

УДК 621.313 – 624.9.04

Кузнецов Ю.Н., д.т.н., Степаненко А.А., Хамуйела Ж.А. Герра, к.т.н.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

МНОГОУРОВНЕВЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МАЛОГАБАРИТНЫХ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С КОМПЬЮТЕРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассматривается возможность использования многоуровневого морфологического синтеза для создания малогабаритных фрезерных станков с компьютерным управлением. Приведены примеры реализации конструкций станков, полученных в результате трехуровневого синтеза.

Многоуровневый морфологический синтез, матрицы вариантов, малогабаритные фрезерные станки с компьютерным управлением.

Введение

Для эффективной разработки любых технических систем (ТС) на разных уровнях важно ориентироваться во многих ее характеристиках. По мере эволюции ТС, некоторые из них приобретают устойчивый характер, достигнув пределов своего развития, а другие стремительно совершенствуются, в результате чего система наполняется рядом новых характеристик. Эти характеристики выражают степень совершенства ТС и формируют критерии, которые ее характеризуют. Условием прогрессивного развития ТС является улучшение одних критериев без ухудшения других. Эффективным методом достижения данного условия является метод многоуровневого морфологического синтеза, который позволяет комплексно подойти к процессу создания или совершенствования конкретной технической системы.

Постановка задачи

Целью работы является, при помощи многоуровневого морфологического синтеза, сужая задачу, на примере малогабаритных фрезерных станков, выявить рациональные их конструкции.

Сложный процесс оптимального проектирования станка как сложной ТС можно представить в виде итерационного процесса последовательного решения многовариантных (многоуровневых, многоциклических, многокритериальных, многоэкстремальных) задач синтеза, анализа и испытаний (рис. 1) [4].

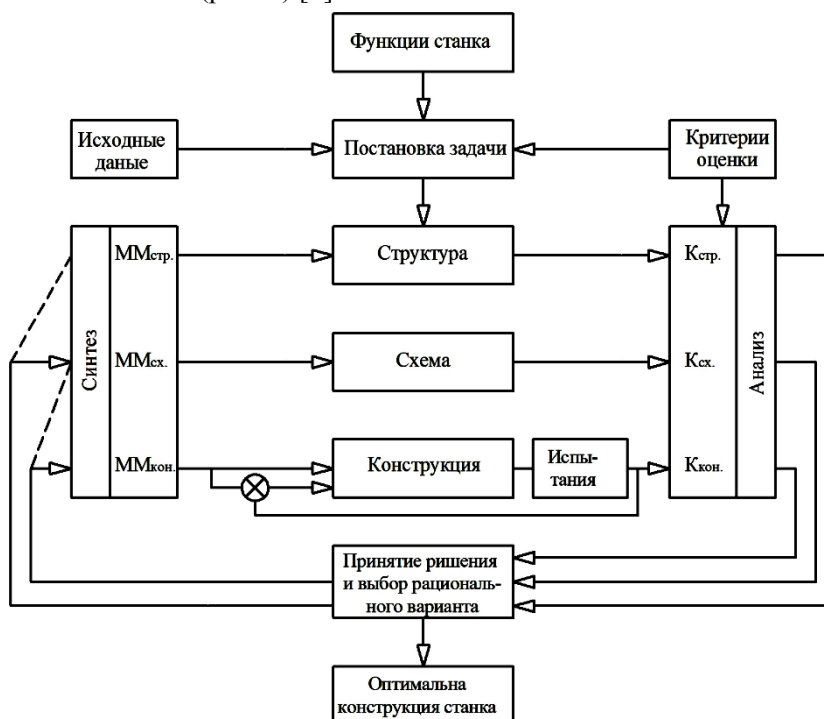


Рис. 1. Алгоритм оптимального проектирования малогабаритного станка

При этом на каждом уровне, начиная от идей и заканчивая конструкцией, множество вариантов решения может быть представлено в виде морфологических моделей с последовательной их конкретизацией.

На каждом уровне решение представляет собой многокритериальную задачу, причем сложность решения состоит в том, что отсутствует стратегия решения, одновременно лучшая (рациональная, а при параметрическом синтезе оптимальная) по каждому из критериев. В соответствии с теорией исследования операций [7,8] решение должно содержать методы приведения частных критериев (показателей) к однородному виду, определения их относительной важности (весовых коэффициентов) и формирования обобщенного критерия.

