

УДК 681.3

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-36-43

*А. Н. Шилин, И. А. Коптелова, Л. А. Коновалова***МЕТОДИКА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРИБОРОВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА И АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ****Волгоградский государственный технический университет**

eltech@vstu.ru, shilina@yandex.ru, mila27121989@mail.ru

Автор, ответственный за переписку:

Людмила Александровна Коновалова, mila27121989@mail.ru

Проектирование информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) – сложная задача, требующая выбора компонентов (датчиков, фильтров, исполнительных механизмов) из множества доступных технологий. Особенно актуально это для интеллектуальных электромеханических систем (SEMS), где необходимо учитывать совместимость и приоритет параметров. Существующие методы, такие как морфологический синтез на основе анализа иерархий, формализуют выбор элементов. Однако их недостаток – необоснованность сложных матричных операций, что может привести к неоптимальным решениям. Цель исследования: для достижения цели, заключающейся в оптимизации выбора элементов ИИУС необходимо провести сравнительный анализ различных методик матричной обработки экспертных оценок и выбрать оптимальный вариант. Результаты: проведено исследование матричных операций морфологического синтеза и выявлено, что сложные матричные операции выполняют функцию усреднения экспертных оценок. Было предложено: решить операцию усреднения оценок с помощью более простых операций, что позволяет уменьшить трудоемкость синтеза ручным способом.

Ключевые слова: информационно-измерительные и управляющие системы, SEMS, эвристические методы проектирования, метод анализа иерархий, парные сравнения, матрица смежности, комплексные приоритеты

*A. N. Shilin, I. A. Koptelova, L. A. Konvalova***THE METHODOLOGY OF MORPHOLOGICAL SYNTHESIS
OF DEVICES BASED ON THE METHOD AND ANALYSIS OF HIERARCHIES****Volgograd State Technical University**

Design of information measurement and control systems (IIAS) – a complex task requiring the selection of components (sensors, filters, actuators) from a variety of available technologies. This is especially true for intelligent electromechanical systems (SEMS), where compatibility and parameter priority must be taken into account. Existing methods, such as morphological synthesis based on hierarchy analysis, formalize the selection of elements. However, their disadvantage is the unreasonableness of complex matrix operations, which can lead to suboptimal solutions.

The purpose of the study: in order to achieve the goal of optimizing the selection of IISS elements, it is necessary to conduct a comparative analysis of various methods of matrix processing of expert assessments and choose the best option. Results: A study of matrix operations of morphological synthesis was conducted and it was revealed that complex matrix operations perform the function of averaging expert estimates. It was proposed to solve the averaging of estimates using simpler operations, which reduces the complexity of manual synthesis.

Keywords: information-measuring and control systems, SEMS, heuristic design methods, hierarchy analysis method, pair comparisons, adjacency matrix, complex priorities

Введение

В связи с масштабной цифровизацией промышленных областей актуальность применения информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) быстро возрастает. Эта тенденция обусловлена множеством факторов, среди которых можно выделить необходимость повышения эффективности производственных процессов, улучшение качества продукции, а также адаптацию к быстро меняющимся условиям рынка. Современные требования к производству требуют от предприятий гибкости,

способности к быстрой реакции на внешние изменения и возможности интеграции новых технологий, что невозможно без внедрения высокотехнологичных систем управления. ИИУС стали ключевым инструментом для достижения этих целей, так как они позволяют осуществлять мониторинг и анализ производственных процессов в реальном времени. Проектирование ИИУС является непростой задачей, так как выбор основных элементов системы должен быть обоснованным. Компонентов ИИУС множество. Это датчики, усилители, фильтры, уст-

ройства обработки информации, исполнительные механизмы, устройства позиционирования измерительных преобразователей. Проблема выбора связана с тем, что на сегодняшний день существует большое разнообразие вариантов основных элементов системы. Сложность заключается в выборе одного варианта из множества, который бы удовлетворял сразу нескольким критериям с условием их приоритетности.

