

УДК 621.81

*В. М. Пашкевич*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ  
РЕДУЦИРУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЕМАНТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

UDC 621.81

*V. M. Pashkevich*

**AUTOMATION OF DESIGN AND TESTING OF REDUCING MECHANISMS  
BASED ON THE USE OF FUNCTIONAL SEMANTIC NETWORKS**

**Аннотация**

Рассматривается автоматизация процедур расчетов, проектирования и испытания механизмов редуцирующего типа на основе размерного анализа, использующего технологию функциональных семантических сетей.

**Ключевые слова:**

расчет, проектирование, испытания, редуцирующие механизмы, функциональные семантические сети, размерные цепи.

**Abstract**

The paper considers the automation of calculation, design and testing procedures for reducing mechanisms based on dimensional analysis which uses the technique of functional semantic networks.

**Key words:**

calculation, design, testing, reducing mechanisms, functional semantic networks, dimensional chains.

***Введение***

Процедуры расчетов, проектирования и испытаний механизмов редуцирующих типов, использующих передачи классических типов (цилиндрических, конических, червячных и др.), достаточно хорошо описаны, им посвящено большое количество исследований как зарубежных, так и отечественных ученых.

Как правило, упомянутые процедуры представляют процесс аналитических или численных исследований механизма в виде совокупности этапов, которые принимаются условно независимыми и выступают как элементы последовательности расчетов: на первом

этапе – проектирования, затем – контроля (испытаний) применительно к готовой машине. Такое допущение правомерно, однако не учитывает функциональных взаимосвязей, возникающих между расчетными параметрами ввиду наличия указанной последовательности.

Альтернативу такому подходу составляет методология проектирования с «открытой» архитектурой, где изменениям в любой момент доступны не только входные данные, но и результаты промежуточных вычислений, как если бы они являлись входными параметрами [1]. Указанный подход позволяет объединить в единой вычислительной среде решение как прямых, так и обратных задач.



Учет функциональных взаимосвязей между параметрами машин дает возможность применить данный подход также и к процедурам испытаний (контроля, диагностики).

### Основная часть

Элементы вышеописанного подхода уже реализуются частично в некоторых САД-системах в форме процедур адаптивной сборки (как правило, на этапе геометрической компоновки механизма). Однако, кроме таких, ставших классическими, методов геометрического моделирования, эффективность САПР может быть повышена на основе следующих принципов [2].

1. *Функциональная взаимосвязь между параметрами механизма.* Этот принцип подразумевает наличие функциональных взаимосвязей (в том числе и скрытых) между параметрами конструкции машин.

Применение данного принципа позволило установить, что с увеличением количества параметров и связей, используемых САПР, достоверность и качество проектирования возрастает (при наличии непротиворечивой информации).

2. *Комплексный характер проектирования.* Указанный принцип предполагает возможность объединения в единой вычислительной среде методик расчета параметров машин, имеющих принципиально различную природу, а также использующих принципиально различные методы расчета (энергетический расчет, прочностные расчеты деталей, расчет размерных цепей и др.).

3. *Равноценность подзадач проектирования.* В соответствии с данным принципом ни одна из подзадач проектирования не может рассматриваться в качестве доминирующей по отношению к другим. При этом подразумевается также равнозначность прямых и обратных задач при поиске решения.

В связи с этим порядок проектирования может быть определен САПР произвольно, без выделения какой-либо предустановленной их последовательности. Установлено, что использование подобной последовательности может приводить к ухудшению качества решения.

4. *Равноценность параметров проектирования.* Принцип предусматривает отказ от применения классической последовательности проектирования «от входных параметров к выходным». Как «входные», так и «выходные» параметры являются равноценными атрибутами отношений функциональных семантических сетей, в форме которых представляются функциональные зависимости рассматриваемых САПР. Данный принцип обеспечивает «открытую» архитектуру вычислений.

Например, при изменении размеров, входящих в размерную цепь, автоматически пересчитываются размеры прочих компоновочных размеров элементов узла (прямая задача). При изменении материала элемента конструкции могут быть соответствующим образом скорректированы размеры прочих элементов для обеспечения требуемых массогабаритных характеристик (обратная задача).

5. *Трактовка задачи проектирования как задачи поиска глобального оптимального решения при наличии системы ограничений.* Поиск решения оказывается успешным только при наличии общего, глобального критерия качества (целевой функции). Решение задачи проектирования как последовательности решений подзадач, характеризующихся частными критериями качества, без учета их влияния на конечный результат проектирования, приводит к снижению уровня такого решения.