Задачи многоуровневого морфологического синтеза и анализа [3] могут последовательно решаться с отбором лучших решений по качественным и количественным показателям по обобщенному (комплексному) критерию вида:

$$K = \sum \alpha_i \frac{K_i}{[K_i]} \rightarrow \min (\max), \quad (1)$$

где α_i – весовые коэффициенты, принимающие большие значения в соответствии с важностью критериев и определяемые методами ранжирования [6], построения матриц парных сравнений (расстановки приоритетов) на основе интуиции специалиста и экспертных "контрольных оценок" по предпочтительности с составлением системы равенств и неравенств для целевой функции с неизвестными α_i ; K_i – i -тый частный показатель качества; $[K_i]$ – максимально достигаемое значение показателя [2,12].

При выборе лучшего варианта решения из множества перебираемых m станков, характеризуемых n важными свойствами, составляется матрица:

$$K = \begin{pmatrix} K_i^{(1)} & \dots & K_k^{(1)} & \dots & K_n^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_i^{(i)} & \dots & K_k^{(i)} & \dots & K_n^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_i^{(m)} & \dots & K_k^{(m)} & \dots & K_n^{(m)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

где элемент (частный показатель) $K_i^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$; $k = 1, 2, \dots, n$) представляет некоторое число, характеризующее качество i -того станка с точки зрения K -ого свойства. При этом при сравнении i -того и j -того станков с точки зрения K -ого показателя качества (частного критерия) $K_k^i = K_k^j$, то варианты считаются равноценными. Устанавливаемое отношение предпочтительности (равноценности) является транзитивным.

Таким образом, всегда можно перебираемые варианты станков ($i = 1, 2, \dots, m$) расположить в порядке убывания (невозрастания) их предпочтительности [11].

На уровнях конструктивного синтеза станков решение о возможности использования обобщенного критерия (2) с частными количественными и качественными показателями (критериями) сводится по существу к проверке условия, при котором изменения какого-либо частного показателя качества всех станков на одну и ту же величину не изменяют порядок предпочтений [10].

В тех случаях, когда лучшему критерию соответствуют меньшие натуральные значения показателя K_i , при приведении к однородному виду используют прием:

$$K_i^* = 1 - K_i \quad (3)$$

Если показатели выражаются в бальной системе, то показатель качества представляется как:

$$K_i = \frac{K_i - K_{i \min}}{K_{i \max} - K_{i \min}}, \quad (4)$$

где K_i – число баллов i -того частного показателя; $K_{i\max}$ и $K_{i\min}$ – соответственно максимальное и минимальное число баллов в множестве перебираемых вариантов станков.

Решение задачи

Для малогабаритных фрезерных станков процесс синтеза будет сужен до трех основных этапов: структурного синтеза, схемного синтеза, а так же синтеза конструкций. На каждом этапе создаются морфологические матрицы с набором характеристик объекта, из которых при помощи группы критериев отбираются лучшие варианты. По мере приближения к оптимальной конструкции количество критериев растет, что позволяет конкретизировать задачу синтеза.

Формируется ряд критериев отбора лучших вариантов для каждого конкретного этапа синтеза. Критерии делятся на четыре группы: функциональные, технологические, экономические и антропогенные, которые впоследствии формируют комплексный критерий оценки [5].

На этапе структурного синтеза создана матрица каркасных несущих систем [9], которая включает в себя основание, каркас и траверсу (рис. 2).

Общее количество возможных структур, исходя из данной матрицы, рассчитывается по формуле (5).

