THE METHOD OF SEARCH DESIGN OF MAGNETOELASTIC TRANSDUCERS OF MECHANICAL QUANTITIES

Amirov S.F., Jurayeva K.K.
Tashkent state transport university (Tashkent, Uzbekistan)

Abstract: The article shows that in the search design of magnetoelastic converters of mechanical quantities by the energy-informational method, the separation of the stage of morphological analysis and synthesis of converters into separate sub-stages of morphological analysis and synthesis according to a parametric structural scheme and for each physical and technical effect of this scheme allows speeding up the process of developing converters with the required technical characteristics.

Keywords: search engine design, energy information method, database, knowledge base, automated data bank, generalized technique, morphological matrix, analysis and synthesis, magnetoelastic transducers, mechanical quantities, parametric block diagram, physical-technical effect

МЕТОДИКА ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ МАГНИТОУПРУГИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Амиров С.Ф., Жураева К.К.
Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Узбекистан)

Аннотация: В статье показано, что при поисковом конструировании магнитоупругих преобразователей механических величин энергоинформационным методом разделение этапа морфологического анализа и синтеза преобразователей на отдельные подэтапы морфологического анализа и синтеза по параметрической структурной схеме и по каждому физико-техническому эффекту этой схемы позволяет ускорить процесс разработки преобразователей с требуемыми техническими характеристиками.

Ключевые слова: поисковое конструирование, энергоинформационный метод, база данных, база знаний, автоматизированный банк данных, обобщенный прием, морфологическая матрица, анализ и синтез, магнитоупругие преобразователи, механические величины, параметрическая структурная схема, физико-технический эффект

Введение. В настоящее время широкое распространение получили автоматические системы с объектами управления, в которых управляемая величина имеет механическую природу и представляет собой механическое усилие, крутящий момент и параметры движения, в том числе и параметры колебательного (вибрационного) движения [1-3].

Необходимость расширения функциональных возможностей и повышения эксплуатационной надежности автоматических систем требует совершенствования известных и создания новых первичных преобразователей измеряемых и управляемых величин.

Благодаря высокой эксплуатационной надежности, большой выходной мощности, конструктивной простоты, удобства эксплуатации и большого срока службы наиболее полно требованиям систем контроля и управления удовлетворяют электромагнитные (индуктивные, трансформаторные и магнитоупругие) преобразователи механических величин [4-7]. Отсутствие подвижного элемента у магнитоупругих преобразователей (МУП) при измерении многих механических величин делают их незаменимым среди электромагнитных преобразователей [8-12].

Совершенствование МУП механических величин (МУПМВ), отвечающих все возрастающие требования, предъявляемые к первичным и вторичным измерительным преобразователям (ИП) систем контроля и управления, и конструирование новых их модификаций практически неосуществимо без анализа известных конструкций, критической оценки имеющегося опыта в конструировании МУПМВ.

Следует отметить, что анализ существующих конструктивных исполнений МУПМВ и поисковое конструктирование их новых решений значительно усложняются тем, что принцип действия ИП описывается аналитическим выражением, присущем данному классу явлений различной (механической, электрической, магнитной, и т.д.) физической природы. При этом аналитические уравнения разных физических эффектов существенно отличаются друг от друга по традиционно используемому математическому аппарату, что хотя и позволяет глубоко исследовать специфические особенности явлений, но усложняет синтез новых элементов и устройств систем управления.

Начиная 70-х годов прошлого века интенсивно ведутся исследования и разработки по созданию и практическому использованию систем автоматизированного поискового конструирования технических устройств (ТУ), в том числе ИП электрических и неэлектрических величин[13;14]. Поисковое конструирование, как известно [14], включает в себя выбор или поиск:

-наилучшего физического принципа действия (ФПД) ИП, отвечающим конкретным условиям работы;

-оптимальных значений параметров выбранного конструктивного решения.

Методы поискового конструирования ТУ, основанные на базы данных (БД) по физическим эффектам, такие как мозговая атака, морфологический анализ и синтез и др., используются для синтеза ФПД ТУ в виде цепочки последовательных преобразований от входа к выходу [13-15]. Недостатком этих методов является то, что с помощью такого подхода синтезируется лишь небольшое количество вариантов ФПД ТУ. Концептуальная модель, положенная в основу этого подхода, такова, что не для всех пар входных и выходных величин существует хотя бы одно решение. Кроме того, возникают трудности при составлении уравнений описания синтезированных ФПД и оценке их технических характеристик.