Описанные принципы были положены в основу алгоритма работы интеллектуальной системы СОМРАСТ для проектирования редуцирующих механизмов, разработанной в Белорусско-Российском университете и бази-



рующей на использовании технологий функциональных семантических сетей [3].

Рассмотрим методику построения отношений функциональной семантической сети для минимизации массогабаритных показателей механизмов на

примере проектирования радиально-плунжерных редукторов с муфтовым присоединением приводного электродвигателя. Расчетная схема редуктора представлена на рис. 1. Размерные цепи для одной из его деталей изображены на рис. 2.

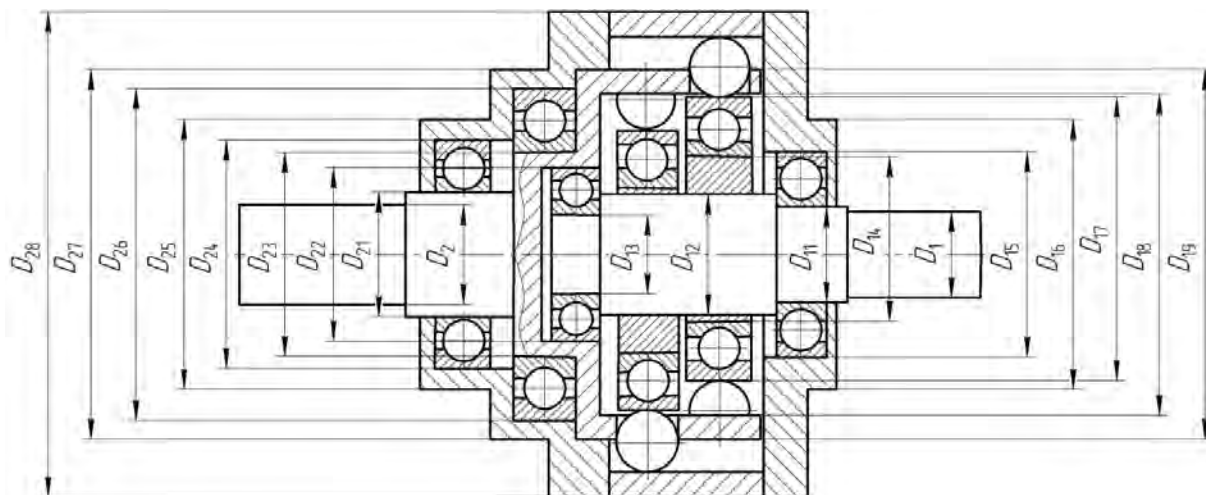


Рис. 1. Расчетная схема редуктора

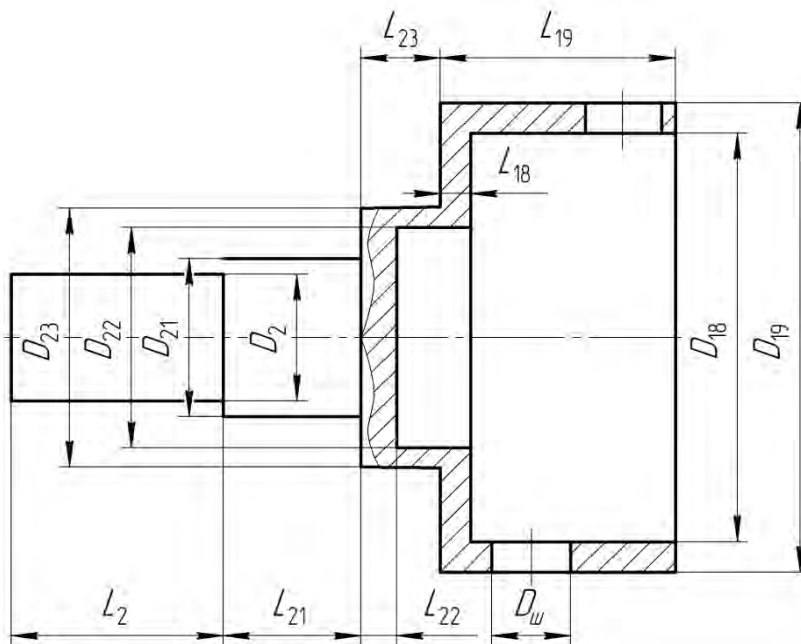


Рис. 2. Размерные цепи для ведомого звена

Основные зависимости, позволяющие определить геометрические параметры зацепления, были представлены в [4]. В результате проведенного анализа конструкции радиально-плунжерного редуктора был выделен набор из 64 отношений, учитывающих 83 параметра, на базе которых была построена функ-

циональная семантическая сеть, дающая возможность определять рациональные размеры редуктора, обеспечивающие минимизацию его удельной массы [5].