Особенно актуальна проблема подбора элементов для интеллектуальных электромеханических систем SEMS (Smart Electro Mechanical Systems), которые в своем составе содержат механические и электромеханические устройства, подсистемы. Вариантов датчиков (фотоприемников) значительно больше, чем количество вариантов электромеханических систем. Но необходимо учитывать совместимость элементов ИИУС и электромеханических устройств при проектировании SEMS. Таким образом, это является довольно сложной и трудоемкой задачей.

Совсем недавно выбор решения в различных сферах жизни рассматривался как процесс, имеющий ярко выраженный субъективный характер, зависящий от личного опыта, знаний и интуиции специалистов. В этом контексте принятию решения часто предшествовал длительный анализ информации, который, как правило, был ограничен доступными данными и временем его обработки. Однако в условиях быстрого изменения внешней среды и усложнения практических задач, строгость и точность этого подхода начинают вызывать все больше опасений. Рынки становятся непредсказуемыми, информационные потоки увеличиваются в объемах, а сами задачи требуют комплексного подхода и быстрой реакции. В связи с этим на передний план выходит необходимость применения современных научных методов аналитики, которые способны справляться с большими объемами данных и обеспечивать функциональность, необходимую для объективного анализа ситуации. Существующие методы больше не могут финансировать сложные или многогранные условия, и постепенно осознается, что принятые решения могут быть улучшены путем использования объективных, основанных на данных, подходов. В результате этой эволюции на свет начали появляться специальные информационно-аналитические технологии, которые опираются на новые математические методы, обладающие высокой вычис-

лительной мощностью и способные обрабатывать большие объемы информации с высокой степенью детализации.

Так как при выборе определенного компонента для конкретной задачи необходимо учитывать приоритетный список технических характеристик, который имеет каждый элемент ИИУС, то мы имеем дело с многокритериальной задачей принятия решения. Многокритериальные задачи представляют собой сложный класс задач интеллектуальной деятельности человека. Наличие нескольких критериев усиливает нагрузку на ограниченную естественными пределами оперативную память человека. А это, в свою очередь, делает задачу более неопределенной, требующей нестандартного мышления. Сложность таких задач состоит в том, что, как правило, не существует варианта, который бы был лучшим сразу по всем параметрам. Поэтому выбор оптимального решения непосредственно связан с решением проблемы замещения (компенсации). Это проблема сопоставления по предпочтению потерь по одним критериям с выигрышами по другим.

В многокритериальных методах принятия решения одно из ключевых понятий, на котором базируются различные подходы, это относительная (сравнительная) важность (значимость) критериев. Первоначально для оценки критериев использовались простые высказывания, такие как «один критерий важнее другого» и «критерии равноважны». Эти утверждения, хотя и предоставляли некоторую основу для анализа, были излишне упрощенными и не учитывали множество факторов, которые могли влиять на выбор. Поэтому необходимостью стало более детальное определение, которое могло бы выразить степень важности одного критерия относительно другого. В процессе дальнейшего развития теории было предложено использовать более количественный подход, позволяющий сообщить о важности критериев в числовом выражении. Таким образом, возникло понятие «один критерий важнее другого во столько-то раз», которое дало возможность более точно провести сравнительный анализ. Эта концепция значительно расширила горизонты многокритериального анализа, предоставив более гибкие инструменты для работы с комплексными и многогранными задачами, и разработали теорию «количественной важности». Основы теории важности критериев находят свое применение в разнообразных практи-

ческих задачах, например, при выборе основных и наиболее значимых элементов ИИУС. Интеграция количественной оценки важности критериев позволяет принимать более обоснованные и взвешенные решения на основе объективных данных. Практическое применение данной теории позволяет использовать имеющуюся информацию о предпочтениях, что, в свою очередь, способствует более эффективному отбору решений.

Для проектирования сложных технических систем на практике широко применяют эвристические методы. Эвристические методы решения задач организуют и направляют творческий поиск, повышая эффективность, целенаправленность и оперативность проектирования. Для разработки эвристических методов проектирования необходимо обобщение большого числа решенных задач в различных областях техники. Поэтому наибольший эффект при использовании эвристических методов может быть получен специалистами, которые обладают большим опытом и высоким творческим потенциалом.

Из проведенного анализа существующих методов проектирования технических систем можно сделать следующие выводы [1]. Все эвристические методы проектирования делятся на два основных класса: трансформационные и морфологические методы.