Поэтому для анализа известных, разработки и исследования новых конструкций МУПМВ в диссертации использовался разработанный профессорами М.Ф. Зариповым и И.Ю. Петровой энергоинформационный метод поискового конструирования (ЭИМПК) чувствительных элементов СКУ [16;17]. Отличительными особенностями метода являются:

-рассмотрение явления различной физической природы с помощью уравнений, инвариантных к самой физической природы, объединение в одной модели явлений различной физической природы;

-декомпозиция сложных физических процессов, протекающих в ИП, на процессы в цепях различной физической природы, взаимодействие между которыми отражается наличием физико-технических эффектов (ФТЭ). В любом ИП можно условно выделить участки, включающие несколько последовательных элементарных преобразований. Это позволяет организовать описание принципа действия ИП в виде параметрических структурных схем (ПСС). Каждое элементарное звено такой схемы отражает одно преобразование. ПСС какого-либо ИП представляет собой сочлененные определенным образом элементарных функций, а любое техническое устройство считается состоящим из определенного (конечного) числа ФТЭ;

-введение в систему сосредоточенных, распределенных и изменяющихся во времени параметров-аналогов (сопротивление, индуктивность, емкость, проводимость, дедуктивность, жесткость и их производные) для описания свойств материальной среды, в которой протекают физические процессы. Предусмотрены все возможные связи между величинами и параметрами. Многообразие взаимосвязей между величинами и параметрами внутри одной физической природы можно представить в виде графа-топограммы внутрицепных зависимостей. Введение топограмм внутрицепных зависимостей, одинаковых для цепей различной физической природы, позволяет существенно упростить алгоритм поиска ФПД ИП;

-введение в систему критериев – уравнений, связывающих величины-аналоги и параметры-аналоги для описания процессов определенной физической природы с сосредоточенными, распределенными в пространстве и изменяющимися во времени величинами и параметрами. В случае переменных величин и параметров, описанные выше критерии выполняются для их мгновенных значений.

Для составления ПСС ИП, использующих ФТЭ между цепями различной физической природы. Пользуясь известными моделями, описывающими эти явления и эффекты, можно представить их в форме элементарных преобразований величин одной физической природы в величины или параметры другой физической природы.

Аппарат ПСС позволяет не только графически изображать причинно-следственные связи между величинами и параметрами через элементарные преобразования, но и относительно легко получить аналитические уравнения необходимых зависимостей в виде статических и динамических характеристик, а также погрешности.

Следовательно, любой ИП, в том числе и МУПМВ, можно рассматривать как совокупность простейших звеньев, соединенных между собой в определенном порядке, и образующую его структурную схему, а каждое из звеньев представлять в виде самостоятельный элементарный преобразователь одной величины или одного параметра. Причем, любое из элементарных преобразований одной физической величины в другую в первом приближении описывается линейной зависимостью.

Применение ЭИМПК позволяет сделать процесс поискового конструирования ИП не только наглядным, но и более содержательным, и, раскрывая как качественные, так и количественные связи, привлекает внимание разработчиков к наиболее важным деталям конструкции ИП. Кроме того, он позволяет автоматизировать процессы выбора ФПД и скелетной конструкции технического решения, используя принципы многокритериальной ранжировки ПСС [16].

Решение задач поискового конструирования ИП энергоинформационным методом основано на использовании автоматизированного банка данных (АБД) ФТЭ. В состав АБД ФТЭ входят следующие базы данных (БД): БД ФТЭ, БД морфологических матриц (ММ), БД обобщенных приемов (ОП) (рис.1) [17]. Согласно этой блок-схеме, информация, содержащаяся в научно-технической и патентной литературе, а также знания экспертов преобразуются с помощью энергоинформационной модели к виду, удобному для ввода в соответствующие базы данных. Эти БД могут быть объектно-ориентированными, проблемно-ориентированными и межотраслевыми. Каждая из них является основной для соответствующего этапа поискового конструирования ИП. Поиск ФПД осуществляется на основе БД ФТЭ, а поиск конструктивных реализаций для выбранного ФПД – на основе БД ММ ФТЭ. Учет условий эксплуатации и корректировка характеристик осуществляются с помощью структурных и параметрических ОП [16]. Все этапы, кроме компоновки, полностью осуществляются с привлечением компьютерной техники.