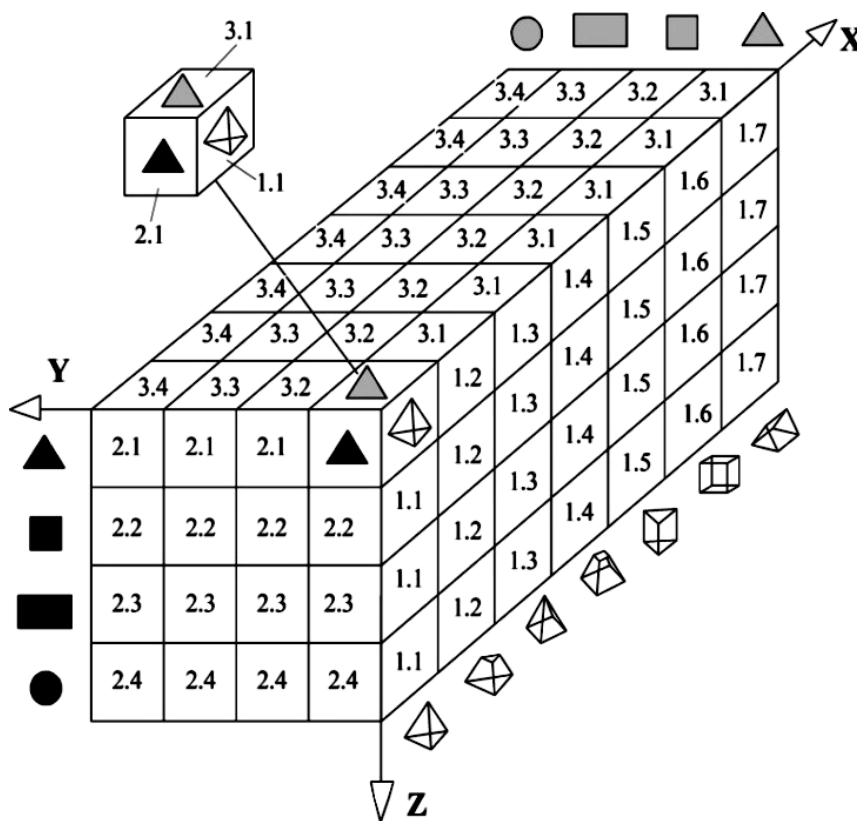


Рис. 2. Морфологическая матрица каркасных несущих систем (структур)

$$N = \prod_{i=1}^n K_i \quad (5)$$

где K_i – количество альтернатив i -го морфологического признака функции, n – количество признаков.

В процессе синтеза возникает необходимость выявить и отсеять несовместимые сочетания морфологических признаков [1]. В процессе перебора вариантов на совместимость формируется матрица совместимости с выделением несовместимых вариантов (табл. 1):

Фрагмент матрицы совместимости с выделением несовместимых вариантов

1	-	2	2	-	3
1.1	-	2.2	2.1	-	3.2
1.1	-	2.3	2.1	-	3.3
1.2	-	2.2	2.1	-	3.4
1.2	-	2.3	2.2	-	3.1
1.3	-	2.1	2.2	-	3.3
1.3	-	2.3	2.2	-	3.4
1.4	-	2.1	2.3	-	3.1
1.4	-	2.3	2.3	-	3.4
1.5	-	2.2	2.4	-	3.1
1.5	-	2.3	2.4	-	3.2
1.6	-	2.1	2.4	-	3.3
1.6	-	2.3			
1.7	-	2.1			
1.7	-	2.4			

Вычислив, что всего несовместимых вариантов $N_{НС} = 21$, соответственно находятся совместимые: $N_C = N - N_{НС} = 63 - 21 = 42$

Для сравнения по частным и комплексному критериям из числа совместимых вариантов отобраны геометрические фигуры, наиболее подходящие для использования в качестве несущей системы станка.

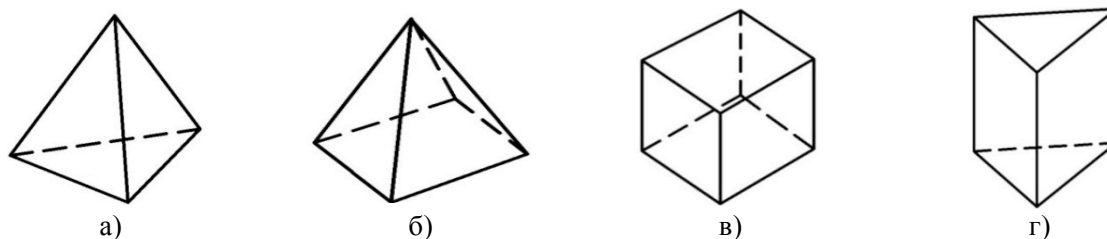


Рис. 3. Пространственные геометрические фигуры, выбранные для использования в качестве несущей системы станка:
а) трехгранная пирамида; б) четырехгранная пирамида; в) куб; г) призма

При выборе лучшего варианта на первых этапах проектирования удобно использовать метод расстановки приоритетов, который можно использовать для нахождения весовых коэффициентов частных критериев для формирования комплексного критерия качества.

