

УДК 621.941.23

Ю.Н. Кузнецов¹, д-р техн.наук, П.М. Неделчева², канд.техн.наук, Р.С. Атанасов², асп.

1 – НТУ України «Київський політехнічний інститут», г.Київ, Україна;

2 – Технический университет - Габрово, г.Габрово, Болгария

СТРУКТУРНО - СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦАНГОВЫХ ЗАЖИМНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОВЫШЕННОЙ ОСЕВОЙ ТОЧНОСТИ

Рассмотрен синтез цанговых зажимных механизмов повышенной осевой точности с помощью системно-морфологического подхода, приведена морфологическая матрица схем цанговых патронов и изложена методика исследования конструкции методом конечных элементов и результаты их анализа.

The considered syntheses collet clamping mechanism, raised axial accuracy by means of system-morphological approach, is brought morphological matrix of the schemes collet chuck and is stated methods of the study design, method finite elements and results of the analysis.

В технологической системе машин от характеристик зажимных механизмов (ЗМ) в значительной степени зависит точность и производительность обработки деталей, так как они оказывают существенное влияние на режимы резания, точность установки заготовок и инструментов, стабильность и виброустойчивость технологической системы. Значительную часть среди ЗМ в машиностроении, приборостроении и инструментальном производстве занимают цанговые патроны (ЦП). В этой связи проблема по созданию ЦП, удовлетворяющих повышенным требованиям современного производства, является весьма актуальной.

Структурно-системные исследования динамических систем, к которым относятся ЦП, отличающиеся эволюционным разнообразием структурных разновидностей, определяют необходимость построения и использования моделей высокого уровня обобщения. Эти модели с помощью минимального количества инвариантных критериев позволяют формулировать основные принципы структурного строения ЗМ и определять системные свойства потенциально возможного множества объектов, принадлежащих к этому классу и подклассам системы ЗМ. Методической основой таких исследований являются научно обоснованные классификации, которые одновременно выполняют роль своеобразных системных моделей [9].

Целью настоящей работы является разработка методологических основ машиностроительного инжиниринга, дающих полный комплекс средств для автоматизированного проектирования и анализа ЦП высокой осевой точности.

В этом направлении на протяжении многих лет ведутся работы на кафедре «Конструирования станков и машин» НТУУ «КПИ», где предложен дифференциально-морфологический метод синтеза [2, 3]. Используя эвристический прием полного продольного расчленения зажимного элемента с клиновым передаточно-усилительным звеном в виде губки цанги с наружным конусом (рис. 1.а.), можно достичь высокой осевой точности. При этом синтезированный высокоточный цанговый патрон (ВЦП) содержит две группы зажимных элементов (рис. 1.б.): основных (ОЭ), связанных с приводом и преобразующих осевое движение x от привода тянущего типа за счет клинового передаточно-усилительного звена (ПУЗ) в радиальное перемещение y промежуточных элементов (ПЭ), которые за счет связи с корпусом патрона (шпинделем) исключают их осевое смещение, а следовательно, обеспечивают стабильное положение прутка или отсутствие смещения при зажиме по сравнению с ЦП тянущего типа, где ОЭ выполнен в виде стандартной зажимной цанги (рис. 1.а.), перемещающей прутки губками при зажиме. Чтобы исключить осевое смещение зажимаемой заготовки (прутка), необходимо исключить осевое смещение ОЭ (рис. 1.в.), как это выполняется в одношпиндельных токарно-револьверных автоматах, или расположить входное усилие (R , $P_{окр}$, момент $M_{кр}$) от привода в плоскости, перпендикулярной оси прутка (рис. 1.г.).

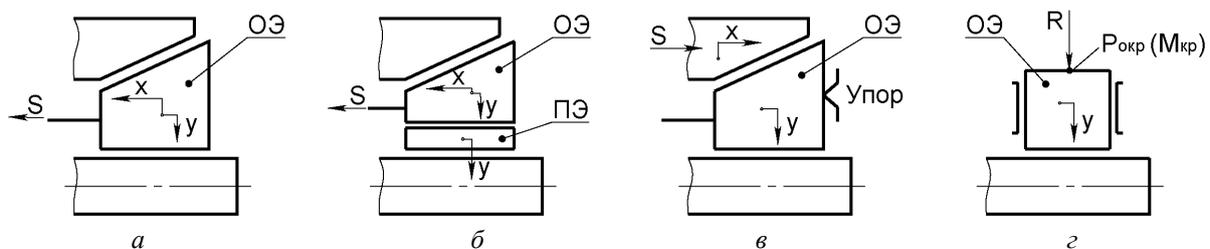


Рис. 1. Структуры зажимных патронов с различным действием усилия от привода зажима:
а, б) тянущее усилие осевое S; в) нажимное усилие осевое S; г) радиальное усилие
окружное (тангенциальное) $P_{окр}$ усилие или крутящий момент ($M_{кр}$)

ВЦП могут применяться для зажима прутков, труб, штучных заготовок и режущих инструментов с цилиндрическим хвостовиком в токарных, сверлильных, фрезерных, многоцелевых и других станках с различными действиями усилия зажима от привода [3].

