 1,99$ является плохим результатом. Специалисты ослабили требование к критерию 6 ($[\Phi_6] = -2\,760$) и одновременно выбрали пороговое значение $[\Phi_5] = 1\,550$ при поиске минимального значения Φ_9 . Найдено решение (S3), на основе которого с установлением порогового значения $[\Phi_9] = 1,70$ продолжаем процесс поиска минимального значения критерия 3.

Получаем решение (S4) с минимальным значением $\min \Phi_3 = -111,65$. Из этого решения выбираем пороговое значение $[\Phi_3] = -111$. На этом шаге также принимаем пороговое значение $[\Phi_4] = -4\,200$ для определения минимального значения $\min \Phi_7$. Окончательно имеем решение (S5), являющееся рациональным согласованным (рис. 7).

Таблица 4

Процесс решения задачи в ситуации I

	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(S1) [Φ_6] = -2 900	α_i	0,030656	0,060012	1,905	0,01849	0,2	0,11071	2 000	2 963,7	-
	f_i	-1 358,7	0,3	-87,672	1 239,2	5,6049	1,3817	104	509,9	979,33
	Φ_i	0,5000	1,0563	-108,06	-4 446	2 000	-2 963,7	-1 009,9	-50,1	1,605
(S2) [Φ_6] = -2 760	α_i	0,030009	0,060005	1,80	0,00019	0,19947	0,036986	1 543	2 804	-
	f_i	-1 952	1,1	-136,41	553	47,712	58,548	29 362	1 290,6	6 430,6
	Φ_i	0,49991	1,054	-118,9	-4 207,6	1 543	-2 804	-1 790,6	-79,3	1,99
(S3) [Φ_9] = 1,70	α_i	0,03	0,06	1,676	0,00026	0,2	0,071454	1 550	2 774	-
	f_i	-1 673,2	67,3	-91,463	666,92	24,963	12,248	5 002	6 71,3	2 771,6
	Φ_i	0,4998	1,055	-111,18	-4 262	1 550	-2 774	-1 171,3	-55,0	1,676
(S4) [Φ_3] = -111 [Φ_4] = -4 200	α_i	0,03	0,06	1,70	0,0001	0,2	0,068918	1 550	2 775,6	-
	f_i	-1 690	56,5	-94,426	659	26,242	13,373	6 498	708,8	2 958,7
	Φ_i	0,49984	1,055	-111,65	-4 248,1	1 550	-2 775,6	-1 208,8	-56,5	1,70
(S5)	α_i	0,03	0,060028	1,70	0,00244	0,19957	0,068942	1 550,3	2 798,3	-
	f_i	-1 666,5	0,5	-99,786	659,07	23,989	12,749	7 515	738	2 965
	Φ_i	0,5000	1,0541	-111,62	-4 198,2	1 550,3	-2 798,3	-1 238	-57,5	1,70