Трансформационные методы решения базируются на ряде принципов. На стадии анализа формируется план решения задачи синтеза. Реализация его осуществляется с помощью различных преобразований (трансформаций) прототипа с помощью эвристических приемов. Весь цикл решения задачи (анализ–синтез) может многократно повторяться с различными прототипами и эвристическими приемами. Но нужно отметить, что трансформационные методы не всегда продуктивны и при многократном повторении цикла. Чисто эвристические операции получения из прототипа нового технического решения (ТР) могут быть выполнены только человеком, так как ЭВМ не может предугадывать, фантазировать, строить гипотезы и не обладает интуицией. Трансформационные методы не поддаются автоматизации, потому что не формализованы. Это привело к возникновению морфологических методов.

Морфологические методы базируются, как правило, на комбинаторном принципе поиска решений. Это позволяет найти наибольшее число всех возможных вариантов решения по-

ставленной проблемы путем комбинирования основных структурных элементов системы. Суть метода состоит в следующем. В системе выделяют несколько характерных признаков, где каждый характеризует какой-то параметр или характеристику системы, от которых зависит решение проблемы. Каждому выделенному признаку соответствует список его различных вариантов-альтернатив. Признаки с альтернативами находятся в таблице – в «морфологическом ящике». Новые варианты решения можно выявить, перебирая всевозможные сочетания этих альтернатив.

Морфологическое множество решений – описание всех потенциально возможных (мыслимых) решений данной задачи можно получить на стадии морфологического анализа. Морфологический подход позволяет построить описание целого класса систем на базе известных ТР, а следовательно, и получить множество решений.

Морфологическое множество (ММ) представляет собой мощный инструмент для многомерного анализа и классификации систем, что позволяет исследователям выявлять и структурировать различные параметры и характеристики объектов изучения. Основой этого метода является морфологическая таблица (МТ), в которой каждая строка соответствует определенному исследуемому объекту, классифицируемому по значимым признакам. Это означает, что МТ служит основой для многомерного систематического подхода, который не только упорядочивает, но и расширяет представление о возможностях, предлагаемых различными значениями этих признаков. Важной особенностью морфологической таблицы является то, что в ней фиксируются не только известные, но и все допустимые значения признаков, что позволяет учесть множество альтернативных аспектов. Эти аспекты могут генерировать новые и неожиданные вариации технологических решений (ТР), которые ранее могли оставаться незамеченными. Тем не менее, из-за большого количества включенных параметров, некоторые варианты могут оказаться малополезными или недостижимыми с практической точки зрения. Таким образом, морфологические таблицы обладают определенной избыточностью, которую необходимо учитывать при дальнейшем анализе. На следующем этапе морфологического синтеза исследователи начинают отбор оптимальных ТР из полученного множества. Это

требует применения методов, которые могли бы рационализировать процесс выбора наиболее перспективных вариантов. Методы морфологического синтеза классифицируются как эвристические, так как они опираются на стратегии сокращения объема решения задач путем использования ограниченного перебора возможных вариантов. Эвристичность данного подхода заключается в том, что он позволяет находить необходимые решения значительно быстрее, чем это было возможно при полном переборе всех возможных за число шагов комбинаций параметров. Например, с помощью МТ были получены варианты ТР оптико-электронных измерительных приборов с числом $2 \cdot 10^{27}$ [1]. При этом количество признаков, учитываемых в таблице, превышало 50, а диапазон значений колебался от 2–10. Это подчеркивает потенциал морфологического анализа как способа генерации широкого спектра идей и концепций, при этом остается актуальным вопрос оптимизации выбора действительно полезных решений из полученного множества.

Морфологический синтез систем с постоянной структурой должен выполняться в следующей последовательности: точная формулировка поставленной проблемы; выделение функционально законченных блоков системы; сопоставление каждому выделенному блоку значений его реализации; сведение их в МТ; выбор из ММ оптимального набора блоков, который обеспечивает лучшие значения эксплуатационных характеристик системы.