Так, на рис. 3 отображен фрагмент этой сети для определения массы редуктора.

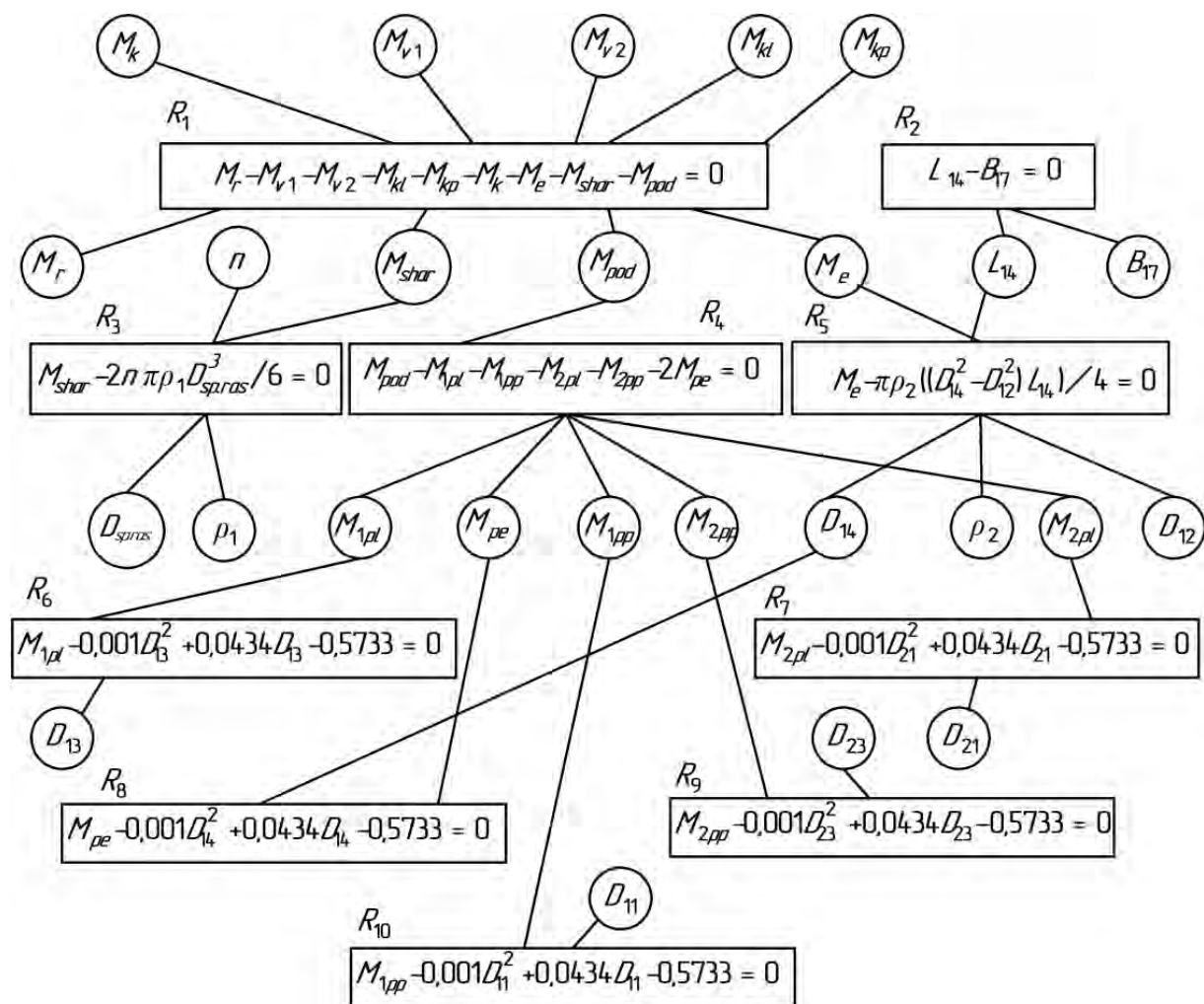


Рис. 3. Функциональная семантическая сеть для расчета массы редуктора:  $M_r$  – масса редуктора;  $M_{kl}$  – масса крышки левой;  $M_{kp}$  – масса крышки правой;  $M_{v2}$  – масса ведомого вала;  $M_{v1}$  – масса ведущего вала;  $M_e$  – масса эксцентрика;  $M_{shar}$  – масса шаровых плунжеров;  $M_{pod}$  – масса подшипников;  $M_k$  – масса центрального колеса;  $\rho_1$  – плотность материала шаровых плунжеров;  $n$  – количество шаровых плунжеров;  $\rho_2$  – плотность материала эксцентрика;  $M_{1pl}$  – масса левого подшипника ведущего вала;  $M_{1pp}$  – масса правого подшипника ведущего вала;  $M_{2pl}$  – масса левого подшипника ведомого вала;  $M_{2pp}$  – масса правого подшипника ведомого вала;  $M_{pe}$  – масса подшипника эксцентрика;  $B_{17}$  – ширина подшипника на эксцентрике;  $D_{spr}$  – диаметр шарового плунжера

Процедура поиска решений на семантической сети путем ее преобразования в ориентированный граф подробно описана в [3]. Расчет значений параметров сети представляет собой комби-

нацию методов по координатного спуска и случайного поиска.

Путем сравнения результатов проектирования по методике, изложенной в [4], и с использованием системы COMPACT



установлено, что подход, учитывающий функциональные взаимосвязи между параметрами конструкции, дает возможность снизить, например, удельную материалоемкость редукторов такого типа на 8...22 %.

Представленный способ поиска решений на основе функциональной семантической сети позволяет также обеспечить управление процедурой контроля (диагностики) параметров.

Рассмотрим решение задачи контроля геометрических параметров на примере простейшего трехступенчатого вала (рис. 4). На его схеме латинскими буквами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  в рамках обозначены

конструктивные элементы вала (только в осевом направлении, т. е. торцы), а составляющие звенья, определяющие все возможные варианты простановки размеров между конструктивными элементами, – прописными символами  $A_1...A_6$ . При этом элементарными звеньями, определяющими расстояние между соседними конструктивными элементами и не представляющими собой сумму других составляющих звеньев, являются размеры  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . Размеры  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_6$  представляют собой комбинацию указанных элементарных звеньев.