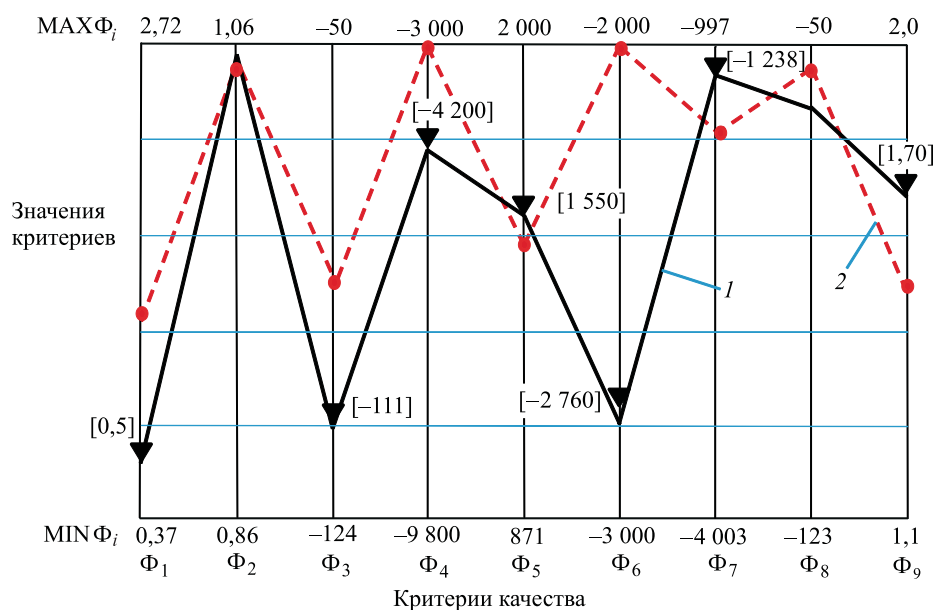


Рис. 7. Результаты решения задачи в ситуации I (1) и критерии существующего станка (2)

В ситуации II необходимо улучшить только четыре критерия в порядке значимости $\{\Phi_6 \mapsto \Phi_9 \mapsto \Phi_1 \mapsto \Phi_5\}$. Решение осуществляется аналогично предыдущему. Пороговые значения для критериев назначаются последовательно в процессе решения: $[\Phi_6] = -2\,850$; $[\Phi_9] = 1,5$; $[\Phi_1] = 0,8$. В итоге для критерия 5 лучшее значение $\min \Phi_5 = 982$. Полученное решение приведено на рис. 8, а. Здесь и на рисунках для других ситуаций значения $[\Phi_i]$, расположенные рядом со знаком «▼», соответствуют критериальным ограничениям, назначенным ЛПР.

В ситуации III следует улучшить четыре критерия в порядке приоритета $\{\Phi_6 \mapsto \Phi_9 \mapsto \Phi_1 \mapsto \Phi_5\}$ с учетом заранее заданных огра-

ничений для остальных критериев: $[\Phi_2] = 1,0$; $[\Phi_3] = -80$; $[\Phi_4] = -7\,000$; $[\Phi_7] = -1\,400$; $[\Phi_8] = -55$. Специалисты последовательно назначают удовлетворительные пороговые значения для каждого критерия на основе интерактивной таблицы: $[\Phi_6] = -2\,800$; $[\Phi_9] = 1,47$; $[\Phi_1] = 1,1$. В результате для критерия 5 лучшее значение $\min \Phi_5 = 1\,268$. Найденное решение приведено на рис. 8, б.

В табл. 5 приведены значения критериев рациональных согласованных решений для трех ситуаций и результаты их сравнения с данными существующего станка, выраженные в процентах: положительный знак соответствует улучшению, отрицательный — ухудшению.