Методику морфологического синтеза рассмотрим на примере проектирования оптико-электронной системы (ОЭС) управления технологическим процессом производства крупногабаритных деталей в нагретом состоянии [5–6]. Подробно рассмотрим процесс выбора фотоприемников, так как они отличаются большим количеством вариантов реализации и обладают множеством параметров и характеристик [7].

Для морфологического синтеза ОЭС выбраны основные характеристики фотоприемников: k_1 – температура приемника, k_2 – постоянная времени, k_3 – напряжение питания, k_4 – длинноволновая граница, k_5 – темновое сопротивление, k_6 – темновой ток, k_7 – удельная обнаружительная способность.

Рассмотрим правила построения квадратной матрицы смежности (табл. 1). В столбцах и строках указывается номер варианта (характеристики, параметры), а на пересечении – коэффициенты (1,5; 1,0; 0,5), показывающие какой вариант предпочтителен. Для расчета β_j каждая строка (k_1 – k_7) в матрице умножается на

вектор-столбец $\sum_{i=1}^n k_i$. Нормированные значения,

то есть относительные значения β'_j , получаются делением β_j на $\sum_{i=1}^m \beta_j$. Относительные

значения β'_j представляют собой список приоритетов параметров выбираемых элементов. Таким образом, мы получили коэффициенты значимости критериев k_1 – k_7 .

Таблица 1

Матрица смежности критериев фотоприемников

Индекс критерия	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	$\sum_{i=1}^n k_i$	β_j	β'_j
k_1	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	9,0	59,0	0,187
k_2	0,5	1,0	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	8,0	50,5	0,160
k_3	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	7,0	43,0	0,136
k_4	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	10,0	68,5	0,217
k_5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	4,0	26,5	0,084
k_6	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	0,5	5,0	31,0	0,098
k_7	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	6,0	36,5	0,115
Всего	–	–	–	–	–	–	–	–	315,0	1

В рамках современных подходов к проектированию оптико-электронных приборов (ОЭП) методический анализ фотоприемников становится ключевым аспектом, так как позволяет

определить оптимальный вариант устройства, который наиболее эффективно будет выполнять поставленные задачи. Рассматриваемая методика ранжирования позволяет не только

оценивать различные типы фотоприемников, но и проводит их сравнительный анализ по ряду параметров, таких как спектральная чувствительность, временные характеристики, уровень шума, устойчивость к внешним воздействиям и другие критически важные элементы. Каждый фотоприемник обладает своими уникальными свойствами, что предопределяет его эффективность в определенных диапазонах волн. Например, болометры и фотосопротивления демонстрируют высокие показатели в длинноволновом диапазоне, обеспечивая стабильную работу и минимальные потери. Эта способность делает их предпочтительными для применения в таких областях, как тепловое излучение и инфракрасная спектроскопия. В то же время фотоумножители, хотя и обладают высокой чувствительностью и быстродействием, не в состоянии обеспечить эффективную работу в длинноволновом диапазоне, их производительность значительно падает, что ограничивает их применение в определенных задачах. Таким образом, при проектировании ОЭП необходимо учитывать ту реальность, что различные фотоприемники могут обеспечивать разные уровни выполнения критических параметров. Для этого необходимо использовать весовые коэффициенты, которые помогут более точно отразить вклад каждого фотоприемника в общее качество системы. При моделировании таких весовых коэффициентов следует принимать во внимание не только физические и электрические характеристики, но также возможные ограничительные условия использования в конкретных приложениях. Это может включать, например, требования к диапазону температур, уровню влажности или необходимости в защите от электромагнитных помех.

Такой комплексный подход обеспечивает более полное понимание возможностей и ограничений каждого типа фотоприемников, позволяя разработчику принимать обоснованные решения, которые впоследствии будут влиять на эффективность и надежность работы всего ОЭП.

Рассмотрим методику выбора типа фотоприемника из пяти вариантов X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 с учетом всех критериев k_1-k_7 . Каждому варианту соответствует тип фотоприемника, а именно: X_1 – фоторезистор, X_2 – фотодиод, X_3 – болометр, X_4 – фотоумножитель, X_5 – фотомагнитный приемник.

