

В. Ф. Буй, аспирант, e-mail: phuongbv1991@gmail.com,
С. С. Гаврюшин, д-р техн. наук, проф., e-mail: gss@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана,
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук,
В. Б. Фунг, канд. техн. наук, преподаватель, e-mail: phungvanbinh@lqdtu.edu.vn,
Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам,
Х. М. Данг, канд. техн. наук, преподаватель, e-mail: danghoangminh@iuh.edu.vn,
Индустриальный университет имени Хошимина, Хошимин, Вьетнам,
В. С. Прокопов, канд. техн. наук, доц., e-mail: vprokopov@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, ООО НТЦ "АПМ"

Автоматизация и управление процессом проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов

Излагается новая методика, примененная авторами для автоматизации процесса проектирования главного привода машины нового поколения, которая предназначена для промышленной мойки овощей и фруктов. Для решения задачи многокритериального проектирования предложен оригинальный подход, использующий связанные между собой математические модели, описывающие в едином информационном пространстве динамическое поведение, прочность и функциональные характеристики машины. Обобщенная математическая модель включает 12 управляющих параметров, 16 функциональных ограничений и 3 критерия качества. Для нахождения области Парето-оптимальных решений использовался генетический алгоритм. При выборе окончательного варианта использовался ситуационный подход, позволяющий осуществить выбор рационального решения из множества решений, принадлежащих Парето-оптимальной области. Выполнено сравнение рационального варианта конструкции, найденного с помощью предлагаемого подхода с существующими вариантами изготовления машины. Предлагаемая методика проектирования может быть рекомендована для проектирования широкого спектра аналогичных механических конструкций.

Ключевые слова: автоматизация, многокритериальная оптимизация, математическая модель, принятие решений, кривошипно-шатунный механизм, моечная машина для овощей и фруктов

Введение

Процесс проектирования механизмов и машин всегда рассматривался как ответственный и актуальный этап создания конструкции, обобщающий теоретические и экспериментальные знания в различных областях человеческой деятельности [1, 2]. В соответствии с традиционным подходом [3] процесс проектирования начинается с концептуального проектирования и разработки предварительного дизайна конструкции. На последующих этапах, как правило, проводятся многовариантные расчеты, позволяющие оценить качество проекта и выбрать подходящий вариант изделия (рис. 1). Для рассматриваемых в работе объектов проектирования, представляющих



Рис. 1. Традиционный процесс проектирования механизмов

собой механические конструкции, следует особо выделить этапы динамического и структурного анализа и синтеза.

На первом этапе определяются динамические характеристики системы, которые можно рассчитать либо с помощью специального программного обеспечения, либо используя упрощенные математические модели, известные в литературе как *суррогатные модели* (СМ). Большинство проблем инженерного проектирования требуют большого числа экспериментов и (или) моделирования для оценки качества проектируемого изделия. При создании СМ можно предположить, что элементы и детали проектируемой машины являются абсолютно жесткими, и можно ограничиться анализом только кинематических и динамических свойств изделия, не акцентируя внимание на анализе его напряженно-деформированного состояния (НДС). Второй этап сфокусирован на анализе НДС конструкции с использованием граничных и начальных условий, полученных на этапе динамического анализа.

В настоящее время существует специализированное программное обеспечение, позволяющее проводить расчет НДС. При этом нагрузки, действующие на систему, считаются известными. Проектируемая конструкция должна удовлетворять требованиям прочности и соответствовать функциональным критериям. Нагрузки, действующие в рассматриваемом классе механизмов, носят циклический характер с определенной степенью стохастичности и рассматриваются как динамические параметры. Как правило, при проектировании два вышеперечисленных расчетных этапа итерационно уточняются, пока не будут получены результаты, удовлетворяющие предъявляемым требованиям.

Рассмотренный традиционный подход позволяет инженерам проводить оптимизацию изделия, используя две СМ. Однако то обстоятельство, что модели принадлежат различным информационным пространствам и анализируются на двух разных этапах проектирования, существенно усложняет процесс поиска решения. Например, оптимизация динамической реакции и требуемой мощности двигателя на этапе 1 [4] может привести к нарушению условий прочности деталей на этапе 2.

В данной работе предлагается новый подход к решению задачи многокритериального проектирования механизмов циклического действия. Эффективность предложенного подхода подтверждена на практике при проектировании главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов. Конструкция механизма разработана с уче-

том требований технологического производства. При проектировании геометрические и физико-механические параметры элементов механизма рассматриваются в качестве управляющих параметров, что позволило создать расчетную модель изделия в едином информационном пространстве с ее кинематическими, динамическими и прочностными характеристиками. Созданная обобщенная математическая модель (ОММ) нацелена на применение многокритериальных методов оптимизации в рамках современных алгоритмов принятия решений, необходимых для экспертной оценки качества изделия, проводимой лицом, принимающим решение.