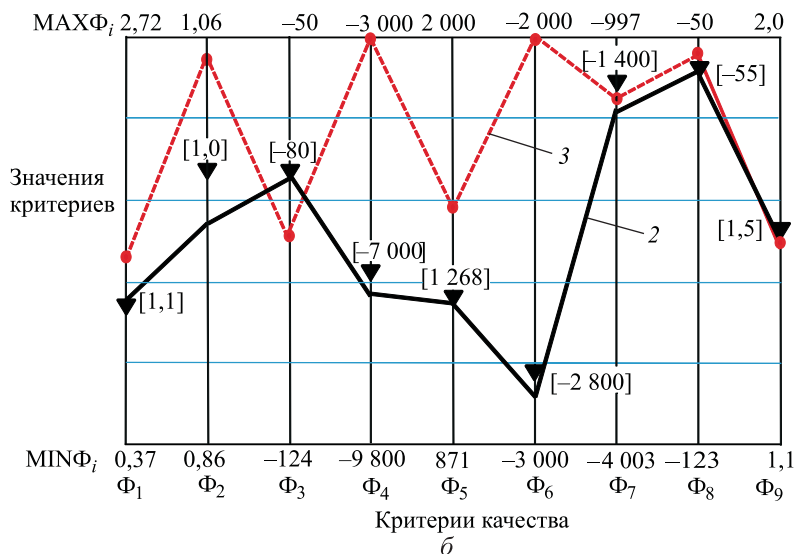
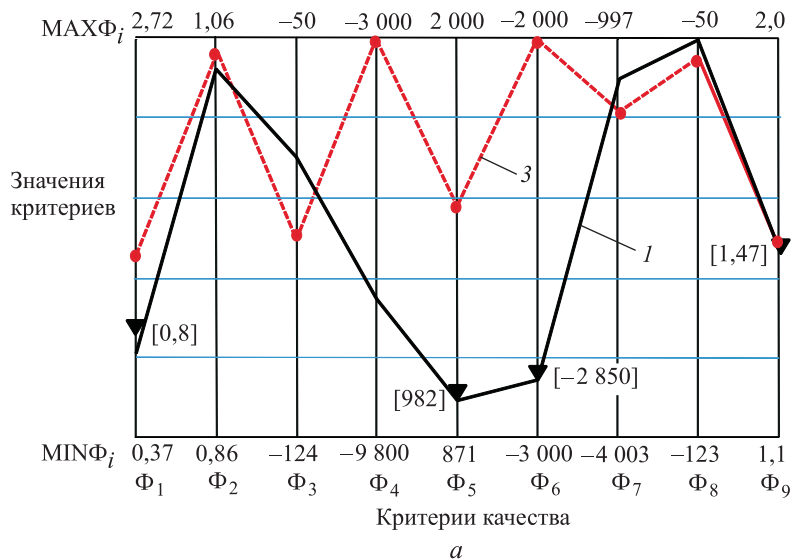


Рис. 8. Результаты решения задачи в ситуациях II (1), III (2) и критерии существующего станка (3)

Таблица 5

Значения критериев рациональных согласованных решений в трех ситуациях

Варианты	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$MAX\Phi_i$		2,72	1,06	-50	-3 000	2 000	-2 000	-997	-50	2
$MIN\Phi_i$		0,37	0,86	-124	-9 800	871	-3 000	-4 003	-122	1
Существующий станок	α_i	0,030	0,08	1,47	0,04	0,160	0,50	1 500	2 000	-
	Φ_i	1,35	1,050	-90	-3 047	1 500	-2 000	-1 507	-55	1,47
Ситуация I	α_i	0,030	0,060	1,70	0,002	0,200	0,07	1 550	2 798	-
	Φ_i	0,50	1,054	-112	-4 163	1 550,3	-2 798	-1 238	-57,5	1,70
Улучшение, %		63,0	-0,4	24,0	36,6	-3,4	39,9	-17,9	4,5	-15,6
Ситуация II	α_i	0,030	0,062	1,468	0,061	0,196	0,18	982	2 852	-
	Φ_i	0,695	1,046	-79,1	-7 427	982,0	-2 852	-1 257	-50,2	1,47
Улучшение, %		48,5	0,4	-12,1	143,7	34,5	40,1	-16,6	-8,7	0
Ситуация III	α_i	0,033	0,079	1,47	0,058	0,151	0,31	1267	2862	-
	Φ_i	1,04	0,962	-80,0	-7 263	1 267,9	-2 862	-1 584	-55,5	1,47
Улучшение, %		23,0	8,4	-11,1	138,4	15,5	43,1	5,1	0,9	0

На рис. 9 представлены диапазоны изменения управляющих параметров рациональных решений в пространстве параметров. Эта информация используется (при необходимости) для коррекции диапазонов управляющих параметров с целью определения других рациональных согласованных решений.

Согласно полученным решениям, созданы различные конструктивные схемы пильного

модуля (рис. 10). Каждое решение соответствует одному из возможных вариантов изготовления ПБ.

Для подготовки производства ПБ выбран вариант конструкции, показанный на рис. 10, в. Конструирование ПБ реализовано в среде программного комплекса Unigraphics NX (рис. 11).

