

## О СОВРЕМЕННОМ УРОВНЕ КОМПЬЮТЕРНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ

### Введение

Несмотря на впечатляющие успехи в области разработки и совершенствования CAD\CAM\CAE – систем, остается недостаточно разработанная ниша, связанная с автоматическим или автоматизированным синтезом структур механических систем.

Синтез структурных схем, представляющий собой процесс многократного построения графических изображений, в век безбумажных информационных технологий производится, как правило, с использованием карандаша и бумаги.

Попытки использования электронных вычислительных машин для автоматизации структурного синтеза механизмов предпринимались еще в семидесятых годах XX столетия и, тем не менее, до настоящего времени эта задача не может считаться полностью решенной даже для плоских шарнирных систем [1]. Связано это с тем, что синтез структур под управлением компьютерной программы, основанной на парадигме процедурно-ориентированного подхода, предполагает наличие математической модели, которая корректно отображала бы все шаги процесса конструирования структурной схемы в форме уравнений, неравенств, логических условий, и других зависимостей, описываемых в структурной теории механизмов в словесной форме. К сожалению, такой модели до настоящего времени не создано.

Совершенно очевидно, что инициативные исследования частных структур с небольшим числом звеньев не могут быть основой для развития научно-обоснованного структурного синтеза. По мере усложнения проектируемых изделий возможности человека в решении такого рода задач сужаются, поэтому поиск новых эффективных методов структурного синтеза является актуальной проблемой развития математического обеспечения систем автоматизации проектных работ.

Необходимыми и достаточными условиями, позволяющими утверждать, что задача компьютерного синтеза структур механизмов в настоящее время практически разрешима, являются:

- формула подвижности кинематической цепи В. В. Добровольского, связывающая числа звеньев и кинематических пар с подвижностью системы, с учетом общего числа связей наложенных на нее;
- универсальная структурная система (УСС) проф. Л. Т. Дворникова, позволяющая определять состав кинематических цепей любой сложности;
- инвариантность структурных схем по отношению к конфигурации и материалу звеньев, их геометрическим размерам, областям применения проектируемых механизмов и т.п.;
- принципиально неограниченные ресурсы современных персональных компьютеров (объемы памяти, быстродействие процессоров);
- событийно-управляемая модель функционирования компьютерных программ;
- объектно-ориентированный подход, используемый при разработке методов компьютерного моделирования систем.

### Определение состава кинематической цепи

Попытки использования различных соотношений для нахождения состава цепи предпринимались и ранее. М. Грюблер, к примеру, отождествляя сложность звена с числом его геометрических элементов, для подсчета общего числа кинематических пар приводит в [2] следующую зависимость

$$\sum p = 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + \dots ,$$

где:  $n_2, n_3, n_4$  – соответственно число двух-, трех-, четырехпарных и т.д. звеньев. Однако М. Грюблер не показал, как получить значения слагаемых, каким образом ограничить бесконечный ряд, но самое главное заключается в том, что, выбрав в качестве показателя сложности звена число его геометрических элементов, нельзя получить полное многообразие вариантов структур при заданном общем числе звеньев.

Существенный вклад в решение этой проблемы внес проф. Л. Т. Дворников. Рассматривая в качестве объекта исследований геометрический образ кинематической цепи, он выделил в технологии ее построения начальный образ – максимально сложное звено цепи, названное им  $\tau$  – угольником. Понятие  $\tau$  – угольника явилось важным понятием, которое позволило ограничить типоряд применяемых звеньев и, тем самым, превратить бесконечные ряды в конечные. В качестве критерия сложности звена выбрано число кинематических пар привносимых этим звеном в цепь. Добавив еще два уравнения к формуле подвижности В. В. Добровольского, проф. Л. Т. Дворников получил систему уравнений, целочисленные решения которой позволяют определить состав кинематической цепи при заданных исходных данных, которыми являются: подвижность цепи, число общих связей, наложенных на систему, максимально допустимая сложность применяемых звеньев и общее их число.

$$\begin{cases} \sum_{m+1}^5 p_k = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + i \cdot n_i + \dots + 2n_2 + n_1, & (1.1) \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1, & (1.2) \\ W = (6 - m)n - \sum_{m+1}^5 (k - m)p_k, & (1.3) \end{cases}$$

Здесь:  $W$  – подвижность системы;  $n$  – число подвижных звеньев;  $m$  – число общих связей, наложенных на систему;  $\tau$  – максимальная сложность используемых звеньев;  $k$  – класс применяемых кинематических пар;  $n_i$  – число звеньев, привносящих в цепь  $i$  кинематических пар;  $p_k$  – число пар  $k$ -го класса.