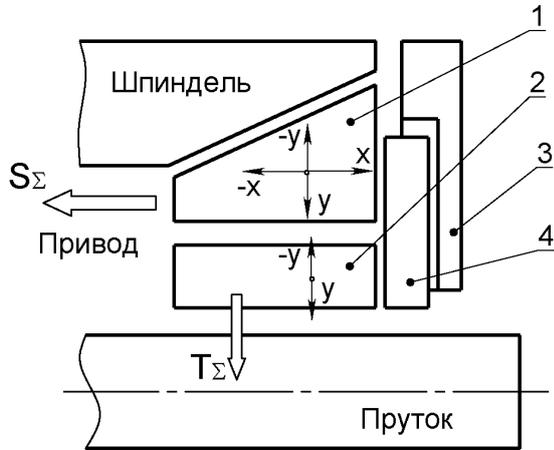


Рис. 2. Структура ВЦП

С₂₋₄ (ПЭ↔ВЭ); С₃₋₄ (Φ↔ВЭ), внешними связями ВЦП со шпинделем (Ш): С_{1-Ш} (ОЭ↔Ш); С_{2-Ш} (ПЭ↔Ш); С_{3-Ш} (Φ↔Ш); С_{4-Ш} (ВЭ↔Ш) и внешними связями ВЦП с объектом закрепления (ОЗ): С_{1-ОЗ} (ОЭ↔ОЗ); С_{2-ОЗ} (ПЭ↔ОЗ); С_{3-ОЗ} (Φ↔ОЗ); С_{4-ОЗ} (ВЭ↔ОЗ).

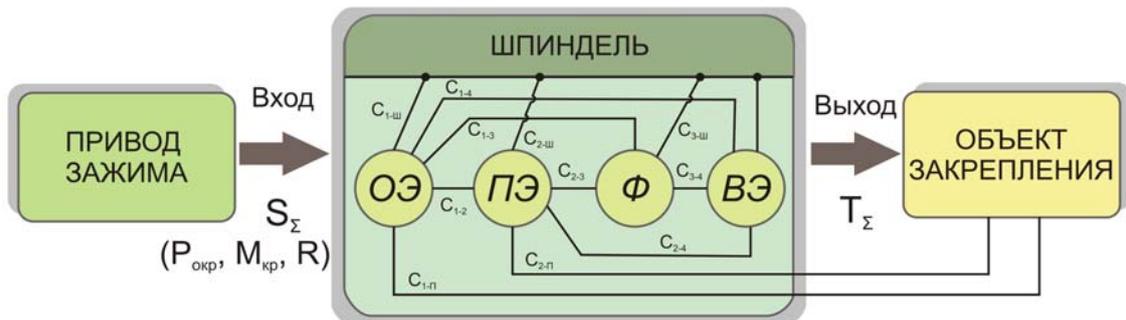


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия элементов ВЦП (внутреннего и внешнего: с приводом – вход; с объектом закрепления - выход)

Так как реально не бывают связи шпинделя с объектом закрепления, то общий граф связей для системы привод зажима - патрон (ВЦП) - объект закрепления не может быть полным, т.е.

$$M_{св}^o = \frac{6(6-1)}{2} - 1 = 14.$$

Вход - действие усилия от привода (У)
В.1. Тянущее осевое S_{Σ}
В.2. Нажимное осевое S_{Σ}
В.3. Скручивающее (тангенциальное) $P_{окр}$ ($M_{кр}$)
В.4. Радиальное R
В.5. Комбинированное
В.6. Объёмное

Выход - объект закрепления (О)
О.1. Пруток круглый
О.2. Пруток гранный
О.3. Пруток профильный вдоль
О.4. Труба
О.5. Штучная заготовка
О.6. Инструмент с цилиндрическим хвостовиком
О.7. Инструмент с коническим хвостовиком