На этапе структурного синтеза (отбор несущей системы) выбираем частные критерии и их весовые коэффициенты:

- 1) удобство обслуживания ($K_{уо}$) – α_1 ;
- 2) внутренний объем ($K_{во}$) – α_2 ;
- 3) металлоемкость каркаса ($K_{мк}$) – α_3 ;
- 4) устойчивость несущей системы ($K_{ст}$) – α_4 .

При расстановке приоритета весовых коэффициентов необходимо провести их попарное сравнение в виде систем сравнений и построить граф турнира вариантов. Общее количество парных сравнений для m коэффициентов:

$$M = \frac{m(m-1)}{2}. \quad (6)$$

В данном случае $m = 4$, поскольку $\alpha_1 \dots \alpha_4$, соответственно число сравнений и решений будет равно 6-ти. Соответственно необходимо иметь 6 сравнений (7).

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_1 < \alpha_2 \\ \alpha_1 < \alpha_3 \\ \alpha_1 = \alpha_4 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \alpha_2 < \alpha_3 \\ \alpha_2 < \alpha_4 \end{array} \right| \left| \alpha_3 > \alpha_4 \right| \quad (7)$$

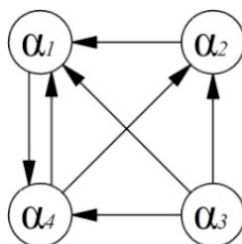


Рис. 4. Граф турнира весовых коэффициентов

Для определения приоритета весовых коэффициентов необходимо, пользуясь условием $\alpha_i > \alpha_j \rightarrow 2$, $\alpha_i = \alpha_j \rightarrow 1$, $\alpha_i < \alpha_j \rightarrow 0$, заполнить квадратичную таблицу смежности (табл. 2) с дальнейшей обработкой (при одной итерации).

Таблица 2

i \ j	α_1	α_2	α_3	α_4	$\Sigma \alpha_{ij}$	$P_i = (1)$	Приоритет
α_1	1	0	0	1	2	2/16	IV
α_2	2	1	0	0	3	3/16	III
α_3	2	2	1	2	7	7/16	I
α_4	1	2	0	1	4	4/16	II
Σ	$m = 4 (\alpha_1 \dots \alpha_4) \Rightarrow \alpha_1 \cdot \alpha_1 = m \cdot m = m^2 = 4^2$				$\Rightarrow 16$	1	

Из табл. 2 видно, что наиболее приоритетным коэффициентом на данном этапе синтеза является коэффициент металлоемкости каркаса ($K_{МК}$), имеющий весовой коэффициент – $\alpha_3 = 7/16$. Расставим коэффициенты по приоритету для проведения дальнейшего синтеза:

$$\alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_2 > \alpha_1. \quad (8)$$

Для вычисления комплексного критерия на данном этапе присвоим относительные значения в десятичном виде:

$$\begin{array}{l} \alpha_3 \longrightarrow 4 \\ \alpha_4 \longrightarrow 3 \\ \alpha_2 \longrightarrow 2 \\ \alpha_1 \longrightarrow 1 \end{array} \left| \begin{array}{l} \alpha_3 = 4/10 \\ \alpha_4 = 3/10 \\ \alpha_2 = 2/10 \\ \alpha_1 = 1/10 \end{array} \right| \quad (9)$$

Комплексный критерий оценки качества при проведении синтеза для каждого компоновки рассчитывается по формуле:

$$K_{КОМ} = \sum_{i=1}^{n=4} K_i \cdot \alpha_i = K_{ЗО} \cdot \alpha_1 + K_{ВО} \cdot \alpha_2 + K_{МК} \cdot \alpha_3 + K_{СН} \cdot \alpha_4; \quad (10)$$

$$K_{КОМ} = K_{ЗО} \cdot 0.1 + K_{ВО} \cdot 0.2 + K_{МК} \cdot 0.4 + K_{СН} \cdot 0.3. \quad (11)$$

Далее была произведена формальная бальная оценка выбранных каркасов и вычислены комплексные критерии для каждого варианта. Таким образом, самую высокую оценку получила четырехгранная пирамида (3.46 б.), на втором месте куб (0.65), далее трехгранная пирамида (0.63) и последняя – призма (0.49).