В научно-исследовательской работе рассматривается этап поискового проектирования МУПМВ, связанный с выявлением и реализацией ОП.

Поиск новых конструктивных и схемных решений МУПМВ ЭИМПК включает в себя следующие этапы:

синтеза на основе информаций БД ФТЭ и выбор наилучших решений.

1. поиск ФПД МУПМВ с помощью параметрического структурного синтеза на основе информаций БД ФТЭ и выбор наилучших решений по техническим характеристикам; 2. нахождение наилучших конструктивных решений каждого элементарного преобразователя подобранного ФПД с помощью морфологического синтеза с использованием БД ММ ФТЭ; 3. набор конструкции и разработка эскизного варианта с помощью БД ОП.

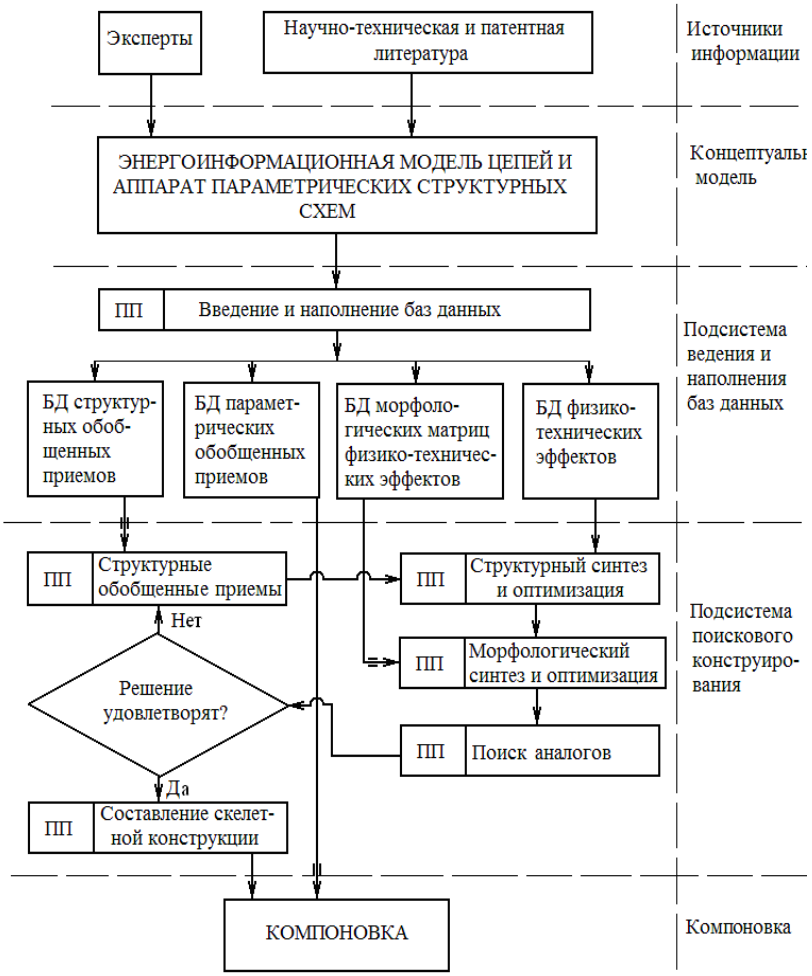

Рис.1. Основные этапы ЭИМПК.

Назначением целевой функции алгоритма первого этапа является нахождение по требуемым входной и выходной величинам МУПМВ всевозможных вариантов решений их ФПД и определение из них наилучших вариантов. На данном этапе составляется семейство ПСС МУПМВ, каждой ПСС сопоставляется совокупность значений основных технических характеристик (погрешность, чувствительность, надежность, диапазон по входному и выходному величинам, нелинейность функции преобразования, быстродействие, масса и др.), рассчитываемых по значениям характеристик каждого элементарного преобразователя ПСС и выбирается решение ФПД МУПМВ, отвечающего по основным техническим характеристикам заранее поставленным требованиям.