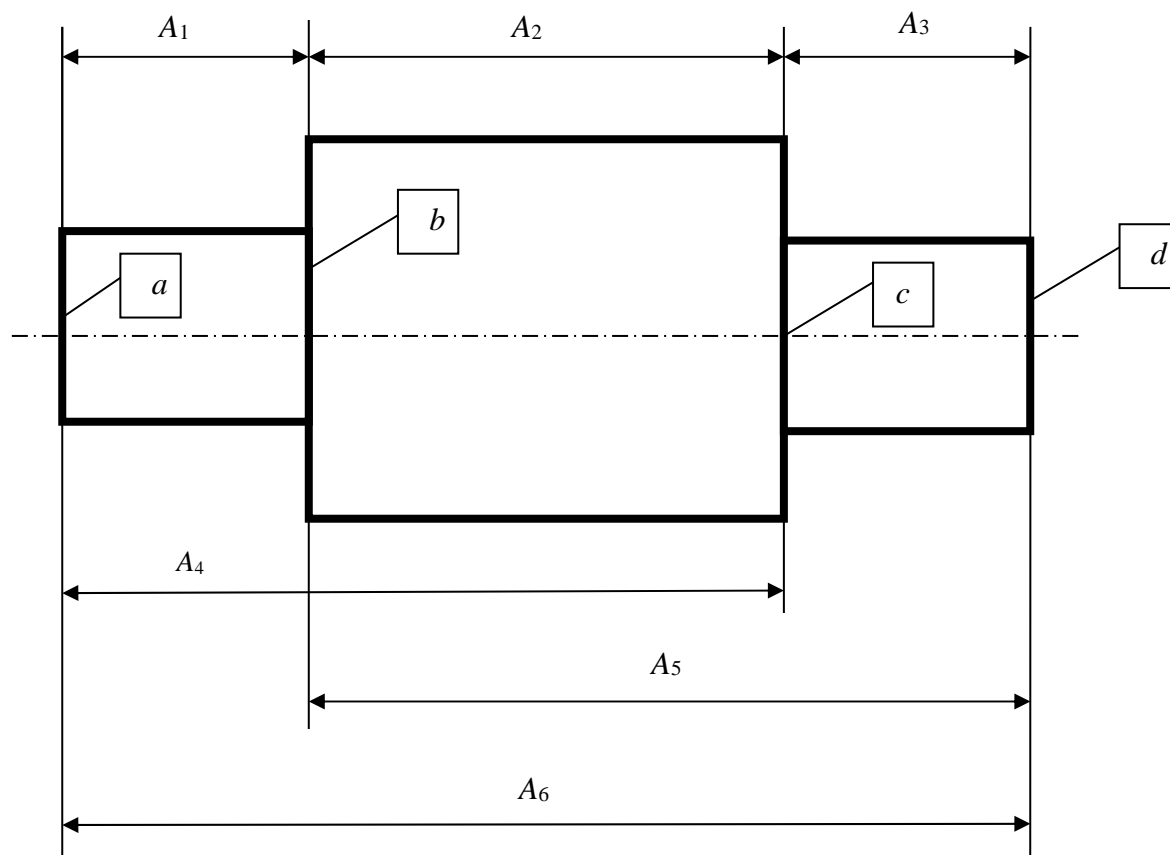


Рис. 4. Конструктивные элементы и размерные цепи трехступенчатого вала

Очевидно, что расстановка размеров на чертеже может быть реализована несколькими различными способами. Возможные варианты расстановки размеров могут быть сформированы на основе анализа структурной модели вала в форме комбинаторного графа, вершины которого

соответствуют элементарным звеньям, а ребра – проставляемому между ними размеру. Вершины такого графа соединены по принципу «каждый с каждым», т. е. позволяют учесть все возможные варианты простановки размеров между конструктивными элементами (рис. 5, а).