Поскольку полученная система уравнений была применима к описанию структур кинематических цепей любой сложности, она была названа универсальной структурной системой (УСС).

Особенностью этой системы уравнений является то, что получаемые значения  $n_i$  представляют собой числа не реальных, а виртуальных звеньев, привносящих в кинематическую цепь, число кинематических пар, соответствующее индексу звена. В реальные звенья они превращаются на этапе конструирования конкретных образов структурных схем.

### Решение системы

При небольшом количестве звеньев цепи целочисленные решения системы могут быть получены вручную путем несложных математических преобразований. При увеличении количества звеньев и максимально допустимой их сложности ручные расчеты становятся уже непосильными. Для автоматизации процесса поиска целочисленных решений системы был разработан алгоритм и компьютерная программа, позволяющая определять состав структурных схем для любых механических систем.

Идея получения целочисленных решений системы основана на том, что если каким-то образом получить набор звеньев той или иной сложности, общее число которых равно  $n$ , то, используя уравнение (1.1) УСС, можно получить общее число кинематических пар цепи. Зная общее число кинематических пар цепи, можно сформировать набор пар разрешенных к

применению классов таким образом, чтобы он вкупе с набором звеньев превращал уравнение (1.3) УСС в тождество. Наборы звеньев и пар, для которых уравнение (1.3) УСС превращается в тождество, и есть целочисленные решения системы. Таким образом, для решения системы необходимы два генератора (звеньев и пар), калькулятор, компаратор (для анализа), регистратор и визуализатор решений. «Интеллектуальную» основу программы составляют генераторы наборов звеньев и пар. В зависимости от алгоритмов их работы может быть осуществлен случайный или детерминированный, полный или частичный поиск возможных решений системы. Структура программы представлена на рис. 1.