Любой межцепный ФТЭ между цепями i– ой и j– ой физической природы или параметр i – ой физической природы, может быть представлен как кортеж следующего вида:

$$PTE = \left\{H_{PTE}, B_{i\,in}, B_{j\,out}, K, K_0, KM_{PTE}, D_{i\,in}, D_{j\,out}, EX_{n|1}^{N}\right\}, \quad (1)$$

$$\Pi_i = \left\{H_{\Pi}, B_{i\,in}, B_{j\,out}, \Pi, \Pi_0, \Pi M_{\Pi}, D_{i\,in}, D_{j\,out}, EX_{n|1}^{N}\right\}, \quad (2)$$

здесь H_{PTE}, H_{Π} – наименование PTE или параметра; $B_{i\,in}$, $B_{j\,out}$ – соответственно входная величина i –ой и выходная величина j – ой физической природы; K, П – коэффициент межцепного ФТЭ и параметр i –ой физической природы соответственно; K_0, Π_0 – величины, представляющие текстовое описание коэффициента или параметра и его формулу; KM_{PTE}, ΠM_{Π} – математические модели ФТЭ и параметра соответственно, каждый принимает значение 1 или 0; $D_{i\,in}$, $D_{j\,out}$ – диапазон входной и выходной величины каждого ФТЭ или параметра, здесь каждый вариант ПСС считается работоспособной, если диапазон величин выхода каждого предыдущего ФТЭ

соответствует диапазону величин входа каждого последующего ФТЭ ПСС, т.е. $D_{i\,in}^{n} \cap D_{i\,in}^{n-1}$ и $D_{j\,out}^{n} \cap D_{j\,out}^{n+1}$, это условие является необходимым и достаточным условием получения МУПМВ; $EX_{n|1}^{N}$ – переменные для определения технических характеристик полученного ФПД МУПМВ.

В описаниях (паспортах) ФТЭ и параметра приводятся значения основных характеристик МУПМВ таких, как погрешность, чувствительность, надежность, диапазон, нелинейность, быстродействие, цена и масса, которые в совокупности позволяют оценить технические свойства полученной ФПД МУПМВ в виде ПСС (табл.1).

При составлении целевой функции используются нормированные значения технических характеристик ФТЭ и эффектов (табл.2).

Таблица 1.

Формулы для расчета технических характеристик

№	Характеристика	Формула	Описание
1	Чувствительность	$S = \sum_{i=1}^{i \le GP} S_i$	где S_i −чувствительность i-ого ФТЭ в цепочке; GP-длина цепочки (1≤GP≤GP_{max}≤10)
2	Цена	$P = \sum_{i=1}^{i \le GP} P_i$	где P_i − цена i-ого ФТЭ в цепочке; GP-длина цепочки (1≤GP≤GP_{max}≤10)
3	Надежность	$R = \sum_{i=1}^{i \le GP} R_i$	где R_i − надежность i-ого ФТЭ в цепочке; GP-длина цепочки (1≤GP≤GP_{max}≤10)
4	Погрешность	$F = \sum_{i=1}^{i \le GP} F_i$	где F_i −погрешность i-ого ФТЭ в цепочке; GP-длина цепочки (1≤GP≤GP_{max}≤10)
5	Нелинейность	$N = \sum_{i=1}^{i \le GP} N_i$	где N_i − нелинейность i-ого ФТЭ в цепочке; GP-длина цепочки (1≤GP≤GP_{max}≤10)
6	Быстродействие	$H = \sum_{i=1}^{i \le GP} H_i$	где H_i − быстродействие i-ого ФТЭ в цепочке; GP-длина цепочки (1≤GP≤GP_{max}≤10)
7	Нижняя и верхняя границы диапазона основного входа	рассчитывается как последовательное пересечение выходных и входных диапазонов для каждой пары рядом стоящих ФТЭ	

Эффективность i- ого решения ФПД МУПМВ определяется с помощью следующей, обобщенной критерий [17]:

$$K_{i.\text{эфф.}} = \sum_{k=1}^{N} \xi_k \cdot \widetilde{Э}_{ik}, \qquad (3)$$

здесь $\widetilde{Э}_{ik} = Э_{ik}/Э_{max.ik}$ – относительное значение k- ой характеристики ФПД МУПМВ; $Э_{ik}$, $Э_{max.ik}$ – соответственно значение и максимальное значение k- ой характеристики ФПД; ξ_k – коэффициент, характеризующий степени важности k- ой характеристики, причем $0 \le \xi_k \le 8$.