Оценка вариантов фотоприемников (см. табл. 3) в соответствии с указанным выше методом осуществляется с помощью комплексных приоритетов $B_{i\text{ком}}$ по формуле:

$$B_{i\text{ком}} = \sum_{j=1}^n \beta_j' B_{ij}',$$

где β_j' – относительный приоритет (значимость) j -го критерия; B_{ij}' – относительный приоритет i -го варианта по j -му критерию; n – количество критериев ($n = 7$).

После нахождения относительных приоритетов критериев (см. табл. 1), необходимо последовательно определить абсолютные приоритеты B_{ij} вариантов, а затем – относительные B_{ij}' , которые вычисляются в долях единицы (см. табл. 2). Для расчета B_{ij} каждая строка (X_1-X_5) в матрице умножается на вектор–столбец $\sum_{j=1}^m X_j$. Нормированные значения, то есть относительные B_{ij}' , получаются делением B_{ij} на $\sum_{i=1}^m B_{ij}$.

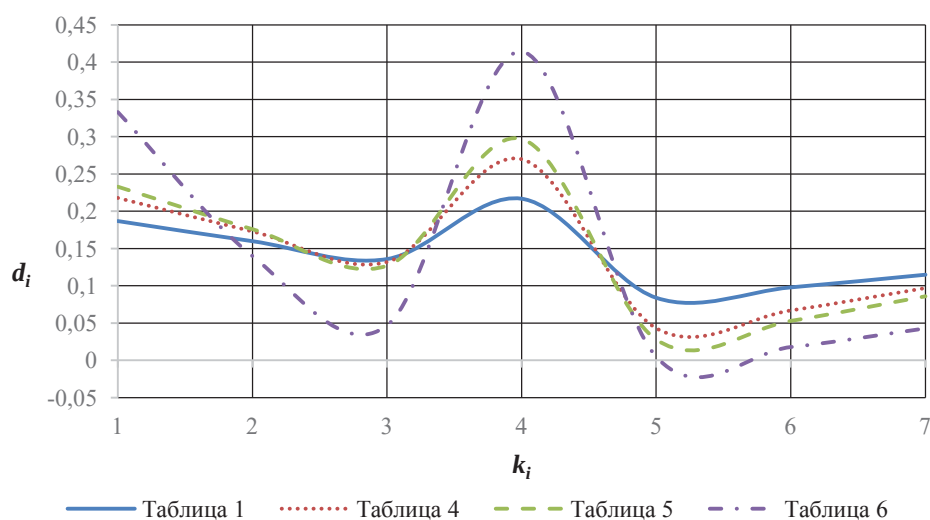
Таблица 2

Матрица смежности фотоприемников по критерию k_1

Индекс варианта	Матрица смежности по 1-му критерию					$\sum_{j=1}^m X_j$	B_{i1}	B_{ij}'
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5			
X_1	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	3,5	16,00	0,136
X_2	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	6,0	28,50	0,242
X_3	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	3,5	16,00	0,136
X_4	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	6,0	28,50	0,242
X_5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	6,0	28,50	0,242
Всего	-	-	-	-	-	-	117,50	1

При проведении анализа различных типов фотоприемников важным шагом является вы-

деление и оценка различных критериев k_2-k_7 . На этом этапе требуется определить относи-



Графики относительных приоритетов, рассчитанных разными способами

На рисунке приведены графики относительных приоритетов, полученных разными способами. Порядок ранжированных ранее критериев не изменился. В первых двух методиках использовалось аддитивное сравнение

(сложение и вычитание) (табл. 5), а в третьей методике — мультипликативное сравнение (умножение и деление с использованием девяти-балльной шкалы отношений) (табл. 6).

Таблица 5

Относительные веса критериев на основе аддитивного сравнения

Индекс критерия	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	$\sum_{i=1}^n k_i$	k_{cp}	β_j	β'_j
k_1	1	2	2	0,5	2	2	2	11,5	1,643	18,893	0,233
k_2	0,5	1	2	0,5	2	2	2	10	1,429	14,286	0,176
k_3	0,5	0,5	1	0,5	2	2	2	8,5	1,214	10,321	0,127
k_4	2	2	2	1	2	2	2	13	1,857	24,143	0,297
k_5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	4	0,571	2,286	0,028
k_6	0,5	0,5	0,5	0,5	2	1	0,5	5,5	0,786	4,321	0,053
k_7	0,5	0,5	0,5	0,5	2	2	1	7	1,000	7,000	0,086
Всего	—	—	—	—	—	—	—			81,25	