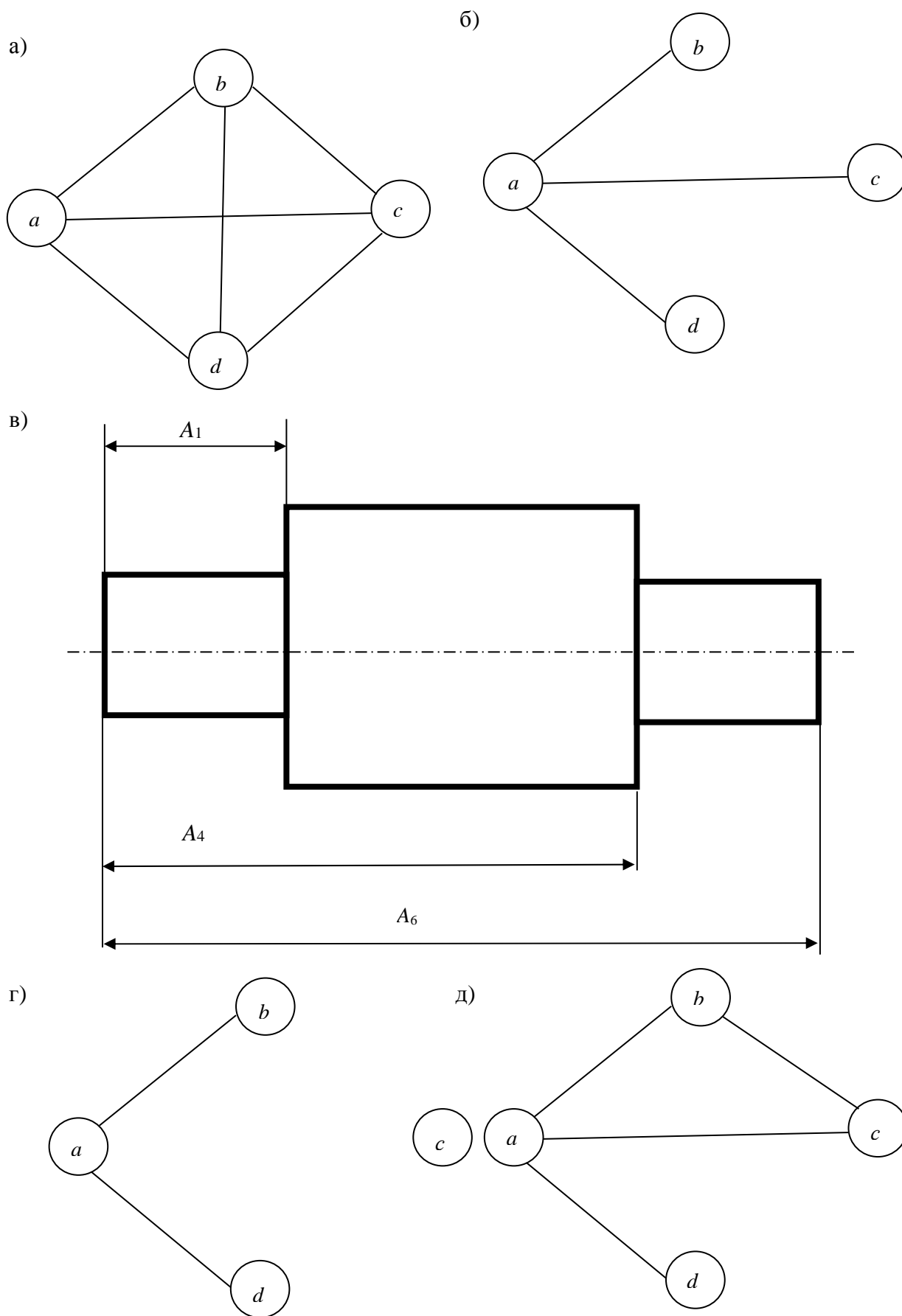


Рис. 5. Структурные модели размерных цепей вала в форме комбинаторных графов





Граф обладает следующими свойствами:

1) количество вершин графа  $n$  равно количеству конструктивных элементов детали;

2) количество ребер, соединяющих между собой вершины всеми возможными способами, равно  $(n - 1)!$ .

Можно также показать, что любому способу расстановки размеров на чертеже соответствует некоторое подмножество ребер комбинаторного графа, при этом:

1) допустимому способу расстановки размеров на чертеже соответствует подмножество из  $n - 1$  ребер комбинаторного графа, соединяющих между собой все вершины;

2) подмножество ребер, описывающее допустимый способ расстановки размеров на чертеже, представляет собой дерево комбинаторного графа, т. е. такую совокупность ребер, в которой отсутствуют циклические последовательности. Так, на рис. 5, б изображена граф-модель допустимого способа расстановки размеров в форме дерева, соответствующая рис. 5, в;

3) если число ребер меньше  $n - 1$ , положение некоторых конструктивных элементов детали будет неопределённым в пространстве относительно других элементов (проставлены не все требующиеся размеры). Пример недопустимого способа расстановки размеров приведен на рис. 5, г: не определено положение поверхности  $c$  относительно других поверхностей;

4) если число ребер больше  $n - 1$ , положение некоторых конструктивных элементов детали будет переопределённым в пространстве относительно других элементов (проставлено размеров больше требующегося количества). Пример такого недопустимого способа приведен на рис. 5, д: проставлены размеры  $ab$  ( $A_1$ ),  $bc$  ( $A_2$ ), а затем их последовательность продублирована общим размером  $ac$  ( $A_4$ );

5) любая вершина графа, из кото-