Таблица 2.

Нормирование основных характеристик

Характеристики	Нормированная характеристика,p_n	Минимум	Максимум	Диапазон изменения

Чувствительность	x_i/x_{max}	< 1	1	$0 < p_n \leq 1$
Погрешность, надежность, диапазон, нелинейность, быстродействие, цена, масса	x_{max}/x_i	< 1	1	$0 < p_n \leq 1$

Назначением целевой функции алгоритмов второго этапа является для полученного на первом этапе решения ФПД МУПМВ в виде ПСС с использованием БД ММ по каждому элементарному преобразователю находить наилучшие варианты ФПД всего преобразователя, т.е. произвести морфологический синтез по выбранной ПСС. При этом в качестве морфологических признаков выступает ФТЭ или параметр, участвовавший в выбранной ПСС МУПМВ, причем в качестве значения каждого признака ММ выступает вариант реализации ФТЭ или параметра, наилучшего по отдельной технической характеристики, например, по чувствительности, погрешности, надежности т.п.

Существующие и мыслимые конструктивные реализации каждого ФТЭ или параметра составляет морфологическое множество этого ФТЭ или параметра. Это множество может быть представлено в виде произведение множеств $N = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot \ldots \cdot n_i \cdot \ldots \cdot n_m$, здесь n_i – значение n- ого признака.

Образование БД ММ ФТЭ или параметра ПСС МУПМВ, не самого преобразователя, способствует резкому увеличению число конструктивных и схемных решений МУПМВ и выбору наилучшего из них в соответствии с поставленными требованиями.

ММ – это совокупность разделенных на значения морфологических признаков ФТЭ или параметра (табл.3) [15]. При этом в качестве признаков ММ выбираются существенные элементы ФТЭ, параметра или значения их

Таблица 3.

Морфологическая матрица для синтеза МУПМВ

Признаки	Значения морфологических признаков					
k_1	R_1^1	R_1^2	…	R_1^i	…	R_1^m
k_2	R_2^1	R_2^2	…	R_2^i	…	R_2^p
…	…	…	…	…	…	…
k_j	R_j^1	R_j^2	…	R_j^i	…	R_j^q
			…			
k_n	R_n^1	R_n^2	…	R_n^i	…	R_n^w

здесь R_j^i - i- значение j- морфологического признака.

характеристик, причем признаки не должны зависит один от другого. Следует отметить, что значение морфологического признака является одним из значений подмножества морфологического множества варианта реализации ФТЭ или параметра. Размерность матрицы морфологических признаков как умножение количество морфологических признаков на число значений признака, имеющее максимальное значение.

Таким образом, морфологический анализ МУПМВ состоит из следующих этапов: 1) точная формулировка поставленной задачи; 2) выделение морфологических признаков; 3) нахождение всевозможных значений (реализаций) морфологических признаков и сведение этих значений в виде следующей матрицы:

$$\begin{vmatrix} R_1^1 & R_1^2 & \ldots & R_1^i & \ldots & R_1^m \\ R_2^1 & R_2^2 & \ldots & R_2^i & \ldots & R_2^p \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ R_j^1 & R_j^2 & \ldots & R_j^i & \ldots & R_j^q \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ R_n^1 & R_n^2 & \ldots & R_n^i & \ldots & R_n^w \end{vmatrix} \quad (4)$$

ММ МУПМВ позволяет собрать их всевозможные конструктивные решения. При этом каждый вариант решения МУПМВ получается по ММ в виде комбинации значений различных морфологических признаков. Набор по одному из каждой строки значений различных морфологических признаков дает нам вариант технической реализации МУПМВ, например, вариант $\{R_1^2,\ R_2^1, \dots\ R_j^2, \dots\ R_n^1\}$. Общее число вариантов реализации МУПМВ по ММ составляет $N = m \cdot p \cdot \dots \cdot q \cdot \dots \cdot w$, т.е. равно умножений число реализаций всех морфологических признаков в ММ.