1. Применение многокритериального подхода при проектировании системы главного привода моечной машины

Разработанная методика была применена в процессе проектирования главного привода моечной машины [5]. Главным приводом машины является кривошипно-шатунный механизм (КШМ), который обеспечивает необходимые для мойки овощей и плодов колебания в горизонтальной плоскости (рис. 2, см. третью сторону обложки). Одной из важных проблем, связанных с применением КШМ, является наличие динамических реакций, вызывающих вибрации системы и снижающих усталостную прочность деталей [6, 7]. В целях снижения динамических реакций было предложено дополнить КШМ системой демпфирующих пружин (КШМ-П). Необходимо отметить, что задача проектирования системы главного привода, которая включает в себя динамические и прочностные ограничения, является задачей многокритериальной оптимизации.

Процесс многокритериального проектирования механизмов, устраняющий перечисленные ограничения традиционного метода, представлен на рис. 3.

Следует отметить, что важнейшим элементом нового подхода является наличие ОММ. В рамках концепции единого информационного пространства оптимизация конструкции осуществляется в соответствии с рядом динамических и прочностных критериев и ограничений. Иллюстрация ОММ системы КШМ-П показана на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки).

Используемая ОММ позволяет по задаваемому вектору управляющих параметров с учетом ограничений автоматически вычислять все критерии качества (рис. 5, см. четвертую сторону обложки). Функциональные ограниче-

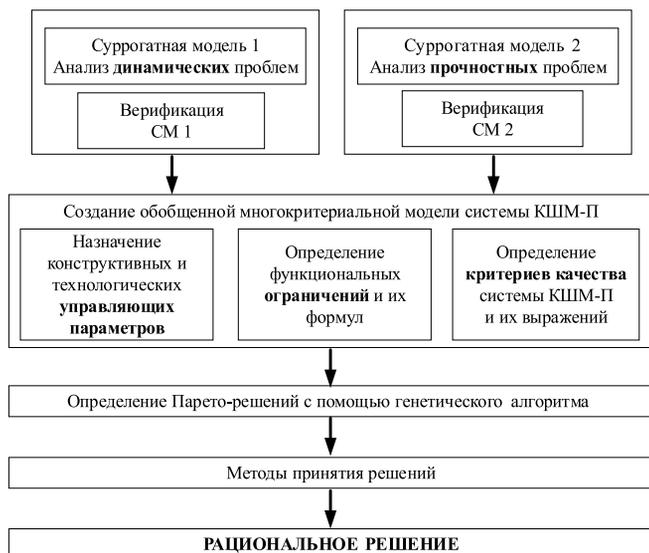


Рис. 3. Процедура многокритериального проектирования КШМ-П на основе использования ОММ

ния являются своего рода фильтрами для отсекаания недопустимых решений, находящихся в пространстве критериев качества. Процесс нахождения минимальных значений критериев качества в созданной математической модели реализован с помощью методов оптимизации [8]. Одним из известных методов оптимизации является генетический алгоритм (genetic algorithm, ГА). Основная идея ГА заключается в использовании двух механизмов: генетического наследования (population) и естественного отбора (selection). При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде и основные понятия линейной алгебры [9–11].

ГА позволяет определить Парето-оптимальное решение, но возникает вопрос: какова должна быть стратегия поиска для получения рациональных решений, удовлетворяющих требованиям всех экспертов? Ответ на этот вопрос дают методы оптимального управления [12]. На следующем шаге применяются методы принятия решений для выбора рациональных вариантов проектирования на основе множества Парето-решений. В зависимости от конкретных производственных условий можно использовать различные методы принятия решений: метод последовательных уступок, метод главных критериев и др. [13–15].

2. Обобщенная математическая модель главного привода мочной машины

Динамические и кинематические характеристики системы КШМ-П под действием внешних сил F (рис. 6) были изучены с помощью

аналитических выражений, которые представлены в работах [16, 17]. Динамические характеристики, такие как требуемая мощность (P) и динамическая реакция (R_x), являются важными факторами для обеспечения стабильной работы системы и зависят от времени [4].

Для создания математической модели необходимо выбрать набор параметров, которые управляют процессом вычисления СМ в едином информационном пространстве. В нашем случае были выбраны размеры кривошипа, шатуна и жесткость пружины (рис. 7).

Значения массы, положения центра тяжести, момента инерции частей [18] выражаются через векторы управляющих параметров, обозначенные $x = (x_1, \dots, x_{12})$ (табл. 1). На основе технического анализа и экспериментальных данных, накопленных экспертами при оценке процесса проектирования и испытаний мочной машины, назначены управляющие параметры главного привода и диапазоны их значений.

СМ позволяет получить выражения для ограничений в ОММ. Для достижения оптимальной конструкции должны одновременно соблюдаться прочностные условия (срез, смятие, растяжения—сжатия...), условия устойчивости, усталости кривошипа, а также шатуна.