Результаты расчета конструкции ПБ в программном комплексе NX Nastran [20] (см. рис. 11)

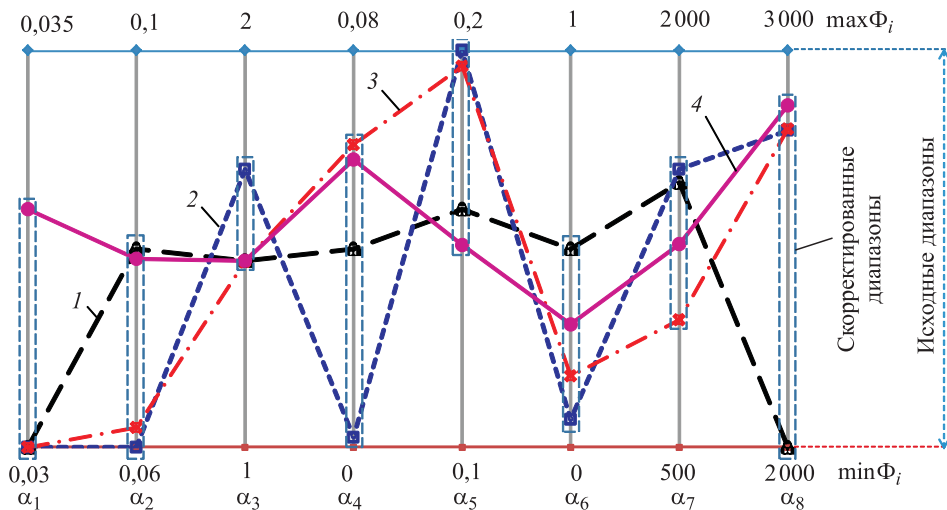


Рис. 9. Диапазоны управляющих параметров и рациональные параметры (▲, □, ×, ●) конструкции пильного модуля:
1 — существующий станок; 2–4 — ситуации I–III

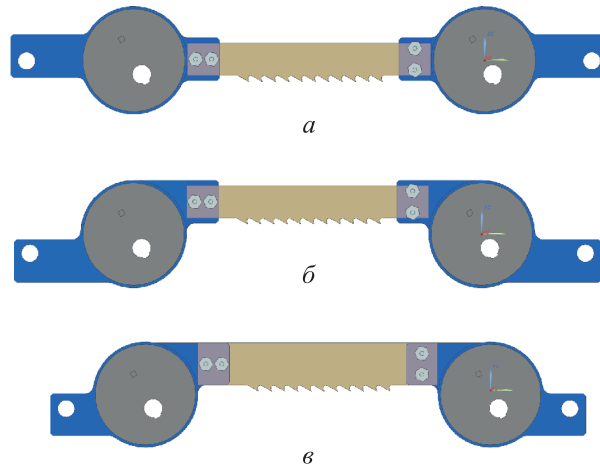


Рис. 10. Конструктивные схемы пильного модуля, соответствующие решениям, полученным в ситуациях I (а), II (б) и III (в)