Следует отметить, что после выбора ФПД МУПМВ в виде ПСС его морфологический анализ и синтез рекомендуются провести по следующим двум этапам: 1) морфологический анализ и синтез по выбранной ПСС МУПМВ; 2) морфологический анализ и синтез каждого ФТЭ и параметра выбранной ПСС. В первом этапе в качестве морфологических признаков выступает каждый ФТЭ и параметр, а значения каждого признака отличается один от другого тем, что он имеет наилучшее значение по какой-либо характеристики, например, чувствительности, погрешности, быстродействию и т.д. Во втором этапе морфологическому анализу и синтезу подвергается каждый ФТЭ и параметр выбранной ПСС МУПМВ (результаты исследования по морфологическому анализу и синтезу по выбранной ПСС МУПМВ, а также морфологическому анализу и синтезу каждого ФТЭ и параметра выбранной ПСС на примере конкретного МУП приведены в приложении).

Целевая функция алгоритмов третьего этапа предназначена для совершенствования конструктивного исполнения МУПМВ, полученного по результатам первого и второго этапов, с помощью БД ОП улучшения его основных технических характеристик.

Методика выявления и реализации ОП улучшения технических характеристик ИП предложена профессором М.Ф. Зариповым [16]. Методика заключается в последовательном анализе изобретений и его ближайшего аналога (прототипа) в выбранной области измерительной техники, например, в области МУПМВ. Для этого составляют уравнений изобретения и его прототипа по улучшаемой характеристики, сравнивая их выявляют отличительную часть в конструкции изобретения от его прототипа, и, обобщая их, находят ОП. Применение БД ФТЭ, метода ПСС и ЭВМ при выявлении ОП сокращает времени синтеза новых технических реализаций ИП с желаемыми техническими характеристиками. В случае одновременного анализа нескольких пар (пара – изобретение и его прототип) изобретений процесс выявления и реализация ОП удобно вести в матричной форме (таблица 4). При этом основная диагональ матрицы заполняются конструкциями рассматриваемых изобретений, а первая столбца матрицы – конструкциями прототипов.

Все остальные пустые клетки матрицы (если, например, анализируются описания n пар изобретений и их прототипы, то количество пустующих клеток будет равно $(n-1)^2$) заполняются идеями, возникающими в результате конкретной реализации выявленных ОП.

В качестве критерия эффективности применения сформулированных ОП совершенствования конструкций МУПМВ рекомендуется количества одновременно улучшаемых характеристик при реализации одного и того же

ОП без снижения значения обобщенной характеристики улучшаемого МУПМВ. Значения обобщенных характеристик МУПМВ определяются по методике, предложенной проф. Зариповым М.Ф. и Петровой И.Ю. [16;17].

Таблица 4.

Матрица обобщенных приемов МУПМВ

	Обобщенная цель	Повышение чувствительности	Повышение точности	Расширение функциональных возможностей
Конструкция прототипа	Обобщенный прием / Отли-	Обобщенный прием №1	Обобщенный прием №2	Обобщенный прием №3

	читель-ная часть изобретения			
Прототип	Формула изобретения	Конструкция изобретения	Идея №1	Идея №2
Прототип	Формула изобретения	Идея №3	Конструкция изобретения	Идея №4
Прототип	Формула изобретения	Идея №5	Идея №6	Конструкция изобретения

Инфологическая модель ОП улучшения технических характеристик МУПМВ имеет следующий вид:

$$\text{ПР} = \left\{\text{Т}_{\text{пр}}, \text{Х}_i^N, \text{ХУ}_m^K, \text{Х}_{\text{э}i}, Y_{\text{эу}m}, \text{Х}_j, \Pi_z, \text{ФТЭ}_t^{\text{О/В}}\right\}, \quad (5)$$

здесь $\text{Т}_{\text{пр}}$ – текстовая формулировка ОП $<$ текст $>$; Х_i^N – множество улучшаемых технических характеристик (N –общее количество подобных характеристик, i – номер данной характеристики в общем списке характеристик (чувствительность, погрешность, надежность и т.п.)) $<$ текст $>$; ХУ_m^K – множество ухудшающихся характеристик (K – общее количество ухудшающих характеристик, m - номер данной характеристики в общем списке характеристик) $<$ текст $>$; $\text{Х}_{\text{э}i}$, $Y_{\text{эу}m}$ – экспертные оценки соответственно степени улучшения и ухудшения характеристик в пределах от 1 до 10 $<$ число $>$; Х_j – характер ОП, при этом конструктивные ОП -1, технологические ОП – 2, ОП, основанные использование новых материалов – 3, схемотехнические ОП – 4 $<$ число $>$; Π_z – множество патентов, создающих рассматриваемый ОП, который характеризуется библиографическими данными патентов, z – номер патента, $<$ текст $>$; $\text{ФТЭ}_t^{\text{О/В}}$ – множества ФТЭ, участвовавшие в данный ОП, где t – номер ФТЭ в БД, О – основной ФТЭ, В – вспомогательный ФТЭ, $<$ текст $>$.