а

б

Рис. 4. Морфология входа – $M_{вх}$ (а) и выхода – $M_{вых}$ (б) в ВЦП

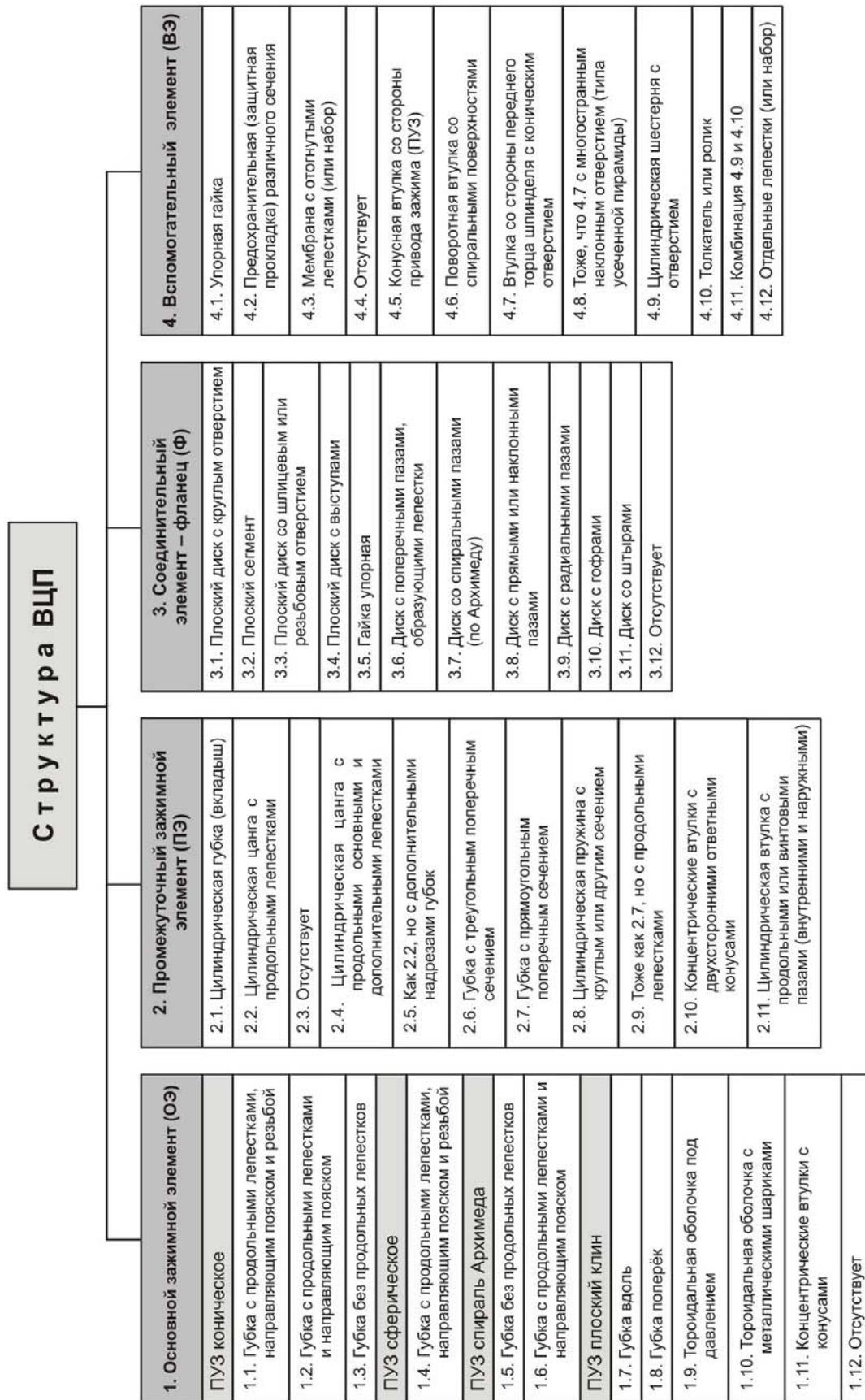


Рис. 5. Морфология структуры – М_{см} ВЦП

Морфологию конструктивных схем ВЦП – $M_{ВЦП}$ с учётом его взаимодействия с приводом зажима (вход) и объектом закрепления (выход) можно представить в виде соединённых между собой пяти морфологических блок-схем, образующих морфологическую модель:

- входа – $M_{вх}$ (рис. 4.а.);
- выхода – $M_{вых}$ (рис. 4.б.);
- структуры ВЦП – $M_{см}$ (рис. 5.);
- связей ВЦП – $M_{св}$ (внутренние – рис. 6.а., внешние – рис. 6.б.).