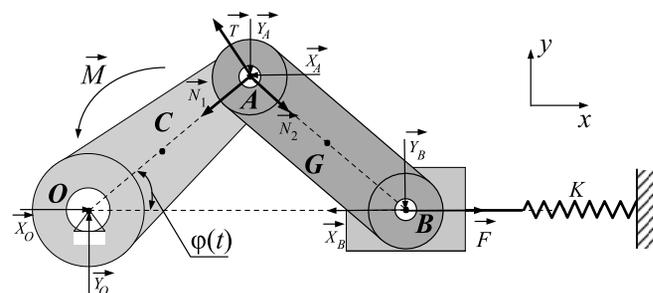


Рис. 6. Расчетная модель системы КШМ-П:

$X_{O/A/B}$, $Y_{O/A/B}$ — составляющие динамических реакций в парах O , A , B по координатным осям, совпадающим с положительным направлением координатных осей x , y , соответственно; N_1 , N_2 — сжимающие нагрузки в паре A кривошипа и шатуна, соответственно; $\varphi(t)$ — угол поворота; M — крутящий момент двигателя

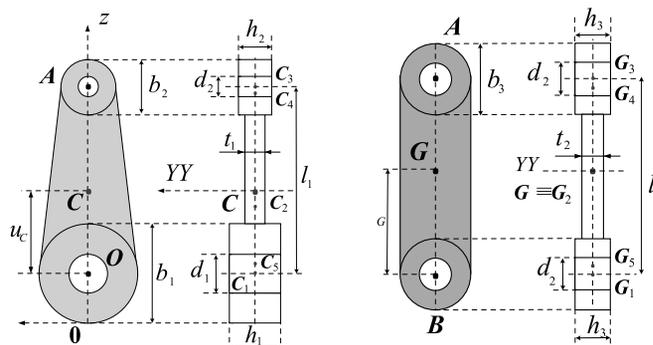


Рис. 7. Геометрические параметры, используемые в ОММ

Таблица 1

Управляющие параметры

Обозначение	Исходное обозначение	Минимальное значение	Максимальное значение	Единица измерения	Описание
x_1	t_1	3	30	мм	Толщина кривошипа
x_2	t_2	3	30	мм	Толщина шатуна
x_3	K	0	1000	Н/м	Жесткость пружины
x_4	b_1	30	100	мм	Ширина нижней головки кривошипа
x_5	b_2	30	100	мм	Ширина верхней головки кривошипа
x_6	b_3	30	100	мм	Ширина шатуна
x_7	d_1	6	60	мм	Диаметр большего вкладыша кривошипа
x_8	d_2	9	55	мм	Диаметр малого вкладыша кривошипа
x_9	h_1	6	30	мм	Толщина большего вкладыша кривошипа
x_{10}	h_2	6	30	мм	Толщина малого вкладыша кривошипа
x_{11}	h_3	6	30	мм	Толщина вкладыша шатуна
x_{12}	t	0	$\frac{2\pi}{\omega}$	с	Расчетное время (динамика)

Математическая модель главного привода моечной машины создана на основе синтеза различных требований к конструкции КШМ-П. Она состоит из 12 управляющих параметров (табл. 1), 16 функциональных ограничений (табл. 2) и 3 критериев качества (табл. 3). Методы расчета функциональных ограничений, критериев качества и процесс верификации СМ подробно описаны в работе [19].

3. Автоматизация и управление процессом проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов

В этом разделе приведены результаты проектирования главного привода моечной машины, полученные с использованием ОММ. Получена Парето-область с помощью генетического алгоритма. Затем представлен процесс выбора рациональных решений, удовлетво-

Таблица 2

Функциональные ограничения

Ограничение	Описание
$f_1 = \frac{1}{10} - \frac{t_1}{b(z)} \leq 0$	Ограничение толщины кривошипа [20] $b_2 < b(z) < b_1$
$f_2 = n_{stab} - \frac{P_{cr1}}{N_{1max}} \leq 0$	Условие устойчивости кривошипа: n_{stab} — запас устойчивости; P_{cr1} — критическая сжимающая нагрузка для кривошипа
$f_3 = n_{stab} - \frac{P_{cr2}}{N_{2max}} \leq 0$	Условие устойчивости шатуна: n_{stab} — запас устойчивости; P_{cr2} — критическая сжимающая нагрузка для шатуна
$f_4 = n_{fatig} - \frac{\sigma_{-1}}{k_1\sigma_\alpha + \alpha_\sigma\sigma_m} \leq 0$	Условие усталостной прочности кривошипа: n_{fatig} — запас усталости; σ_{-1} — предел усталости материала КШМ; k_1 — коэффициент, учитывающий влияние других факторов на циклическую прочность кривошипа; α_σ — коэффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии цикла; σ_α — амплитудное напряжение кривошипа; σ_m — среднее напряжение кривошипа
$f_5 = n_{fatig} - \frac{\sigma_{-1}}{k\sigma_{2max}} \leq 0$	Условие усталостной прочности шатуна: k — коэффициент, учитывающий влияние других факторов на циклическую прочность шатуна; σ_{2max} — максимальное напряжение шатуна
$f_6 = n_{cut} - \frac{\tau_{cut}}{\tau_{1max}} \leq 0$	Условие прочности на срез верхней головки кривошипа: n_{cut} — запас прочности на срез; τ_{cut} , τ_{1max} — предельное и максимальное напряжение на срез кривошипа
$f_7 = \frac{2(M + Tl_1)}{d_1h_1(h_1 - t_{1l})} \leq \sigma_{ш}$	Прочность на смятие шпонки: h_r , t_{1l} — размеры шпонки
$f_8 = \frac{2(M + Tl_1)}{d_1h_1b_1} \leq \tau_{cut}$	Прочность на срез шпонки: b_1 — размер шпонки
$f_9 = \frac{\sqrt{XO^2 + YO^2}}{(b_1 - d_1)h_1} \leq \tau_{cut}$	Прочность на срез нижней головки кривошипа
$f_{10} = \frac{\sqrt{XA^2 + YA^2}}{(b_1 - D_2)h_2} \leq \tau_{cut}$	Прочность на срез подшипника: D_2 — размер подшипника
$f_{11} = b_1 \geq d_1 + 0,005$ $f_{12} = b_2 \geq D_2$ $f_{13} = b_2 \geq d_2 + 0,005$ $f_{14} = b_3 \geq d_2 + 0,005$ $f_{15} = 2h_2 - t_1 - t_2 \geq 0,001$ $f_{16} = b_1 - b_2 \geq 0,02$ $f_{17} = h_1 - t_1 \geq 0,001$	Дополнительные технологические ограничения (геометрические характеристики)