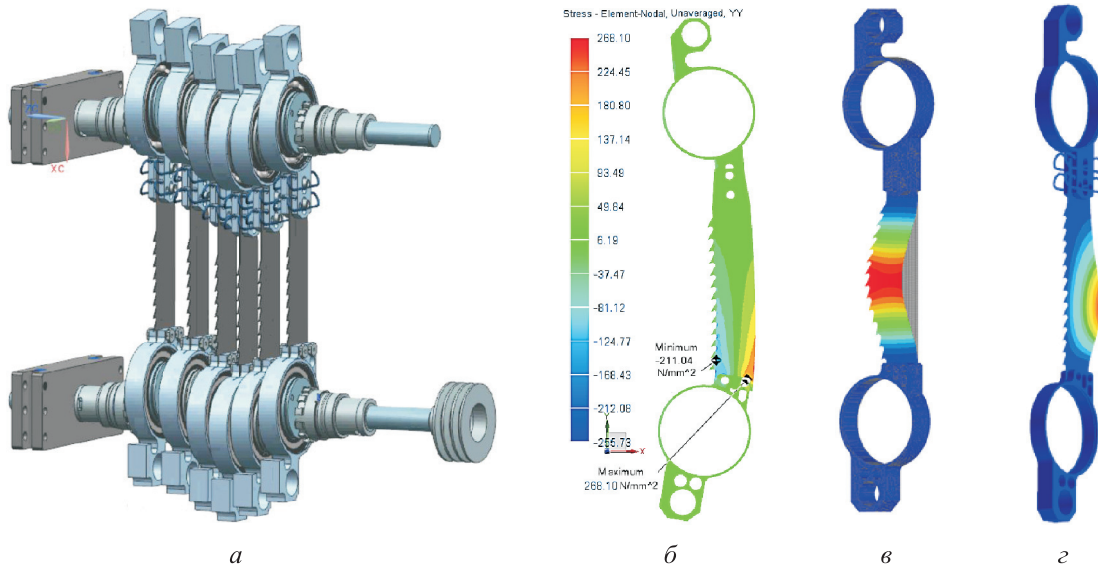


Рис. 11. Конструирование и анализ ПБ на основе рациональных параметров в среде программного комплекса Unigraphics NX:

а — 3D-модель, состоящая из шести пильных модулей; б — анализ напряженно-деформированного состояния, Н/мм²; в — расчет собственной частоты колебаний; г — анализ устойчивости

подтверждают правильность и преимущества рациональных схем ПБ, разработанных с помощью МВИА.

Выводы

1. Разработан МВИА, позволяющий определять и контролировать область допустимых значений критериев качества, оценивать их взаимовлияние и указывать рациональные критериальные ограничения, при которых существуют согласованные варианты конструкции ПБ.

2. На основе МВИА разработана прикладная программа для поддержки процесса принятия решений при многокритериальном проектировании и совершенствования конструкции ПБ лесопильного станка.

3. Результаты расчета позволили найти рациональные варианты проектирования ПБ и дать рекомендации по его совершенствованию.

4. Данные, полученные при расчете конструкции ПБ в программном комплексе NX Nastran, подтвердили правильность и преимущества рациональных схем ПБ, разработанных с помощью МВИА.

Литература

- [1] Eigner M., Stelzer R. *Product Lifecycle Management*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 434 p.
- [2] Соломенцев Ю.М. *Основы автоматизации машиностроительного производства*. Москва, Высшая школа, 1999. 312 с.
- [3] Прокопов В.С. *Разработка методики численного анализа динамических характеристик многопильного станка с круговым поступательным движением дереворежущих полотен*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 205 с.
- [4] Блохин М.А. *Исследование, разработка и создание лесопильного оборудования с круговым поступательным движением пильных полотен*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2015. 313 с.
- [5] Фунг В.Б., Прокопов В.С., Гаврюшин С.С. Исследование устойчивости плоской формы изгиба полотен многопильного станка с круговым поступательным движением. *Вестник машиностроения*, 2017, № 7, с. 83–88.
- [6] Фунг В.Б., Гаврюшин С.С., Блохин М.А. Методика уравнивания пильного блока лесопильного станка нового типа. *Фундаментальные и прикладные задачи механики. Тез. докл. Междунар. науч. конф.*, Москва, 24–27 октября 2017 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 143 с.
- [7] Фунг В.Б., Данг М.Х., Гаврюшин С.С. Разработка математической модели для процесса управления жизненным циклом многопильного станка нового типа. *Наука и образование: научное издание*, 2017, № 2, с. 87–109. URL: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/958> (дата обращения 15 мая 2017).
- [8] Гаврюшин С.С., Блохин М.А., Фунг В.Б. Анализ лесопильного станка с использованием виртуальной параметрической модели. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 128–136. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/743119.html> (дата обращения 15 мая 2017).
- [9] Singiresu S.Rao. *Engineering optimization theory and practice*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2009. 830 p.
- [10] Моисеев Н.Н. *Численные методы в теории оптимальных систем*. Москва, Наука, 1971. 424 с.
- [11] Eschenauer H., Koski J., Osyczka A. *Multicriteria Design Optimization, Procedures and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, 1990. 482 p.
- [12] Papageorgiou E., Hakki Eres M., Scanlan J. Value modelling for multi-stakeholder and multi-objective optimization in engineering design. *Journal of Engineering Design*, 2016, vol. 27, is. 10, pp. 697–724, doi: 10.1080/09544828.2016.1214693.
- [13] Shidpour H., Da Cunha C., Bernard A. Group multi-criteria design concept evaluation using combined rough set theory and fuzzy set theory. *Expert Systems with Applications*, 2016, vol. 64, pp. 633–644.
- [14] Соболев И.М., Статников Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва, Дрофа, 2006. 176 с.
- [15] Статников Р.Б., Матусов И.Б. О недопустимых, допустимых и оптимальных решениях в задачах проектирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2012, № 4, с. 10–19.
- [16] Подиновский В.В., Гаврилов В.М. *Оптимизация по последовательно применяемым критериям*. Москва, Советское радио, 1975. 192 с.
- [17] Вагнер Г. *Основы исследования операций*. В 3 т. Москва, Мир, 1972.
- [18] Yotaro Hatamura. *Decision-Making in Engineering Design*. London, Springer-Verlag London Limited, 2006. 275 p.
- [19] Фунг В.Б. *Автоматизация и управление процессом принятия решений при многокритериальном проектировании пильного блока лесопильного станка*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 157 с.
- [20] Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. *NX Advanced Simulation. Инженерный анализ*. Москва, ДКМ Пресс, 2012. 504 с.