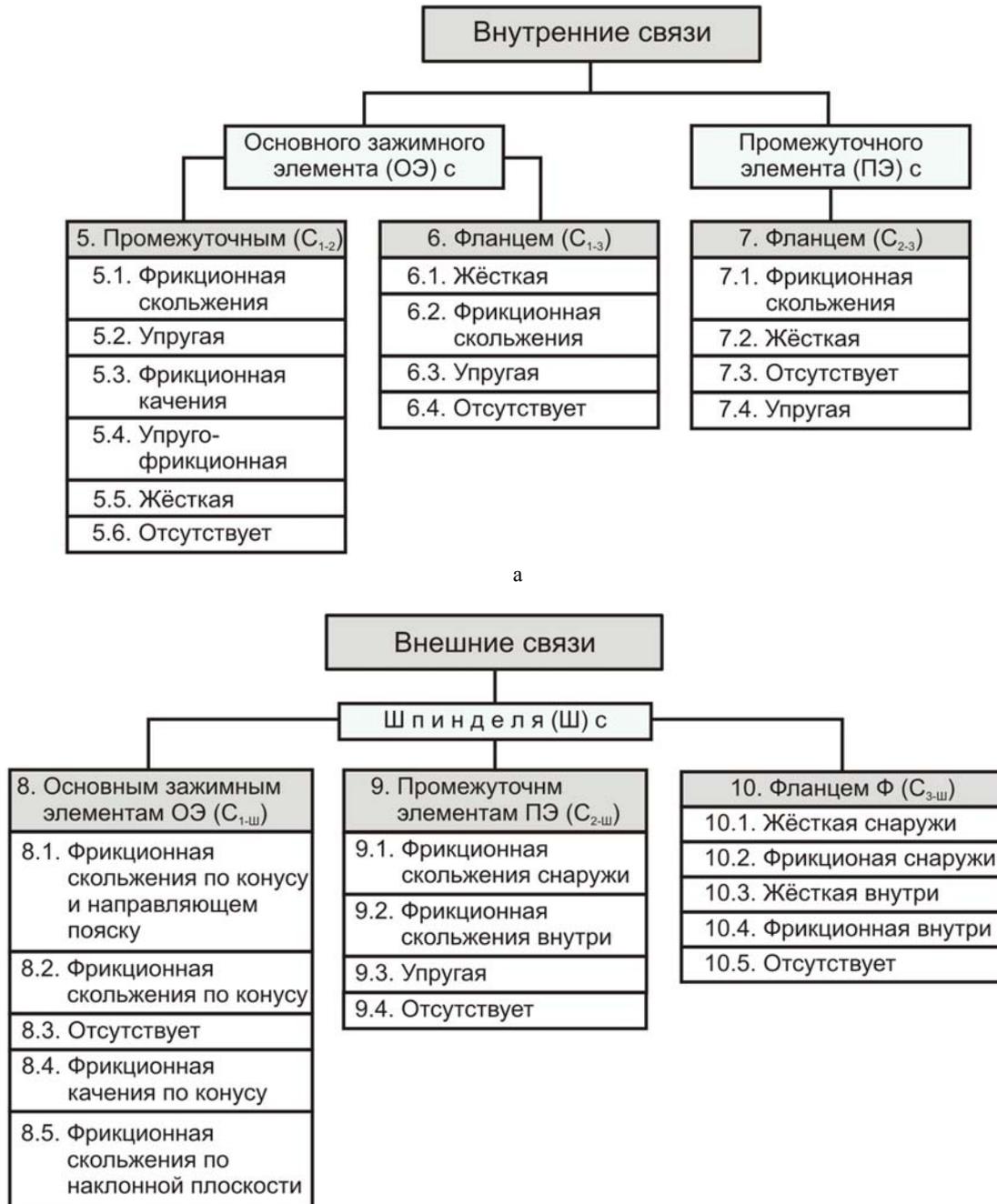


Рис. 6. Морфология связей ВЦП – $M_{св}$ (а – внутренние, б – внешние)

Чтобы не усложнять морфологическую модель конструктивных схем ВЦП лишними признаками связей, перебор их альтернатив следует ограничить, ориентируясь на конструктивное исполнение традиционных шпиндельных узлов токарных автоматов. Поэтому берутся следующие связи, как признаки морфологической модели: C_{1-2} , C_{1-3} , C_{2-3} , $C_{1-ш}$, $C_{2-ш}$, $C_{3-ш}$.

Морфологические блок-схемы (рис. 4 - 6) общей морфологической модели ВЦП могут быть представлены морфологической матрицей в свернутом и развернутом численном виде:

$$M_{ВЦП} = M_{вх} \wedge M_{см} \wedge M_{св} \wedge M_{вых} \quad (1)$$

$$M_{ВЦП} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.3 & 4.3 \\ \begin{matrix} B.1 \\ B.2 \\ B.3 \\ B.4 \\ B.5 \\ B.6 \end{matrix} \wedge & \begin{matrix} 1.4 & 2.4 & 3.4 & 4.4 \\ 1.5 & 2.5 & 3.5 & 4.5 \\ 1.6 & 2.6 & 3.6 & 4.6 \\ 1.7 & 2.7 & 3.7 & 4.7 \\ 1.8 & 2.8 & 3.8 & 4.8 \\ 1.9 & 2.9 & 3.9 & 4.9 \end{matrix} & \wedge & \begin{matrix} 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 & 10.1 \\ 5.2 & 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 & 10.2 \\ 5.3 & 6.3 & 7.3 & 8.3 & 9.3 & 10.3 \\ 5.4 & 6.4 & 7.4 & 8.4 & 9.4 & 10.4 \\ 5.5 & & & 8.5 & & 10.5 \\ 5.6 & & & & & \end{matrix} & \begin{matrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \end{matrix} \end{matrix} \quad (2)$$

Общее число возможных и невозможных конструктивных схем ВЦП является

$$N_{ВЦП} = |6 \cdot |12 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 12| \cdot |6 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 5| \cdot |7| = |6| \cdot |20736| \cdot |9600| \cdot |7| = 7664025600.$$

Для различных приводов зажима и объектов закрепления получается миллиардное число вариантов.