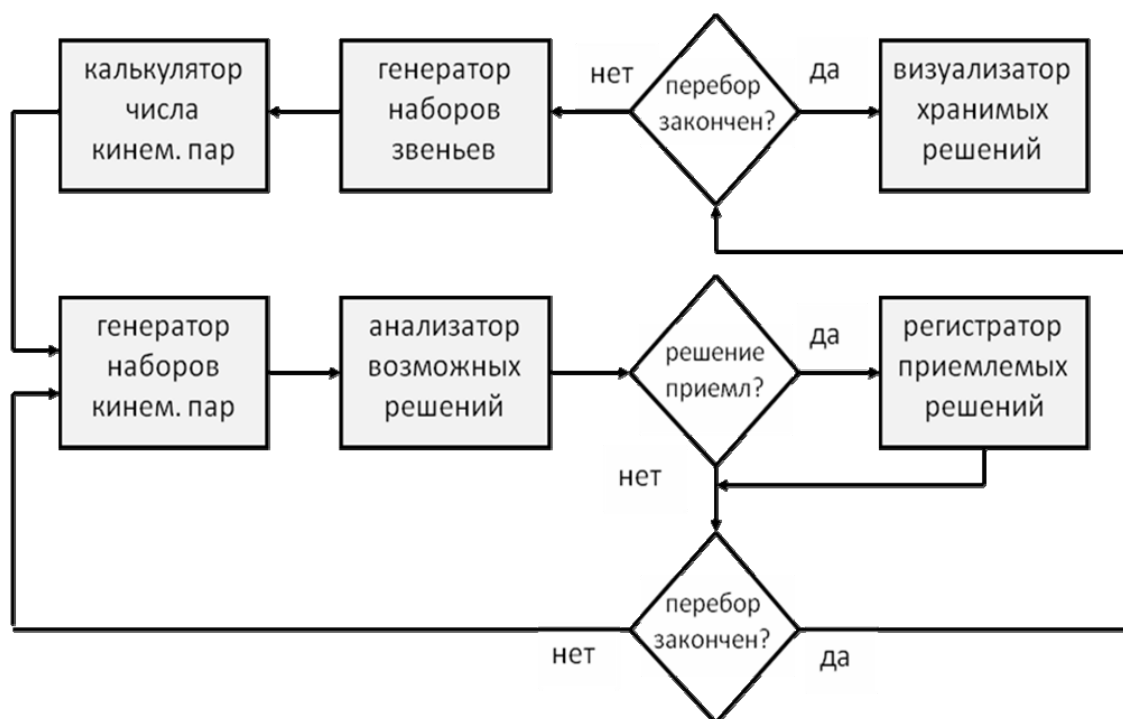


Рис. 1. Структура программы поиска целочисленных решений системы

Тестирование программы на различных задачах подтвердило ее работоспособность и высокую эффективность поиска решений.

Расчеты для реальных данных, при которых ручные расчеты невозможны, показали, что при имеющейся структурной классификации кинематических цепей пространство получаемых решений может быть достаточно велико. Для пяти звеньев, к примеру, при  $\tau = 3$  в нулевом семействе получается 187 различных наборов звеньев и кинематических пар, с помощью которых могут быть созданы цепи с заданными параметрами. Из этого следует, что необходима дальнейшая структуризация кинематических цепей для локализации решаемых задач.

Еще академик И. И. Артоболевский высказывал мысль о том, что структурная классификация кинематических цепей не должна заканчиваться делением их на семейства и “представляет собой только первый этап структурной классификации современных механизмов” [3; стр. 92]. Для ее развития необходимо искать и добавлять новые классификационные признаки. В качестве одного из таких признаков можно принять совокупность классов применяемых кинематических пар. В этом случае каждое из семейств механизмов распадается на несколько подсемейств, отличающихся сочетаниями классов применяемых кинематических пар [4].

Для работы с подсемействами была разработана компьютерная программа, рабочее окно которой представлено на рис. 2. Как видно из рисунка, левая панель предназначена для ввода исходных данных, а на правой панели выводятся результаты. При задании числа общих связей, наложенных на систему в целом, блокируется возможность использования соответствующих классов кинематических пар. В оставшемся наборе классов кинематических пар выбираются те, которые разрешены к применению для данного подсемейства.

Универсальность алгоритма поиска решений при использовании подсемейств обеспечивается путем изменения уравнения подвижности (1.3) универсальной структурной системы. Формулы подвижности для каждого из подсемейств приведены в [4].