Таблица 3

Критерии качества

Обозначение	Единица измерения	Описание
$\Phi_1 = \max(M(t)\omega(t)) \rightarrow \min$	Вт	Требуемая мощность ротора
$\Phi_2 = m_1 + m_2 \rightarrow \min$	кг	Масса КШМ
$\Phi_3 = \max(\sqrt{X_{O}^2(t) + Y_{O}^2(t)}) \rightarrow \min$	Н	Динамическая реакция (фактор, вызывающий вибрацию)

ряющих требованиям экспертов. Проведено сравнение согласованных и оптимальных вариантов с решением, полученным с помощью традиционного метода проектирования.

3.1. Парето-оптимальное решение

В табл. 4 (в сокращенном виде) и на рис. 8 соответственно представлены 73 оптимальных решения (вектор управляющих параметров x , значения критериев качества Φ) и область Парето-оптимальных решений. По табл. 4 можно выбирать конкретные варианты проектирования системы КШМ-П для производства моечной машины.

3.2. Стратегии принятия решений

В реальном производстве требования клиента являются наиболее важными, и производителю надо стремиться выполнить эти требования. Для конкретного производственного условия в зависимости от потребностей клиента порядок приоритетов критериев качества может варьироваться. В данной работе рассматриваемыми критериями качества являются

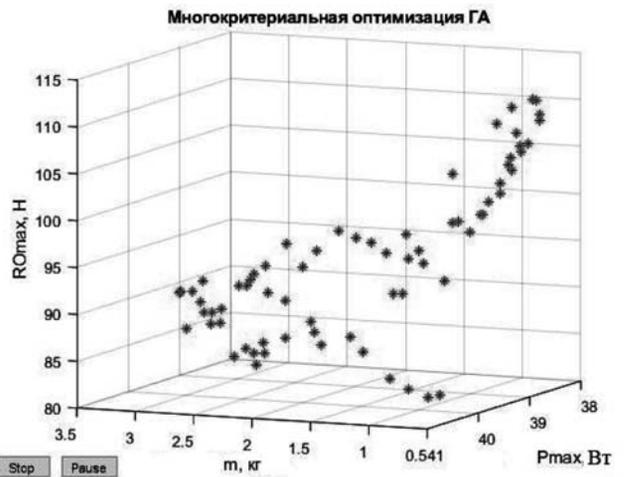


Рис. 8. Область оптимального Парето-решения с использованием методом ГА

мощность двигателя, масса и динамическая реакция. В некоторых конкретных условиях масса является наиболее важным критерием, в других случаях энергетическое требование ставится на первое место, а иногда клиенты предъявляют высокие требования к снижению шума и вибрации. В каждой из этих ситуаций, когда порядок приоритетов критериев различен, можно получить разные оптимальные решения, удовлетворяющие требованиям экспертов, участвующих в процессе проектирования. Чтобы проиллюстрировать вышесказанное, использованы два метода принятия решений (метод последовательных уступок и метод главных критериев) для выбора рациональных вариантов проектирования из Парето-области.

3.2.1. Метод последовательных уступок

На основе 73 найденных решений и в соответствии с требованиями экспертов инже-

Таблица 4

Набор управляющих параметров и значений соответствующих критериев качества

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
1	17,64	17,68	570,2	84,09	57,78	60,79	48,25	25	25,06	25,90	27,99	39,521	3,483	83,587
2	11,80	16,57	676,8	71,47	51,37	50,62	50,57	30	21,97	21,11	24,15	39,083	2,067	97,194
3	11,71	16,55	702,1	71,24	51,12	50,98	50,23	30	21,80	22,24	24,18	39,039	2,084	99,663
4	17,43	17,41	571,0	77,86	53,67	64,91	48,64	25	24,07	25,28	25,41	39,547	3,301	83,783
5	17,56	17,56	570,9	83,19	57,05	61,26	48,17	25	24,68	25,75	27,79	39,523	3,443	83,697
...														
70	17,25	17,13	580,8	78,61	54,60	53,09	48,84	30	23,95	24,22	25,68	39,328	2,650	86,562
71	11,80	16,57	677,8	71,47	51,37	50,62	50,57	30	21,97	21,11	24,15	39,081	2,067	97,294
72	16,83	16,91	572,9	80,16	55,32	54,58	49,14	25	24,24	24,88	26,80	39,391	2,911	85,098
73	13,16	16,76	649,0	72,28	53,03	50,84	50,10	30	23,18	21,44	24,81	39,145	2,199	94,164