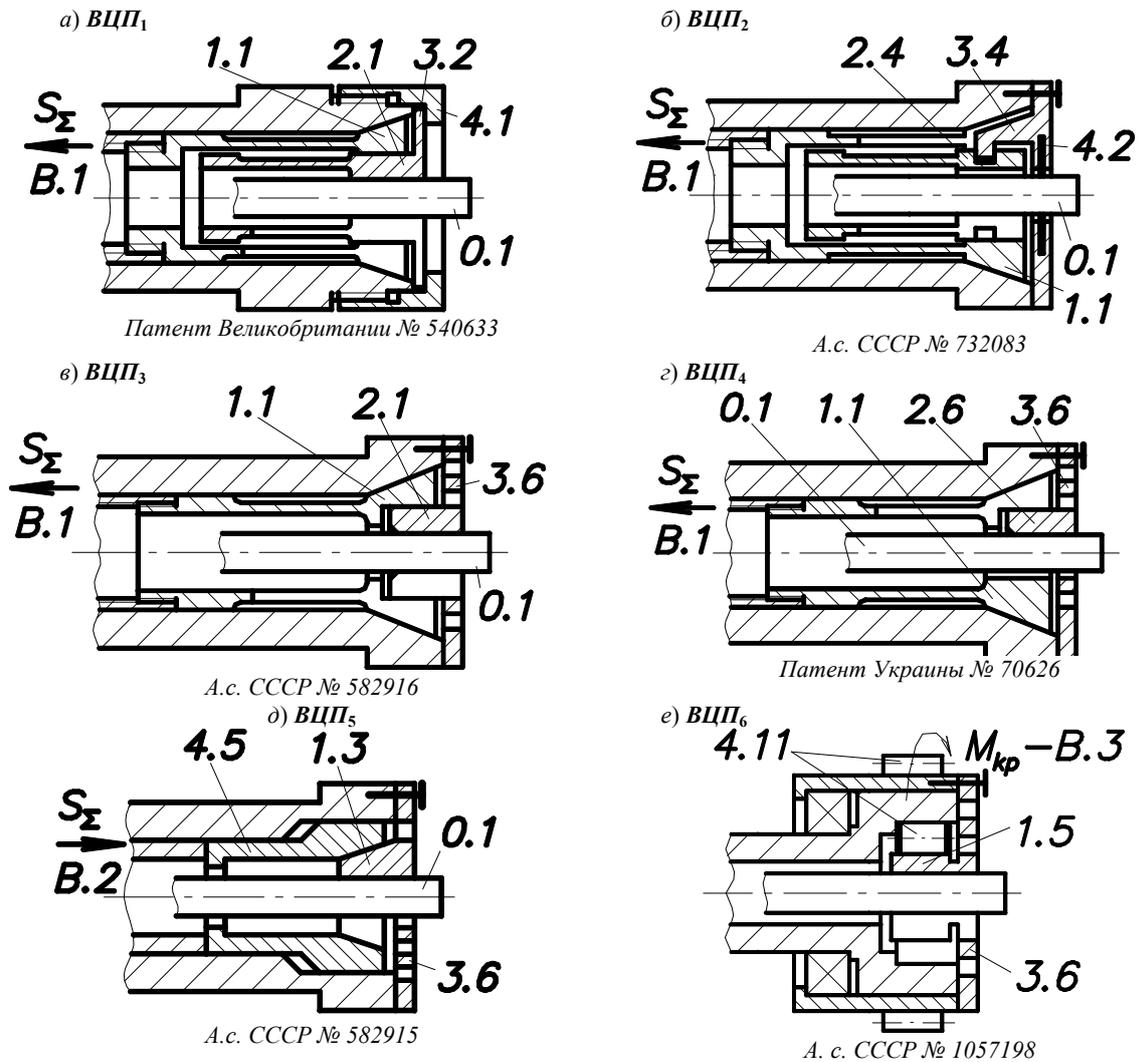


Рис. 7. Конструктивные схемы ВЦП для модернизации МТА (а - г), ОТА (д) и создания нового токарного автомата с тангенциальным действием усилия от привода (е)

Проиллюстрировано получение известных и новых вариантов на примерах создания ВЦП повышенной осевой точности для модернизации многошпиндельных (МТА) и одношпиндельных (ОТА) токарных автоматов с минимальными затратами и доработками, что экономически целесообразно. Каждый вариант записан как сочетание альтернатив признаков в виде морфологических формул:

$VЦП_1 \rightarrow |B.1| + |1.1 - 2.2 - 3.2 - 4.1| + |5.1 - 6.4 - 7.2 - 8.1 - 9.4 - 10.1| + |O.1|$ (патент Великобритании № 540633), рис. 7.а.

$VЦП_2 \rightarrow |B.1| + |1.1 - 2.4 - 3.4 - 4.2| + |5.1 - 6.4 - 7.2 - 8.1 - 9.4 - 10.1| + |O.1|$ (а.с. СССР №732083), рис. 7.б.