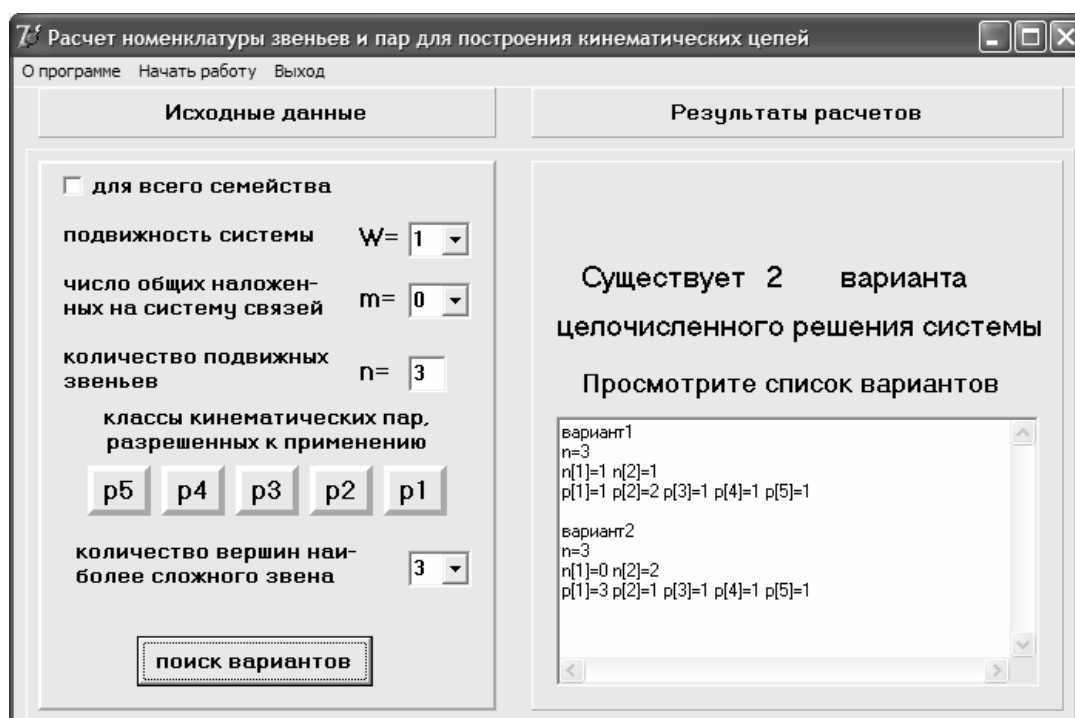


Рис. 2. Рабочее окно программы поиска целочисленных решений УСС

### Технология конструирования структурных схем

После того, как получена номенклатура звеньев и кинематических пар, начинается второй этап структурного синтеза, – получение многообразия вариантов соединения звеньев между собой. Для реализации этого этапа был разработан инструментарий, необходимый и достаточный для моделирования самого процесса конструирования структур на примере плоских шарнирных механизмов. Под инструментарием здесь подразумеваются: методология, методы, алгоритмы и компьютерные программы, необходимые для компьютерного конструирования структурных схем [5].

В основу разработанной методологии положена парадигма объектно-ориентированного подхода, суть которого состоит в представлении предметной области (в данном случае графического образа структурной схемы) в виде взаимодействующей совокупности объектов, каждый из которых имеет свой жизненный цикл и формы взаимодействия с другими объектами. В результате декомпозиции предметной области были выделены следующие объекты: звено, контур, гнездо контуров, фрагмент, борт фрагмента, кинематическая пара (рис. 3).

Поскольку большая часть структурных схем представляет собой полигональные модели, имеющие в своем составе изменяемые замкнутые контуры, в качестве универсального

множества были выбраны структуры с изменяемыми замкнутыми контурами. Структурные схемы без контуров представляются в виде структурных схем с одним незамкнутым контуром. Таким образом, любая структурная схема состоит из двух частей: гнезда контуров и периферийной части. В первую очередь формируется гнездо контуров, к которому присоединяется периферийная часть.

Структурная схема развивается путем присоединения новых звеньев к одной из ограничивающих сторон или борту полученного ранее фрагмента. Начальным фрагментом служит самое сложное звено цепи, так называемый  $\tau$ -угольник.