нер-конструктор выбирает порог для наиболее важного критерия, например Φ_1 , с обозначением $[\Phi_1]$. С порогом $[\Phi_1]$ можно получить n_1 решений ($n_1 < 73$). Затем инженер-конструктор устанавливает второй порог $[\Phi_2]$ для второго по важности критерия (Φ_2) и получает n_2 решений ($n_2 < n_1$). В данном наборе n_2 решений выбирается решение, в котором третий критерий является наилучшим. При изменении порядка приоритетов критериев качества можно получить разные варианты проектирования, например:

- для порядка приоритетов $\{\Phi_1 \mapsto \Phi_2 \mapsto \Phi_3\}$ получено решение S_1 (табл. 5);
- для порядка приоритетов $\{\Phi_2 \mapsto \Phi_1 \mapsto \Phi_3\}$ получено решение S_2 (табл. 6);
- для порядка приоритетов $\{\Phi_3 \mapsto \Phi_2 \mapsto \Phi_1\}$ получено решение S_3 (табл. 7).

3.2.2. Метод главных критериев

При использовании данного метода с учетом каждого из трех критериев получены три решения:

- если Φ_1 является самым важным критерием, получено решение S_4 (табл. 8);
- если Φ_2 является самым важным критерием, получено решение S_5 (табл. 9);
- если Φ_3 является самым важным критерием, получено решение S_6 (табл. 10).

3.3. Анализ и сравнение результатов

В этом разделе представлены результаты, полученные двумя методами проектирования главного привода моечной машины. С помо-

Таблица 5

Решение S_1

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
38	16,24	9,45	618,5	79,74	48,94	43,59	41,43	25	20,37	24,85	18,84	39,067	1,894	92,391

Таблица 6

Решение S_2

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
25	17,22	6,50	592,4	88,58	48,66	44,72	28,76	25	22,76	24,32	15,80	39,224	2,148	90,145

Таблица 7

Решение S_3

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
17	11,71	16,55	702,1	71,24	51,12	50,98	50,23	30	21,80	22,24	24,18	39,039	2,084	99,663

Таблица 8

Решение S_4

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
6	17,74	7,44	636,3	84,58	55,07	48,11	43,65	25	23,67	26,48	14,92	38,962	2,186	93,738

Таблица 9

Решение S_5

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
58	15,12	7,65	627,0	66,69	44,13	50,25	35,90	17	25,18	25,37	10,20	39,011	1,713	93,523

Таблица 10

Решение S_6

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
66	13,47	6,43	532,2	94,98	64,95	49,96	43,06	30	24,60	25,59	17,87	39,603	2,521	83,059

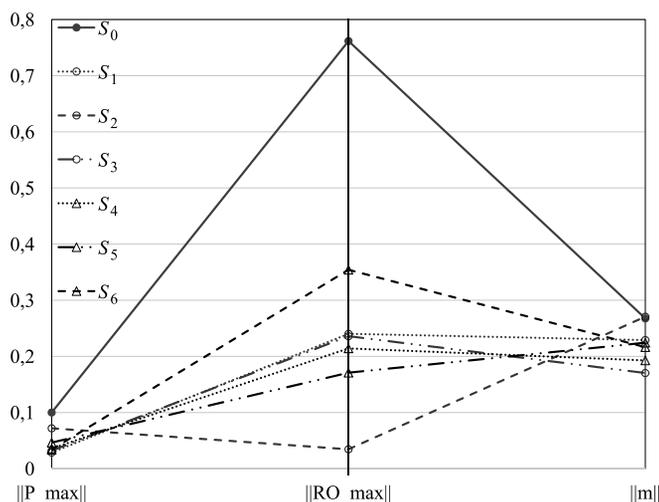


Рис. 9. Визуальное распределение 6 решений с использованием предложенного метода (S_1, \dots, S_6) и традиционного метода (S_0)

стью традиционного метода в ходе итерационного процесса выбирается допустимое решение, соответствующее решению S_0 . Результаты, полученные с помощью предложенного нового подхода, соответствуют вышеуказанными решениями $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$.

Для удобства сравнения решений (рис. 9) критерии качества нормируются по формуле

$$\|\Phi\| = \frac{\Phi - \min \Phi}{\max \Phi - \min \Phi},$$

где реальное значение критерия Φ находится в диапазоне значений $\Phi = [\min \Phi, \max \Phi]$, а критерий $\|\Phi\|$ нормирован и находится в диапазоне: $\|\Phi\| = [0, 1]$

Более подробные параметры для сравнения эффективности методов проектирования приведены в табл. 11.