$VЦП_3 \rightarrow |B.1| + |1.1 - 2.1 - 3.6 - 4.4| + |5.1 - 6.4 - 7.2 - 8.1 - 9.4 - 10.1| + |O.1|$ (а.с. СССР №582916), рис. 7.в.

$VЦП_4 \rightarrow |B.1| + |1.1 - 2.6 - 3.6 - 4.4| + |5.1 - 6.4 - 7.2 - 8.1 - 9.4 - 10.1| + |O.1|$ (пат. Украины № 70626), рис.7. г.

$VЦП_5 \rightarrow |B.2| + |1.3 - 2.3 - 3.6 - 4.5| + |5.6 - 6.1 - 7.3 - 8.2 - 9.4 - 10.1| + |O.1|$ (а.с. СССР №582915), рис. 7.д.

$VЦП_6 \rightarrow |B.3| + |1.5 - 2.3 - 3.6 - 4.1| + |5.6 - 6.1 - 7.3 - 8.3 - 9.4 - 10.2| + |O.1|$ (а.с. СССР №1057198), рис. 7.е.

Показанные на рис. 7. примеры синтезированных конструктивных схем ВЦП свидетельствуют о наличии в морфологической модели (рис. 4–6, матрицы 1-2) новых необычных вариантов технических решений, которые при простом переборе традиционным методом “проб и ошибок” могли выпасть из поля зрения.

Однако, при всех преимуществах, метод морфологического анализа имеет тот недостаток, что наряду с реально возможными комбинациями вариантов (альтернатив) морфологическая модель содержит большое количество несовместимых вариантов. Это требует разработки аппарата выбора допустимых решений из большого множества [1, 2, 4, 7].

Представленный системно-морфологический подход как многовариантный может быть успешно реализован в диалоге с ЭВМ [7] при создании базы данных (фондов) схемного и конструктивного параметрического изображения элементов ВЦП, определяющих его структуру и связей между элементами, которые превращают соответственно структуру в схему, а схему в конструкцию [8].

Эффективный ЗМ, удовлетворяющий требованиям обеспечения высокой точности и получения необходимых усилий закрепления с большими трудностями, поэтому проектирование ЗМ должно базироваться на глубоком анализе и точном расчете параметров процесса закрепления при взаимодействии основных зажимных элементов между собой и с объектом закрепления [2, 8]. Системный подход решения инженерных задач такой сложности реализуется намного легче с использованием интеллектуальной среды современной CAD/CAE системы [5].

3D-графическая параметрическая компьютерная система SolidWorks и интегрированный в ней пакет для инженерных исследований COSMOSWorks [10-14] (специализированное приложение, предназначенное для решения задачи механики твердого деформируемого тела методом конечных элементов), сегодня являются единым удачным решением для машиностроительного инжиниринга [6].

Суть методики проектирования ЦП показана на рис.8 (в качестве примера, проиллюстрировано проектирование и расчетный анализ ВЦП высокой осевой точности зажима, - рис. 7, б):

Шаг 1: Создается пространственная параметрическая модель ВЦП; определяются граничные отклонения функциональных размеров; выбирается материал элементов патрона и назначаются его характеристики (материальные характеристики для данного примера соответствуют стали 65Г - модуль упругости $E = 2,1e+11 Pa$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$ и др.);

Шаг 2: На основе разработанной объемной модели ВЦП создается расчетная геометрическая модель, являющейся половиной симметричной части ЦП, при которой существенно уменьшается размерность решаемых задач, а с целью уменьшения размерности и увеличения точности, шпиндель смоделирован только в части конического отверстия. Для того, чтобы модифицированная модель системы патрон-деталь была адекватной целой, прикладываются следующие граничные условия:

- кинематические: перемещение, равное нулю, нормально к граням, попавшим в плоскость симметрии; внешняя поверхность шпинделя фиксирована, как неподвижная; радиальное перемещение внешней поверхности направляющего пояса ОЭ равно нулю.

- статические: к заднему торцу хвостовика ОЭ прикладывается нормальная сила S_{Σ} , равная $\frac{1}{2}$ тянущего осевого усилия от привода; к переднему торцу заготовки прикладывается, например, радиальная сила, равная $\frac{1}{2}$ радиальной силы резания.

Назначаются массовые нагрузки – гравитационные и центробежные (угловая скорость, порождаемая вращением).

Назначаются граничные условия контакта и коэффициентов трения между конической поверхностью шпинделя и губками ОЭ, между губок ОЭ и ПЭ и между рабочими поверхностями губок ПЭ и зажимаемой заготовки.

Шаг 3: Дискретизация элементов ЦП выполняется пространственными тетраэдральными 10-узловыми линейно-деформируемыми изопараметрическими элементами. С целью достижения адекватности и точности конечно-элементного решения осуществляется локальный контроль размеров конечных элементов в лепестках цанги, из-за их тонкостенности, и в местах, являющихся концентраторами напряжений.