На этапе схемного синтеза из морфологической таблицы схем (табл. 3) отобрано ряд вариантов преобразования движения для полученных каркасов, среди которых имеются компоновки, как с механизмами параллельной структуры (МПС), так и без них.

Морфологическая таблица схем малогабаритных станков

1. Несущая система	2. Метод преобразования рабочих движений	3. Координаты рабочих движений	
		3.1. Линейные	4. Вращательные
1.1 Трехгранная пирамидальная	2.1 Без МПС	3.1 X	4.1 A
1.2 Четырехгранная пирамидальная	2.2 Смена координат опорных шарниров (штанги постоянной длины)	3.2 Y	4.2 B
1.3 Призматическая	2.3 Смена длины штанг	3.3 Z	4.3 C
1.4 Кубическая	2.4 Принудительное вращение шарнира	3.4 X, Y	4.4 A, B
	2.5 Смена угла между элементами кинематической цепи	3.5 X, Z	4.5 A, C
	2.6 Комбинированный	3.6 Y, Z	4.6 B, C
		3.7 X, Y, Z	4.7 A, B, C

Общее количество возможных вариантов, исходя из табл.3, равняется:

$$N = 4 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 7 = 1176 . \quad (12)$$

При помощи критериев по аналогии со структурным синтезом отобраны рациональные варианты преобразования движения на базе полученных каркасов.

Критерии отбора лучших вариантов на этапе схемного синтеза:

- 1) степень подвижности исполнительного органа (ИО)/заготовки (Ксп);
- 2) продуктивность (Кпр);
- 3) внутренний объем (Кво);
- 4) сложность управления (Ксу);
- 5) технологические возможности (Ктв);
- 6) устойчивость несущей системы (Кст);
- 7) металлоемкость (Кмт);
- 8) удобство обслуживания (Куо).

По комплексному критерию произведена бальная оценка вариантов, согласно которой наиболее рациональными являются компоновки на основе четырехгранного каркаса с моторшпинделем при вершине и координатным суппортом в основании, а также на основе трехгранной пирамиды с МПС и штангами постоянной длины (рис. 5).

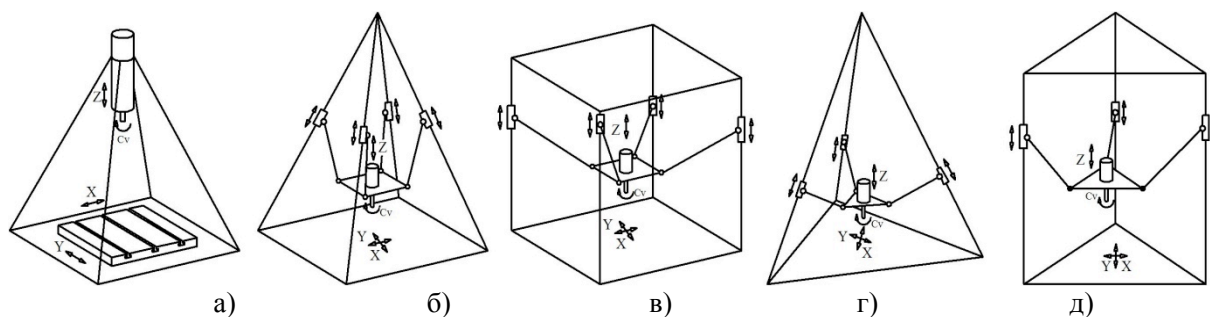


Рис. 5. Компоновки станков на основе отобранных каркасов:
 а) четырехгранная пирамида; б) четырехгранная пирамида с МПС;
 в) куб с МПС; г) трехгранная пирамида с МПС; д) трехгранная призма с МПС

На последнем этапе синтеза при помощи морфологической таблицы конструктивных элементов (табл. 4) разработаны конструкции станков на основе четырехгранной и трехгранной пирамид, а также трехгранной призмы.

Таблица 4

Морфологическая таблица конструкций малогабаритных станков с использованием модульного принципа

1. Привод главного движения	Координатные блоки рабочих движений (линейных)		4. Координаты вращательных движений (вокруг X, Y, Z)	5. Тип штанг МПС	6. Основание	7. Несущая система	8. Траверса
	2. Координата Z	3. Координаты X, Y					
1.1	2.1	3.1	4.1		6.1	7.1	8.1
1.2	2.2	3.2	4.2	5.1	6.2	7.2	8.2
1.3	2.3	3.3	4.3	5.2	6.3	7.3	8.3
1.4	2.4	3.4	4.4	5.3	6.4	7.4	8.4
	2.5						

Примечание – по условию конфиденциальности альтернативы признаков не раскрыты.