По сравнению с результатом проектирования традиционным методом (S_0) видно, что:

- большинство решений, полученных с помощью нового подхода, дают лучшие резуль-

таты по всем критериям, кроме решения S_6 (Φ_2 хуже на 0.97 %);

- метод главных критериев позволяет легко выбрать наилучшее значение одного критерия, но не имеет способа контролировать другие критерии. Это в результате приводит к достижению другими критериями нежелательных значений (например, решение S_6). Однако метод последовательных уступок позволяет контролировать пороговые значения критериев, чтобы получить оптимальные согласованные варианты проектирования (S_1, S_2, S_3);
- с помощью предлагаемого подхода процесс проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов становится более гибким и эффективным. Данный подход позволяет инженерам автоматизировать выбор разных решений (S_1, \dots, S_6) в зависимости от конкретных производственных условий.

Решениям S_0, S_1, S_2, S_3 соответствуют различные конфигурации конструкции КШМ, как показано на рис. 10. Один из вариантов S_1, S_2, S_3 будет использоваться для улучшения главного привода моечной машины.

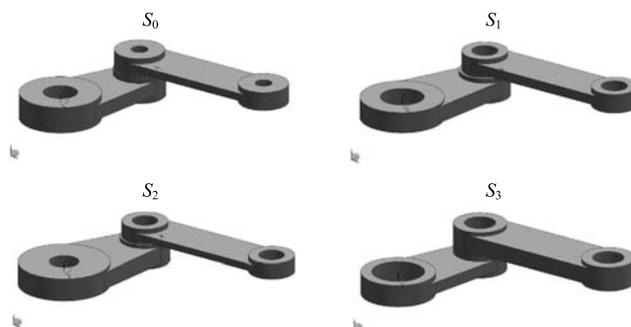


Рис. 10. Конфигурации КШМ:

S_0 — традиционный подход; S_1, S_2, S_3 — новый подход с использованием метода последовательных уступок

Таблица 11

Сравнение эффективности методов проектирования

Критерий	S_0	Метод последовательных уступок			Метод главных критериев		
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
Φ_1 , Вт	40,022	39,067	39,224	39,040	38,962	39,011	39,604
Сравнение Φ_1 , %		-2,39 %	-1,99 %	-2,45 %	-2,65 %	-2,53 %	-1,05 %
Φ_2 , кг	2,497	1,894	2,148	2,084	2,186	1,713	2,521
Сравнение Φ_2 , %		-24,14 %	-13,98 %	-16,53 %	-12,45 %	-31,39 %	+ 0,97 %
Φ_3 , Н	120,825	92,391	90,145	99,663	93,738	93,523	83,059
Сравнение Φ_3 , %		-23,53 %	-25,39 %	-17,51 %	-31,26 %	-22,60 %	-31,26 %

Заключение

В работе предложен новый подход, позволяющий существенно снизить трудоемкость и повысить эффективность процесса проектирования главного привода моечной машины для овощей и фруктов. Для устранения ограничений, присущих традиционным методам проектирования, создана ОММ изделия, включающая две СМ конструкции, условно называемые динамической и прочностной моделями. С использованием ГА на основе построенной математической модели были найдены 73 Парето-оптимальных решения. С учетом производственных условий, используя методы последовательных уступок и главных критериев, из полученных Парето-оптимальных решений были отобраны шесть рациональных решений. Все найденные решения обеспечили существенное улучшение качества моечной машины по сравнению с существующими конструкциями, разработанными с использованием традиционных методов проектирования. Результаты показывают, что предлагаемый подход может быть рекомендован для проектирования машин циклического действия, а также для автоматизации и управления процессом проектирования широкого спектра механических систем в целях повышения качества продукции.

Список литературы

1. **Yildirim Hurmuzlu, Osita D. I. Nwokah.** The Mechanical Systems Design Handbook: Modeling, Measurement, and Control. New York: CRC Press, 2017.
2. **Richard Budynas, Keith Nisbett.** Shigley's Mechanical Engineering Design. United States: McGraw-Hill Education, 2014.
3. **Буй В. Ф., Гаврюшин С. С., Фунг В. Б., Данг Х. М., Прокопов В. С.** Динамический и прочностной анализ системы главного привода при проектировании моечной машины нового типа для овощей и фруктов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. Т. 4, № 100.
4. **Nguyen T. T. Nga, Dang H. Minh, Nguyen T. M. Hanh, Phung V. Binh, Bui V. Phuong, Duc V. N.** Dynamic Analysis and Multi-Objective Optimization of Slider-Crank Mechanism for an Innovative Fruit and Vegetable Washer // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments. 2020. Vol. 43, N. 2. P. 127–143.
5. **Dang H. M., Phung V.B, Nguyen V. D., Tran T. T.** Multi-functional fruit and vegetable washer. Vietnamese Patent Application VN 2019324A2 (In submission).