Шаг 4: Выбор алгоритма решения. В COSMOSWorks реализованы три алгоритма решения системы линейных уравнений. Для данного типа задачи, при которой: кинематические граничные условия приводят к тому, что порождается „почти” кинематически подвижную сборку; учитывается трение; в сборке присутствуют тонкостенные объемные детали; в сборке есть материалы, сильно различающиеся по жесткости, и т.д., используется прямой метод для разреженных матриц (*Direct sparse*), который базируется на алгоритме Холесского с использованием компактной схемы хранения матрицы жесткости.

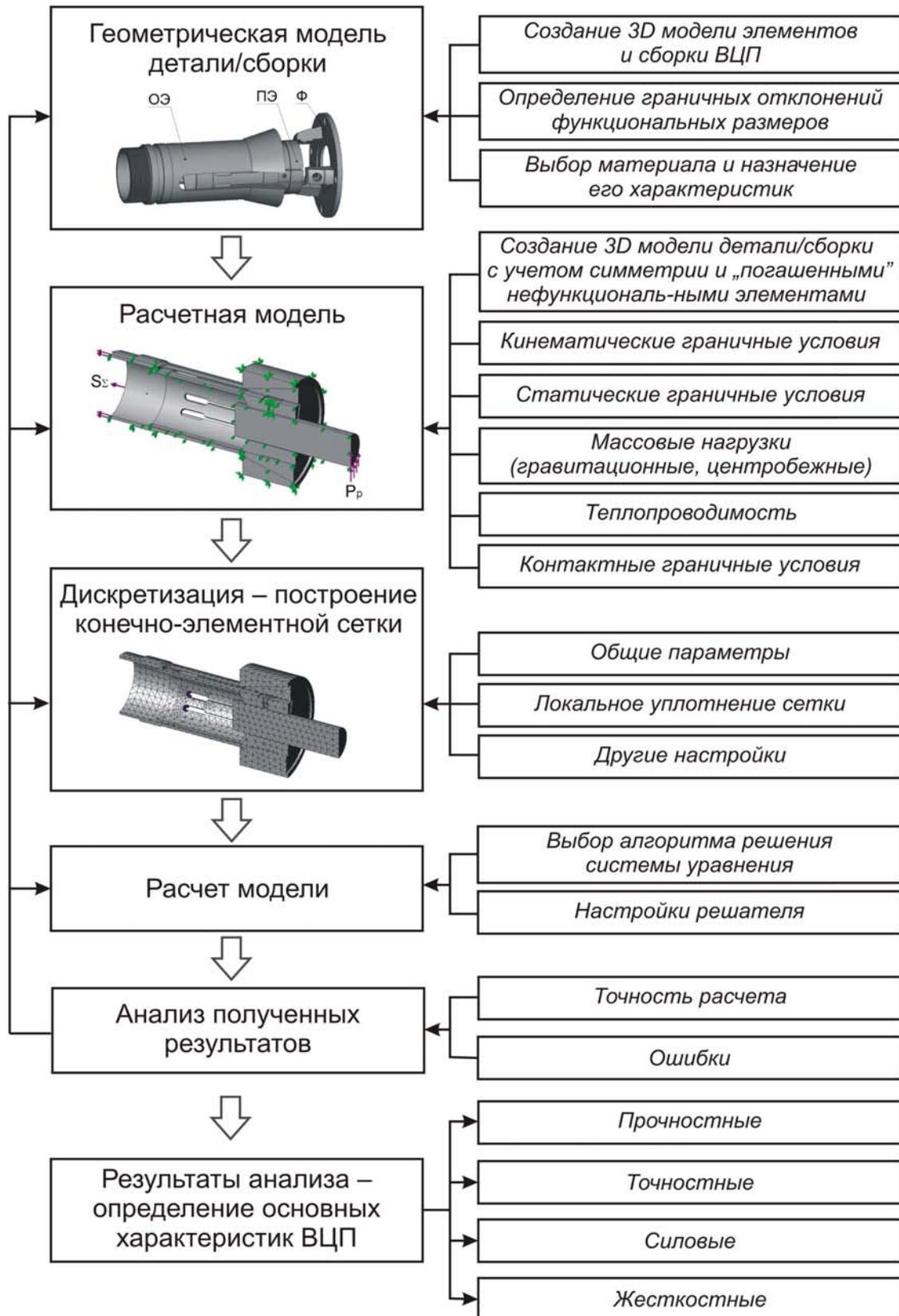


Рис. 8. Блок-схема методики проектирования ВЦП

Шаг 5: Проводится анализ полученных результатов и применяются методы контроля и повышения точности расчета.

Шаг 6: Разработанная конечно-элементная расчетная модель ВЦП дает возможность определять величину и разброс основных характеристик ЗМ (прочностных, силовых, точностных, жесткостных и т.д.), поскольку они являются функцией отклонения от номинала размеров (линейных, угловых), жесткости деталей и сил трения (рис. 9.).