рой выходит более одного ребра, является конструкторской (измерительной) базой детали, т. е. поверхностью, относительно которой задано положение в пространстве не менее двух других поверхностей.

Таким образом, на основе анализа комбинаторного графа детали могут быть сформированы все возможные варианты расстановки размеров, определены измерительные базы для их контроля и соответствующий набор контролируемых размеров, а также последовательность их измерений. Комбинаторные задачи при этом удобно решать на семантической сети, представляющей один из вариантов вышеприведенного комбинаторного графа, где для удобства ребра, соединяющие конструктивные элементы деталей, обозначены привычными звеньями размерных цепей и изображены в форме вершин семантической сети.

Так, например, для рассмотренного ранее трехступенчатого вала соответствующая семантическая сеть изображена на рис. 6.

Очевидно, что данная сеть наследует следующие свойства комбинаторного графа:

1) количество элементарных звеньев  $m = n - 1$ ;

2) количество отношений сети равно количеству составных звеньев (количеству размерных цепей, составленных из элементарных звеньев) и эквивалентно сумме первых  $m$  чисел целочисленного ряда:

$$N_r = \sum_{i=1}^m (m - i) = \frac{m(m - 1)}{2}.$$

Как видно из рисунка, вершины, соответствующие размерам вала, могут быть разделены на два типа.

Вершины первого типа ( $A_1, A_2, A_3$ ) выделены на рисунке жирно, соответствуют элементарным звеньям и выступают в этой связи составляющими для построения составных звеньев. Призна-



ком таких вершин является наличие нескольких связей с вершинами-соотношениями семантической сети. Так, например, у размера  $A_2$  таких связей три, т. е. конструктивные элементы, об-

разующие размер  $A_2$ , едины для трех других размеров. Это означает, что данные вершины соответствуют конструкторским (измерительным) базам детали.