6. **Яманин А. И., Жуков В. А., Барышников С. О.** Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. № 1. С. 191–200.
7. **Tian Q., Flores P., Lankarani H. M.** A comprehensive survey of the analytical, numerical and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints // Mechanism and Machine Theory. 2018. N. 122. P. 1–57.
8. **Васильев Ф. П.** Методы оптимизации. М.: МЦНМО, 2011.
9. **Панченко Т. В.** Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие. Астрахань: Издательский дом "Астраханский университет", 2007.
10. **Affi Z., Badreddine E. L., Romdhane L.** Advanced mechatronic design using a multi-objective genetic algorithm optimization of a motor-driven four-bar system // Mechatronics. 2007. Vol. 17, N. 9. P. 489–500.
11. **Галемов Р. Т., Масальский Г. Б.** Комбинированный поисковой метод решения обратной задачи кинематики многозвенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 7. С. 464–473.
12. **Брайсон А., Ю-Ши Хо.** Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.
13. **Лебедев Ю. В., Кокарев К. В.** Решение многокритериальных задач в недропользовании методом последовательных уступок // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. сб. докл. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2016. С. 133–136.
14. **Бродецкий Г. Л., Гусев Д. А., Мазунина О. А., Фель А. В.** Возможности метода последовательных уступок при выборе решения по многим критериям // Логистика и управление цепями поставок. 2017. № 3. С. 91–105.
15. **Салеев Д. В.** Анализ методов многокритериальной оптимизации, применяемых при управлении технологическими процессами // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 2. С. 11.
16. **Dang H. M., Bui V. P., Nguyen V. D., Phung V. B.** Dynamic analysis and parametric optimization of an innovative fruit vegetable washer // First National Symposium on Dynamics and Control. Viet Nam. 2019. P. 250–254.
17. **Буй В. Ф., Гаврюшин С. С., Фунг В. Б., Данг Х. М., Прокопов В. С.** Динамический анализ кривошипно-ползунного механизма с пружиной, применяющегося в моечной машине нового типа для овощей и фруктов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. Вып. 2. С. 51–52.
18. **Фаворин М. В.** Моменты инерции тел. Справочник. М.: Машиностроение, 1977.
19. **Буй В. Ф., Гаврюшин С. С., Фунг В. Б., Данг Х. М., Данг В. Т.** Обобщенная математическая модель кривошипно-шатунного механизма с пружиной, применяющегося в моечной машине нового типа для овощей и фруктов // Тез. докл. XXVI международного симпозиума им. А. Г. Горшкова. Кременки. 2020. С. 75–77.
20. **Vlasov V. Z.** Thin-walled elastic beams, office of technical services. US Department of Commerce, Washington, DC, 1961.

V. P. Bui, Postgraduate, e-mail: phuongbv1991@gmail.com, S. S. Gavruishin, Professor, e-mail: gss@bmstu.ru, Bauman Moscow State Technical University, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, V. B. Phung, PhD, e-mail: phungvanbinh@lqdtu.edu.vn, Le Quy Don State Technical University, Hanoi, Viet Nam, H. M. Dang, PhD, e-mail: danghoangminh@iuh.edu.vn, Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh, Viet Nam, V. S. Prokopov, PhD, e-mail: vprokopov@bmstu.ru, Bauman Moscow State Technical University, Research and Software Development Centre "APM", Moscow, Russian Federation

Automation and Management of Design Process of the Main Drive for an Innovative Fruits and Vegetables Washer

A new technique is described, used by the authors to automate the design process of the main drive of a new generation machine intended for industrial washing of fruits and vegetables. To solve the problem of multi-criteria design, the original approach is proposed that uses interconnected mathematical models describing the dynamic behavior, strength reliability and functional characteristics of the machine in a unified information space. The generalized mathematical model includes 12 controlled parameters, 16 functional constraints, and 3 quality criteria. A genetic algorithm was used to find the space of Pareto-optimal solutions. The situational approach was used to select the final rational solution from a set of solutions belonging to the Pareto-optimal domain. The rational design of option the washer found using the proposed approach is compared with the existing ones. The proposed design methodology can be recommended for the design of a wide range of similar mechanical structures.

Keywords: automation, multi-criteria optimization, decision making, generalized mathematical model, slider-crank mechanism, fruits and vegetables washer