Таблица 6

Относительные веса критериев на основе мультипликативного сравнения

Индекс критерия	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	$\sum_{i=1}^n k_i$	k_{cp}	β_j	β'_j
k_1	1,000	7,000	7,000	0,111	5,0	3,000	2,0	25,11	3,587	90,08	0,333
k_2	0,143	1,000	7,000	0,143	4,0	2,000	2,0	16,28	2,327	37,89	0,140
k_3	0,143	0,143	1,000	0,200	3,0	3,000	2,0	9,486	1,355	12,85	0,047
k_4	9,000	7,000	5,000	1,000	2,0	2,000	2,0	28,00	4,000	112,00	0,414
k_5	0,200	0,250	0,333	0,500	1,0	0,333	0,5	3,11	0,445	1,39	0,005
k_6	0,333	0,500	0,333	0,500	3,0	1,000	0,25	5,91	0,845	5,00	0,018
k_7	0,500	0,500	0,500	0,500	4,0	2,000	1,00	9,00	1,286	11,57	0,043
Всего	—	—	—	—	—	—	—			270,78	

Выводы

Проведенные исследования различных методик ранжирования показывают, что порядок проранжированных элементов, полученных основной методикой, не изменился. Однако вторая методика, сочетающая использование среднего значения и аддитивного сравнения, требует меньшего количества операций. Это делает ее особенно привлекательной для практического применения, так как она может быть использована без необходимости привлечения специальных программ и сложных алгоритмов. Пользователи могут применять методику непосредственно, что упрощает процесс анализа и принятия решений в ряде профессиональных областей. Тем не менее, применение морфологического синтеза открывает совершенно новые горизонты в проектировании и конструировании оптимальных систем, особенно в области интеллектуальных энергетических систем (ОЭС).

Благодаря гибкому подходу, этот метод позволяет из набора известных узлов и блоков создать конструкции, которые превосходят по эффективности и инновациям традиционные методы проектирования. Это, в свою очередь, может привести к значительным улучшениям в производительности, надежности и стоимости разрабатываемых решений. Важно помнить, что формализованные методики проектирования не просто обучают, но и становятся основой для создания компьютерных экспертных систем, а также систем автоматизированного проектирования ИИУС. Системы, основанные

на таких методах, способны обеспечить более высокий уровень автоматизации и точности в проектировании, способствуя ускорению процессов и снижению человеческого фактора в принятии важнейших решений. Таким образом, связи между теорией и практикой проектирования становятся все более актуальными и значимыми, поскольку они создают новые многогранные возможности для разработки сложных систем и их эффективного внедрения в различные сферы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Одрин, В. М.* Метод морфологического анализа технических систем / В. М. Одрин. – М. : ВНИИПИ, 1989. – 312 с.
2. *Джонс, Дж. К.* Методы проектирования : пер. с англ. / Дж. К. Джонс. – М. : Мир, 1986. – 326 с.
3. *Альтшуллер, Г. С.* Алгоритм изобретения / Г. С. Альтшуллер. – М. : Московский рабочий, 1973. – 296 с.
4. *Моисеева, Н. К.* Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа / Н. К. Моисеева, М. Г. Карпунин. – М. : Высш. шк., 1988. – 192 с.
5. *Шилин, А. Н.* Проектирование адаптивных оптоэлектронных устройств контроля процессов формообразования крупногабаритных нагретых деталей / А. Н. Шилин // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 7. – С. 14–20.
6. *Мирошников, М. М.* Теоретические основы оптоэлектронных приборов / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
7. *Ишанин, Г. Г.* Приемники излучения оптических и оптоэлектронных приборов / Г. Г. Ишанин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 175 с.
8. *Подinovский, В. В.* Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В. В. Подиновский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64 с.
9. *Ширяев, В. В.* Принятие решений: Математические основы. Статистические задачи : учеб. пособие / В. В. Ширяев, Е. В. Ширяев. – М. : Книжный дом «ЛИБРКОМ», 2009. – 208 с.