References

- [1] Eigner M., Stelzer R. *Product Lifecycle Management*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 434 p.
- [2] Solomentsev Iu.M. *Osnovy avtomatizatsii mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Basics of automation engineering production]. Moscow, Vysshaia shkola publ., 1999. 312 p.
- [3] Prokopov V.S. *Razrabotka metodiki chislennogo analiza dinamicheskikh kharakteristik mnogopil'nogo stanka s krugovym postupatel'nyim dvizheniem derevvezhushchikh poloten*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of technique for numerical analysis of dynamic characteristics of multi-trip machine with circular translational motion of wood-cutting blades canvases. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2013. 205 p.
- [4] Blokhin M.A. *Issledovanie, razrabotka i sozdanie lesopil'nogo oborudovaniia s krugovym postupatel'nyim dvizheniem pil'nykh poloten*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Research, development and creation of sawmill equipment with a circular reciprocating saw blades. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2015. 313 p.
- [5] Fung V.B., Prokopov V.S., Gavriushin S.S. *Issledovanie ustoichivosti ploskoi formy izgiba poloten mnogopil'nogo stanka s krugovym postupatel'nyim dvizheniem* [Research of stability of flat bending shape of saw blade of gang saw with circular translation movement]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2017, no. 7, pp. 83–88.
- [6] Fung V.B., Gavriushin S.S., Blokhin M.A. *Metodika uravnovesivaniia pil'nogo bloka lesopil'nogo stanka novogo tipa* [Method trim saw block sawing machine of a new type]. *Fundamental'nye i prikladnye zadachi mekhaniki. Tez. dokl. Mezhdunar. nauch. konf.* [Fundamental and applied problems of mechanics. Abstracts of the International scientific conference]. Moscow, 24–27 October 2017, Moscow, Bauman Press, 2017. 143 p.
- [7] Fung V.B., Dang M.Kh., Gavriushin S.S. *Razrabotka matematicheskoi modeli dlia protsessa upravleniia zhiznennym tsiklom mnogopil'nogo stanka novogo tipa* [Development of Mathematical Model for Lifecycle Management Process of New Type of Multitrip Saw Machine]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication]. 2017, no. 2, pp. 87–109. Available at: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/958> (accessed 15 May 2017).
- [8] Gavriushin S.S., Blokhin M.A., Fung V.B. *Analiz lesopil'nogo stanka s ispol'zovaniem virtual'noi parametricheskoi modeli* [Analysis Sawmill Machine Using a Virtual Parametric Model]. *Nauka i obrazovani. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. BMSTU]. 2014, no. 12, pp. 128–136. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/743119.html> (accessed 15 May 2017).
- [9] Singiresu S.Rao. *Engineering optimization theory and practice*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2009. 830 p.
- [10] Moiseev N.N. *Chislennye metody v teorii optimal'nykh sistem* [Numerical methods in theory of optimal systems]. Moscow, Nauka publ., 1971. 424 p.
- [11] Eschenauer H., Koski J., Osyczka A. *Multicriteria Design Optimization, Procedures and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, 1990. 482 p.
- [12] Papageorgiou E., Eres M.H., Scanlan J. Value modelling for multi-stakeholder and multi-objective optimization in engineering design. *Journal of Engineering Design*, 2016, vol. 27, is. 10, pp. 697–724, doi: 10.1080/09544828.2016.1214693.
- [13] Shidpour H., Da Cunha C., Bernard A. Group multi-criteria design concept evaluation using combined rough set theory and fuzzy set theory. *Expert Systems with Applications*, 2016, vol. 64, pp. 633–644.
- [14] Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriiami* [The choice of optimal parameters in tasks with many criteria]. Moscow, Drofa publ., 2006. 176 p.
- [15] Statnikov R.B., Matusov I.B. Inadmissible, admissible, and optimal solutions in design problems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, no. 4, pp. 270–278.
- [16] Podinovskii V.V., Gavrilov V.M. *Optimizatsiia po posledovatel'no primeniayemykh kriteriiam* [Optimization on sequentially applied criteria]. Moscow, Sovetskoe radio publ., 1975. 192 p.