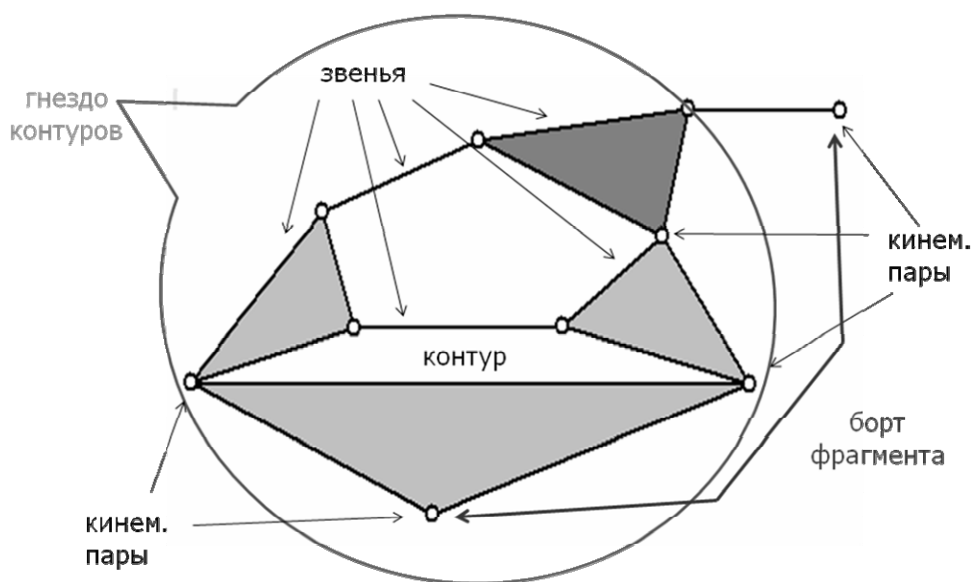


Рис.3. Объекты структурной схемы

Только в процессе конструирования конкретной структурной схемы виртуальные звенья превращаются в реальные. Число геометрических элементов реального звена определяется как сумма выходов построенного ранее фрагмента, к которым присоединяется новое звено, и числа кинематических пар, привносимых звеном в цепь (рис. 4).

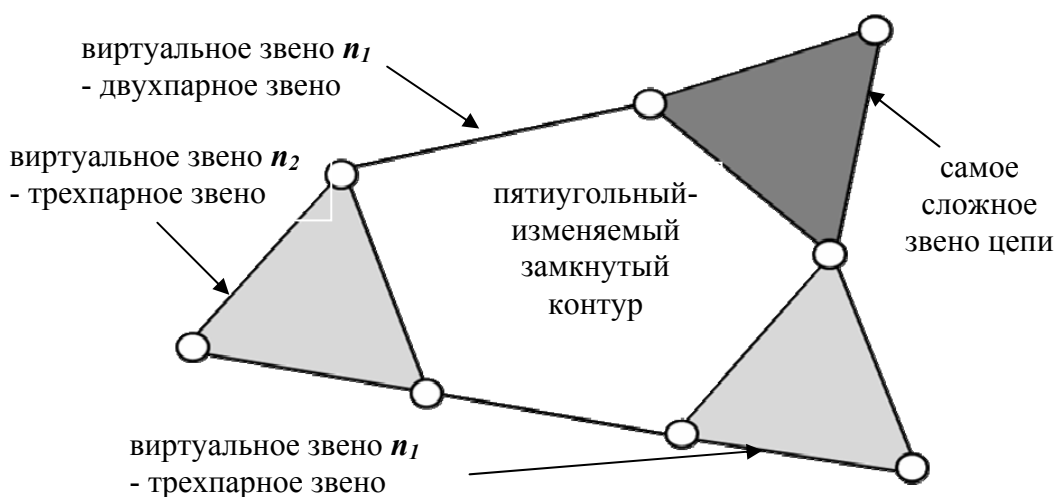


Рис. 4. Превращение виртуальных звеньев в реальные

Виртуальные звенья  $n_1$  привносят в цепь по одной паре. Верхнее звено присоединяется к одному единственному выходу построенного ранее фрагмента, сумма его геометрических

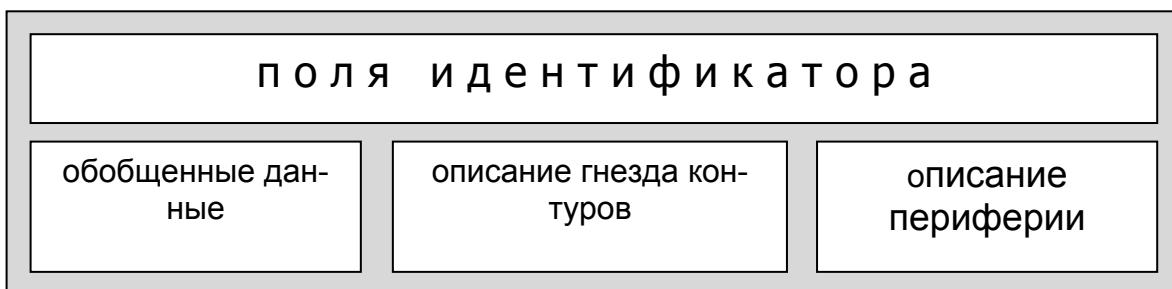
элементов равна двум, а нижнее звено присоединяется к двум выходам построенного ранее фрагмента, и сумма его геометрических элементов равна трем.