С помощью информационной подсистемы ОП можно отобрать те ОП, которые наиболее соответствуют техническим требованиям (результаты исследования по выявлению и реализации ОП МУПМВ приведены в приложении диссертации).

Таким образом, в статье развита методика поискового конструирования МУПМВ на этапе их морфологического анализа и синтеза: рекомендовано осуществить в следующих двух этапах: 1) морфологический анализ и синтез по выбранной ПСС МУПМВ; 2) морфологический анализ и синтез каждого ФТЭ и параметра выбранной ПСС, которые позволяют сконструировать новые конструктивные и схемные решения МУПМВ, удовлетворяющие требованиям систем контроля и управления.

Литература

1. Кабанов В.Н. Элементы автоматики: учеб. пособие/ В.Н. Кабанов. – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2010. – 187 с.

2. Юсупбеков Н.Р., Игамбердиев Х.З., Маликов А.В. Основы автоматизации технологических процессов: Учебное пособие для высшего и среднего специального образования. В 2-х ч. – Т.: ТГТУ, 2007. Ч.1, 2. – 152 с.

3. Автоматические устройства с магнитоупругими преобразователями /Твердин Л.М., Панченко В.М., Всеволодов Б.В., Закорюкин В.Б. Москва, Энергия, 1974. Библиотека по автоматике. Выпуск 517. - 96 с.

4. Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л.. Электромагнитные датчики механических величин. – Москва: Машиностроение, 1987. – 256 с.

5. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с.

6. Зудин В.Л. Датчики: измерение перемещений, деформаций и усилий: учебное пособие для вузов/ В.Л. Зудин, Ю.П. Жуков, А.Г. Маланов. - 2-е изд. - Москва: Издательство Юрайт, 2024. - 199 с.

7. Полищук Е.С. и др. Средства и методы измерения неэлектрической величины: Учебник/Под. ред. Е.С. Полищука. – «Бескид-Бт», 2008. - 618 с.

8. Гинзбург В.Б. Магнитоупругие датчики (Библиотека по автоматике. Выпуск 412). Москва: Энергия, 1970. - 72 с.

9. Гуманюк М.Н. Магнитоупругие силоизмерители. - Киев: Техника, 1981.- 184 с.

10. Левинтов С.Д. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента/ С.Д. Левинтов, А.М. Борисов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 86 с. – (Б-ка по автоматике; Вып. 644).

11. Рыбальченко Ю.И. Магнитоупругие датчики крутящего момента. – Москва: Машиностроение, 1981. – 128 с.

12. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Магнитоупругие датчики усилий для систем контроля и управления объектами железнодорожного транспорта// Монография. Издательсьтво «Fan va texnilogiya», Ташкент, 2019 – 162 с.

13. Глазунов В.Н. Поиск принципов действия технических систем/В.Н. Глазунов. – Москва: Речной транспорт, 1990. – 111 с.

14. Дворянкин А.М. Автоматизация поискового конструирования. Модели, задачи, алгоритмы: Автореф. дис. … д.т.н. – Волгоград, ВолгГТУ, 1996. – 46 с.

15. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. Москва: ВНИИПИ, 1989. – 311 с.

16. Зарипов М.Ф., Зайнуллин Н.Р., Петрова И.Ю. Энергоинформационный метод научно-технического творчества. – Москва: ВНИИПИ ГКНТ, 1988. – 124 с.

17. Проектирование элементов информационно-измерительных и управляющих систем для интеллектуальных зданий: монография/Д.П. Ануфриев, В.М. Зарипова, Ю.А. Лежнина, И.Ю. Петрова, Т.В. Хоменко, О.М. Шикульская. – Астрахань: ГАОУ АО ВПО «Астраханский инженерно-строительный институт», 2015. – 231 с.