- [17] Vagner G. *Osnovy issledovaniia operatsii* [Fundamentals of operations research]. In 3 vol. Moscow, Mir publ., 1972.
- [18] Yotaro Hatamura. *Decision-Making in Engineering Design*. London, Springer-Verlag London Limited, 2006. 275 p.
- [19] Fung V.B. *Avtomatizatsiia i upravlenie protsessom priniatiia reshenii pri mnogokriterial'nom proektirovanii pil'nogo bloka lesopil'nogo stanka*. Diss. kand. tekhn. nauk [Automation and management of decision-making for multi-objective design of the sawing block sawing machine. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman Press, 2017. 157 p.
- [20] Goncharov P.S., Artamonov I.A., Khalitov T.F., Denisikhin S.V., Sotnik D.E. *NX Advanced Simulation. Inzhenernyi analiz* [NX Advanced Simulation. Engineering analysis]. Moscow, DKM Press publ., 2012. 504 p.

Статья поступила в редакцию 19.09.2017

Информация об авторах

ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gss@rk9.bmstu.ru).

НГУЕН Конг Динь (Ханой) — доктор технических наук, профессор, ректор Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам, ул. Хоанг Куок Вьет, 236, e-mail: dinhnc@mta.edu.vn).

ДАНГ Хоанг Минь (Хошимин) — кандидат технических наук. Хошиминский индустриальный университет (Хошимин, Вьетнам, район Го Вап, ул. Нгуен Ван Бао, 12, e-mail: danghoangminh@iuh.edu.vn).

ФУНГ Ван Бинь (Москва) — аспирант кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: phungvanbinh.vp@gmail.com).

Information about the authors

GAVRYUSHIN Sergey Sergeevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Computer Systems of Manufacture Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gss@rk9.bmstu.ru).

NGUYEN Cong Dinh (Hanoi) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Rector of Le Quy Don Vietnam State Technical University (Hanoi, Vietnam, Hoang Quoc Viet St., Bldg. 236, e-mail: dinhnc@mta.edu.vn).

DANG Hoang Minh (Ho Chi Minh) — Candidate of Science (Eng.). Industrial University of Ho Chi Minh City (Ho Chi Minh, Vietnam, District Go Vap, Nguyen Van Bao St., Bldg. 12, e-mail: danghoangminh@iuh.edu.vn).

PHUNG Van Binh (Moscow) — Postgraduate, Department of Computer Systems of Manufacture Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: phungvanbinh.vp@gmail.com).