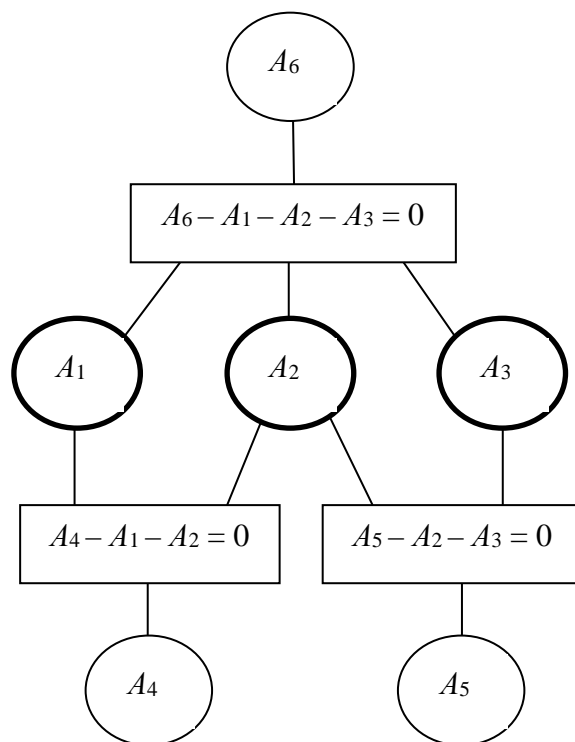


Рис. 6. Семантическая сеть для размерных цепей трехступенчатого вала

Вершины второго типа –  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_6$  (на рисунке показаны без выделения) – представляют собой размеры, являющиеся замыкающими по отношению к элементарным звеньям  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  (т. е. составлены из них). Признаком таких вершин будет наличие единственной связи с какой-либо вершиной-соотношением.

Использование данных обстоятельств позволяет на основе семантических сетей автоматизировать процедуру решения задачи о выборе рационального плана контроля.

Так, очевидно, что при поэлементном контроле размеров изделия необходимо выбирать последовательность действий, которая обеспечит за минимальное количество измерений получе-

ние полной информации о всей совокупности размерных цепей детали. Такой последовательности отвечает план контроля, основанный на измерениях элементарных звеньев. Размеры же составных звеньев при этом будут получены как результат косвенных измерений (сумма соответствующих элементарных звеньев).

В том случае, если ряд размеров изделий не подлежит контролю (например, имеет свободный допуск или обеспечивается технологически), из семантической сети удаляют соответствующие вершины, а для оставшихся, подлежащих контролю, вершин решают вышепредставленным способом задачу об определении минимально необходимого числа измерений.





При комплексном контроле аналогичным образом определяется минимальный объем измерений составных звеньев, максимально характеризующий совокупность требуемых характеристик изделия. При этом из рассмотрения могут быть исключены размеры, имеющие допуски, значительно превосходящие допуски контролируемых размеров.

Аналогичный подход может быть применен для диагностики машин по набору косвенных диагностических признаков. Таким косвенным признаком может быть, например, кинематическая погрешность передач.

В [6] показано, что кинематическая погрешность представляет собой весьма информативную характеристику состояния механических передач, которая может быть использована для их безразборной диагностики. В этой же работе отображены результаты моделирования кинематической погрешности передач при наличии у них элементарных погрешностей (эксцентриситеты и перекосы ведущего и ведомого валов, накопленная погрешность шага, погрешности профиля элементов зацепления и т. п.). Как правило, результаты математического (геометрического) моделирования кинематической погрешности, вызванной такими элементарными погрешностями, достаточно тесно коррелируют с результатами измерений. При этом, однако, одна и та же элементарная погрешность может влиять одновременно на несколько спектральных составляющих кинематической погрешности. В этой связи при диагностировании передач по амплитудно-частотному спектру кинематической погрешности возникает задача по разделению влияния элементарных погрешностей на составляющие спектра. Данная задача в общем случае носит нетривиальный характер, однако может быть решена на основе использования функциональных семантических сетей.

При таком подходе на первом эта-

пе определяют корреляционные связи между элементарными погрешностями  $\pi_i$  и амплитудами спектральных составляющих кинематической погрешности  $A_j$  в форме функций  $A_j = f_j(\pi_1; \pi_2; \pi_3, \dots, \pi_n)$ . Далее, исходя из результатов контроля кинематической погрешности  $F_{кп}$  и ее разложения в амплитудно-частотный спектр, получают в неявном виде функциональную семантическую сеть, в которой отношения представлены в форме  $A_j - f_j(\pi_1; \pi_2; \pi_3, \dots, \pi_n) = 0$  (рис. 7). Процедура диагностики передачи, т. е. поиска элементарных погрешностей передач  $\pi_i$ , приводящих к возникновению спектральных составляющих  $A_j$ , сводится в этом случае к процедуре поиска параметров семантической сети.