Общее количество возможных вариантов, исходя из табл. 4, составляет:

$$N = 4 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 = 61440 \quad (14)$$

При помощи критериев отбора по аналогии со структурным и схемным синтезом отобраны варианты конструкций, наиболее подходящие для проектирования станков.

Критерии отбора лучших вариантов на этапе синтеза конструкций:

- 1) точность (Ктч);
- 2) жесткость (Кжс);
- 3) объем рабочей зоны (Крз);
- 4) технологическая гибкость (Ктп);
- 5) надежность (Кнд);
- 6) устойчивость несущей системы (Кст);
- 7) трудоемкость изготовления (Кти);
- 8) вес (Кв);
- 9) металлоемкость (Кмт);
- 10) эргономичность (Кэр);
- 11) безопасность (Кбз);
- 12) эстетичность (Кэс).

Результаты синтеза конструкций станков по комплексному критерию представлены на рис. 6.

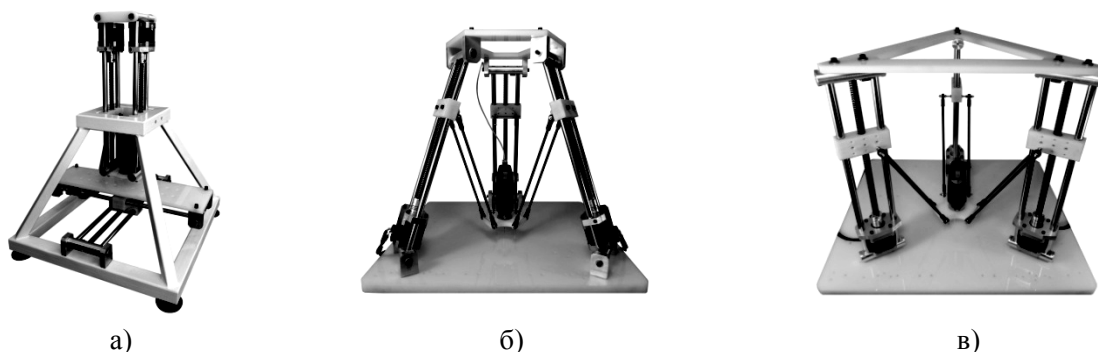


Рис. 6. Изготовленные конструкции действующих малогабаритных станков с компьютерным управлением:

а) четырехгранная пирамида; б) трехгранная пирамида с МПС; в) трехгранная призма с МПС

Выводы

Проведен многоуровневый морфологический синтез на примере малогабаритных фрезерных станков с компьютерным управлением. Рассмотрены три основных этапа синтеза: структурные, схемный и конструктивный. Для каждого этапа представлены морфологические модели, морфологические множества в виде таблиц и матриц, которые содержат в себе набор характеристик станков. При помощи сформированных критериев из каждой морфологической модели выбраны рациональные варианты их конструкций. Полученные конструкции станков реализованы и, в результате экспериментальных исследований, подтвердили свою эффективность и конкурентоспособность.

1. Блюмберг В.А., Глущенко В.Ф. Какое решение лучше. Метод расстановки приоритетов. – Л.: Лениздат, 1982. – 160с.

2. Каневский Г.Н. К вопросу весовых коэффициентов при оптимальном проектировании узлов машин. – В кн.; Автоматизация проектно – конструкторских и технологических работ в машиностроении. – Тула: 1979. – с. 68-72.

3. Кузнецов Ю.Н., Герра Ж.А. Хамуйела Цанговые патроны двойного зажима: монография. – К.: ООО «ГНОЗИС», 2013. – 401с.

4. Кузнецов Ю.Н., Новоселов Ю.К., Луцив И.В. Теория технических систем: учебник. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – 252с.

5. Литвак В.Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа. – М.: Радио и связь, 1982. – 184с.

6. Моисеева Н.К. Выбор технических решений при создании новых изделий. – М.: Машиностроение, 1980. – 272с.

7. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488с.

8. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1971. – 316с.

9. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений: Пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 208с.

10. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. – М.: ВНИИПИ, 1989. – 184с.

11. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 208с.

12. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 256с.