DOI: 10.17587/it.27.9-17

References

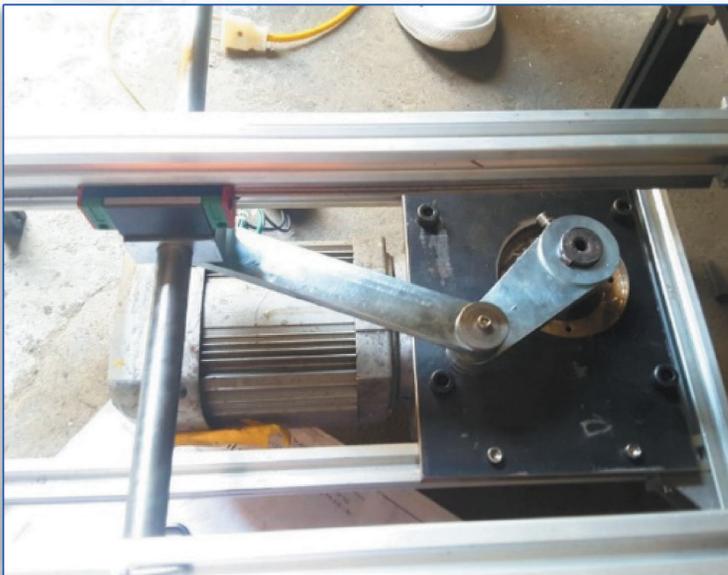
1. Yildirim Hurmuzlu, Osita D. I. Nwokah. The Mechanical Systems Design Handbook: Modeling, Measurement, and Control, New York, CRC Press, 2017.
2. Richard Budynas, Keith Nisbett. Shigley's Mechanical Engineering Design, United States, McGraw-Hill Education, 2014.
3. Bui V. P., Gavruishin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Prokopov V. S. Dynamic and structural analysis of the main drive system in design process of an innovative fruit-vegetable washer, *Inzhenernyi Zhurnal: nauka i innovashii*, 2020, vol. 4, iss. 100 (in Russian).
4. Nguyen T. T. Nga, Dang H. Minh, Nguyen T. M. Hanh, Phung V. Binh, Bui V. Phuong, Duc V. N. Dynamic Analysis and Multi-Objective Optimization of Slider-Crank Mechanism for an Innovative Fruit and Vegetable Washer, *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*, 2020, vol. 43, no. 2, pp. 127–143.
5. Dang H. M., Phung V. B., Nguyen V. D., Tran T. T. Multifunctional fruit and vegetable washer, Vietnamese Patent Application VN 2019324A2 (In submission).
6. Yamanin A. I., Zhukov V. A., Baryshnikov S. O. Power analysis of a piston engine using dynamic models of a crank mechanism, *Vestnik Goshudarstvennogo Universiteta morskovo i rechno flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2018, no. 1, pp. 191–200 (in Russian).
7. Tian Q., Flores P., Lankarani H. M. A comprehensive survey of the analytical, numerical and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints, *Mechanism and Machine Theory*, 2018, no. 122, pp. 1–57.
8. Vasiliev F. P. Method optimization, Moscow, MSNMO, 2011 (in Russian).
9. Panchenko T. V. Genetic algorithm: A Training Manual, Astrakhan, Izdatelski dom "Astrakhanskii universitet", 2007 (in Russian).
10. Affi Z., Badreddine E. L., Romdhane L. Advanced mechatronic design using a multi-objective genetic algorithm optimization of a motor-driven four-bar system, *Mechatronics*, 2007, vol. 17, no. 9, pp. 489–500.
11. Galemov R. T., Masalsky G. B. Combined search method for solving the inverse kinematics problem of a multi-link manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 464–473 (in Russian).
12. Bryson A., Yu-Shi Ho. Applied Optimal Control Theory, Moscow, Mir, 1972 (in Russian).
13. Lebedev Yu. V., Kokarev K. V. The solution of multicriteria problems in subsoil use by the method of successive concessions, *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnik i nerudnik mestorozhdenii. Sb. Dokl. Konf. Ekaterinburg*, UGGU, 2016, pp. 133–136 (in Russian).
14. Brodetsky G. L., Gusev D. A., Mazunina O. A., Fel A. V. The possibilities of the method of successive concessions when choosing a solution according to many criteria, *Logistika i upravlenye sepyami postavok*, 2017, no. 3, pp. 91–105 (in Russian).
15. Saleev D. V. Analysis of multicriteria optimization methods used in process control, *Modelirovaniye, optimizatsii i informatsionnye tekhnologii*, 2013, no. 2, pp. 11 (in Russian).
16. Dang H. M., Bui V. P., Nguyen V. D., Phung V. B. Dynamic analysis and parametric optimization of an innovative fruit vegetable washer, *First National Symposium on Dynamics and Control*, Viet Nam, 2019, pp. 250–254.
17. Bui V. P., Gavruishin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Prokopov V. S. Dynamic analysis of slider-crank mechanism connected spring system and application for an innovative fruit and vegetable washer, *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovashii*, 2020, no. 2, pp. 51–52 (in Russian).
18. Favorin M. V. Moments of inertia tel. Directory, Moscow, Mashinostroeniye, 1977 (in Russian).
19. Bui V. P., Gavruishin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Dang V. T. Generalized mathematical model of a crank mechanism with a spring used in a new type washing machine for fruits and vegetables, *Tez. Dokl. XXVI mezhdunarodnogo simposiuma im. A. G. Gorshkova. Kremenki*, 2020, pp. 75–77 (in Russian).
20. Vlasov VZ. Thin-walled elastic beams, office of technical services, US Department of Commerce, Washington, DC, 1961.

Рисунок к статье В. Ф. Буя, С. С. Гаврюшина, В. Б. Фунга,
Х. М. Данга, В. С. Прокопова

«АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ПРИВОДА МОЕЧНОЙ МАШИНЫ НОВОГО ТИПА ДЛЯ ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ»



а)



б)

Рис. 2. Моечная машина для овощей и фруктов (а) и главный привод (б)