### Хранение, отбраковка и воспроизведение структур

Образы структурных схем в памяти компьютера представляют собой наборы чисел, определяющих свойства и взаимное расположение звеньев. Эти наборы чисел по требованию пользователя преобразуются с помощью компьютерных процедур в геометрические образы.

В процессе конструирования полного многообразия структурных схем кроме работоспособных структур могут получаться и непригодные, и так называемые изоморфные структуры. Их необходимо отбраковывать, что осуществляется с помощью распределенного фильтра, блоки которого подключаются на различных этапах формирования структурной схемы. Блоки распределенного фильтра производят сравнение каждого вновь сформированного фрагмента с уже имеющимися в стековой области фрагментами структурных схем. Вместо проверки графических образов на конгруэнтность производится сравнение формализованных символьных описаний - идентификаторов.

Идентификатор структурной схемы формируются при построении первого звена цепи и изменяется в процессе ее развития. Он представляет собой наборы чисел, логически объединенные в три блока (рис. 5).

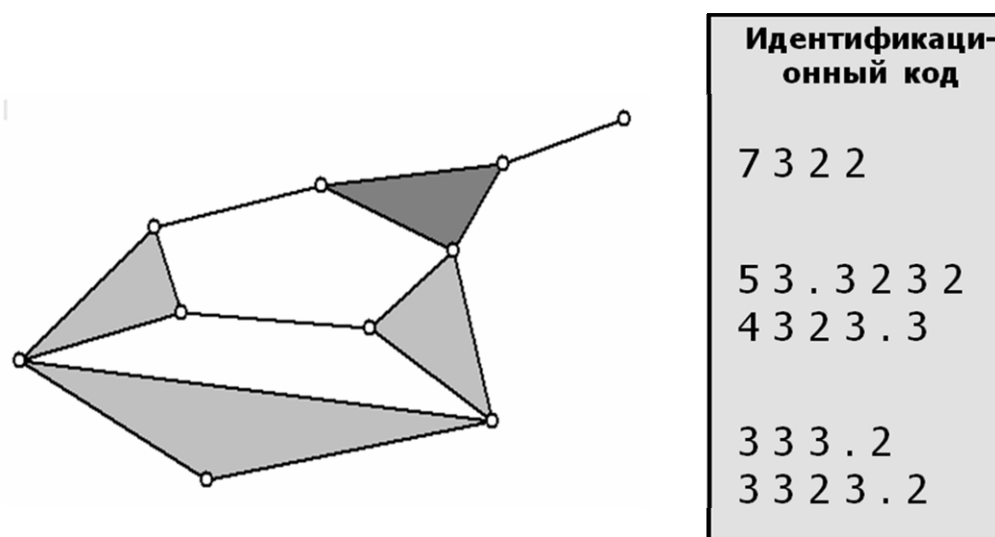


*Рис.5. Структура идентификатора кинематической цепи*

С помощью этих наборов чисел легко и просто воспроизводится графический образ структурной схемы как вручную, так и с помощью несложных компьютерных программ. В качестве иллюстрации на рис. 6 показан пример идентификатора для семизвенной кинематической цепи.

Число подвижных звеньев этой цепи равно семи, максимальная сложность звеньев равна трем, она имеет два изменяемых замкнутых контура и два выхода. Это описание представляет собой обобщенные данные (метаданные), состоящие из четырех цифр – 7322 (см. рис. 6).