Так как функции  $A_j = f_j(\pi_1; \pi_2; \pi_3, \dots, \pi_n)$  являются приближенными, а экспериментальная запись сигнала кинематической погрешности  $F_{кп}$  искажена помехами, то в общем случае поиск решения на семантической сети может не сходиться. В этой связи полученные решения, как правило, приближенные, а в качестве критерия останова поиска может быть использован, например, квадратичный критерий, минимизирующий невязку экспериментального сигнала кинематической погрешности и кинематической погрешности, смоделированной с применением расчетных значений погрешностей  $\pi_i$ .

### Заключение

1. Рассмотрены методологические принципы построения САПР на базе функциональных семантических сетей, которые могут быть положены в основу алгоритмов компьютерных интеллектуальных систем.

2. Приведен пример функциональной семантической сети для проектирования кулачково-плунжерных редукторов на основе критерия минимизации



удельной материалоемкости.

3. Рассмотрена процедура решения задачи о контроле геометрических параметров деталей на основе использования комбинаторных графов и функ-

циональных семантических сетей.

4. Показана сводимость задач диагностики редукторов к решению задачи поиска на функциональной семантической сети.

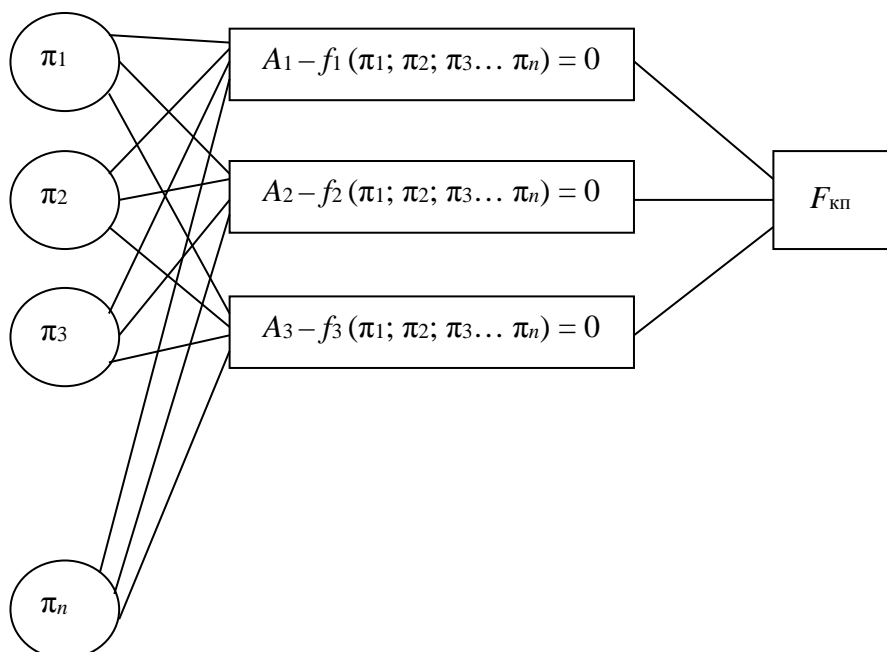


Рис. 7. Семантическая сеть для диагностики редукторов по амплитудно-частотному спектру кинематической погрешности

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкевич, В. М. Методология автоматизированного проектирования механизмов на основе использования функциональных семантических сетей и процедуры обучения / В. М. Пашкевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 36–45.
2. Пашкевич, В. М. Методологические принципы проектирования машин на основе функциональных семантических сетей / В. М. Пашкевич // Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития : материалы Юбилейной междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2016. – С. 118–119.
3. Пашкевич, В. М. Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 210 с.
4. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, А. М. Пашкевич, С. В. Чертков. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
5. Пашкевич, В. М. Функциональная семантическая сеть для расчета параметров радиально-плунжерного редуктора / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Современные проблемы машиноведения : XI Междунар. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Гомель, 2016. – С. 40.
6. Пашкевич, В. М. Самообучающиеся системы искусственного интеллекта в машиностроении : [монография] / В. М. Пашкевич, Ж. А. Мрочек. – Могилев : МГТУ, 2003. – 434 с.

Статья сдана в редакцию 2 августа 2017 года

**Виктор Михайлович Пашкевич**, д-р техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: pvm@bk.ru.

**Viktor Mikhailovich Pashkevich**, DSc, (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: pvm@bk.ru.

Машиностроение