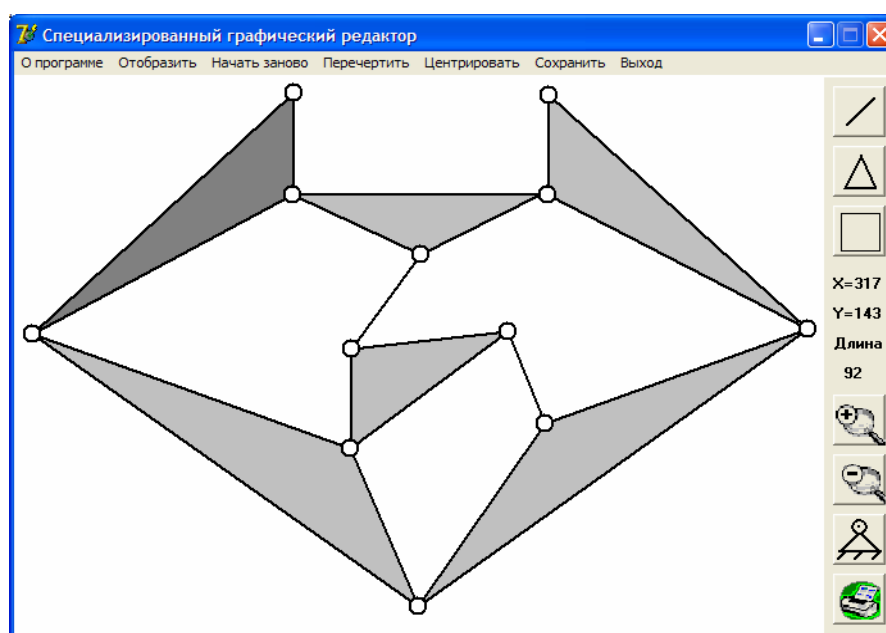
Далее (во второй и третьей строках) следует закодированное описание гнезда контуров. Гнездо состоит из двух контуров. Каждый контур описывается одной строкой. Описание первого контура будет следующим. Это пятиугольный изменяемый замкнутый контур (первая цифра строки). Образован он следующим образом: к одной из сторон самого сложного звена цепи (треугольника) присоединены последовательно: трехпарное, двухпарное, трехпарное и двухпарное звенья. Описание этого контура представляет собой шесть цифр, имеющих любой разделитель (выбрана звездочка для того, чтобы разделитель не совпадал с точкой) – 53\*3232. Второй четырехугольный (первая цифра) изменяемый замкнутый контур образован путем присоединения к борту фрагмента, на котором расположены трехпарное, двухпарное и трехпарное звенья, одного трехпарного звена. Описание этого контура состоит из пяти цифр - 4323\*3.



*Рис. 6. Пример идентификации кинематической цепи*

В последних двух строках расположено описание бортов полностью сформированной структурной схемы. Количество бортов соответствует числу выходов. Для нашего примера их два. Закодированные описания бортов будут представлять собой две строки: 333\*2 и 3323\*2.

При построении цепи вручную необходимо построить самое сложное звено цепи. В соответствии с описанием первого из контуров строится проволочный многоугольник, на который нанизываются соответствующие звенья. Далее возникнет необходимость в деформировании некоторых из звеньев, чтобы сформировать второй изменяемый замкнутый контур. Резинкой уничтожают какие-то многоугольники, смещают их вершины, формируют второй изменяемый замкнутый контур и, возможно, повторяют это не раз.



*Рис. 7. Окно специализированного графического редактора*

Реализация безбумажной технологии интерактивного синтеза возможна при использовании специализированных графических редакторов. Для примера на рисунке 7 представлено окно такого редактора. С помощью этого редактора может быть сконструирована структурная схема кинематической цепи любой шарнирной системы.

Парадигма объектно-ориентированного подхода, достаточные ресурсы современных персональных компьютеров и свойство инвариантности структурных схем вкуче с универсальной структурной системой проф. Л. Т. Дворникова являются необходимыми и достаточными условиями для разработки алгоритмического и программного обеспечения автоматизированного синтеза структур механизмов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пейсах Э.Е., Нестеров В.А.** Система проектирования плоских рычажных механизмов / Под ред. Фролова. – М.: Машиностроение, 1988. – 232 с., ил.
2. **Grubler M.** *Gegtriebelehre. Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebene Mechanismen.* - Berlin: Springer-Verlag, 1917.
3. **Артоболевский И.И.** Теория механизмов и машин: Учебник для вузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
4. **Дворников Л.Т.** К вопросу о классификации механизмов / Л.Т. Дворников, А.В. Степанов // Изв. Томского политехн. универ-та. 2002, №2. Том 314. С. 31-34.
5. **Степанов А.В.** Методологические основы компьютерного синтеза структур плоских механических систем с вращательными парами пятого класса. – Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. №1(67). С. 21-29.