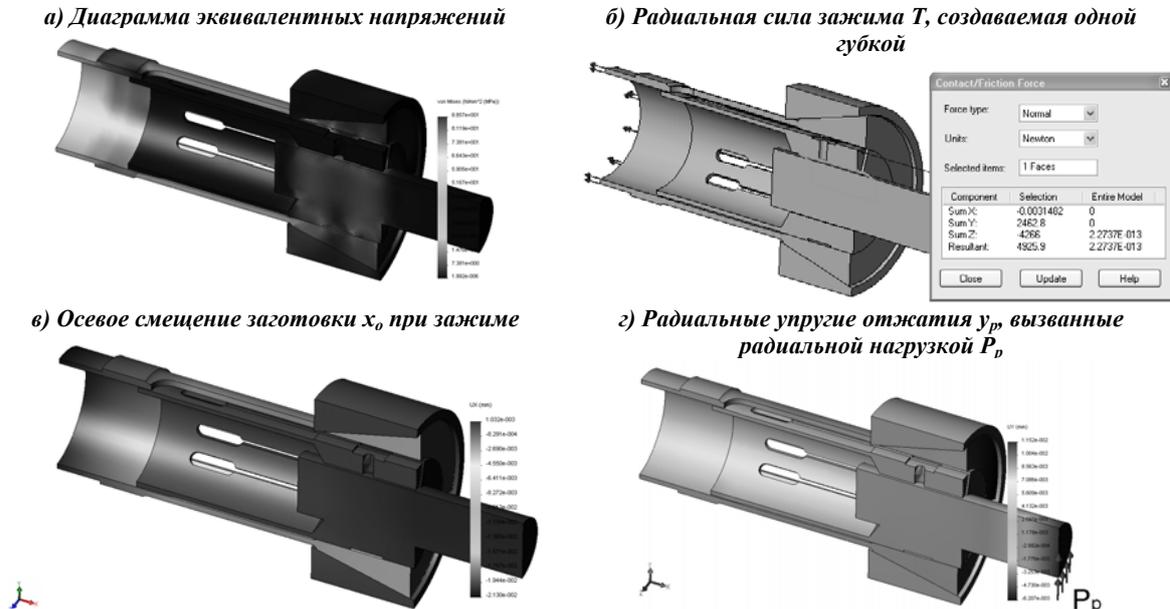


Рис. 9. Результаты конечно-элементного анализа основных характеристик ВЦП: а – прочностные; б – силовые; в, г – точностные

Анализ распределения и значения эквивалентных напряжений и проверка прочности по допустимым напряжениям $[\sigma]$ основных элементов ЦП можно выполнить на основе диаграммы рис. 9.а.

Основная силовая характеристика – радиальная сила зажима T , создаваемая одной губкой при осевом тянущем усилии S , определяется как нормальная контактная сила, возникающая на рабочей поверхности губки ПЭ при ее взаимодействии с поверхностью зажимаемой заготовки (рис. 9.б.).

Основные статические точностные и жесткостные характеристики ЦП: осевое смещение заготовки x_0 при зажиме (вследствие оттягивания) определяется на диаграмме перемещений по оси x , параллельной оси патрона (рис. 9.в.); радиальные упругие отжатия u_{pr} , вызванные радиальной нагрузкой P_p , определяются на диаграмме перемещений по оси y (рис. 9.г.).

Для определения жесткости системы патрон – деталь (радиальная – j_p , изгибная – j_u , крутильная – j_k , осевая – j_o), рассчитываются упругие отжатия оправки (v_p, v_w, v_k, x_o) вследствие нагружением силами и моментами P_p, M_w, M_k и P_o на определенных вылетах, соответствующими реальным условиям обработки.

Конечно-элементные параметрические модели ВЦП и системы патрон – деталь позволяют проводить сравнительные экспериментальные исследования процесса зажима заготовок с учетом влияния различных факторов на силу, точность и жесткость зажима, а также оптимизировать геометрию конструкции с целью стабилизации основных характеристик.

Список литературы

1. Блюмберг В.А., Глушенко В.Ф. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов. – Л.: Лениздат, 1982. – 160 с.
2. Кузнецов Ю.М. Теория розв'язання творчих задач. – К.: ТОВ "ЗМОК" – ПП "ГНОЗИС", 2003 – 345 с.
3. Кузнецов Ю.Н., Кухарец А.В. Новые зажимные механизмы станков -автоматов. – К.: Техніка, 1979. – 151 с.
4. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений: Пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 208с.
5. Неделчева П.М. CAD/CAE системите – среда за оптимално проектиране на затягащи механизми. – СЮ, брой 8, година IV, септември 2008. С. - 88-91.
6. Неделчева П.М. Модели на прецизни цангови патронници с напречни пера на междинната цанга и различни схеми на силовия поток. - Известия на ТУ – Габрово, том 35, 2007. С. - 16-20.
7. Половинкин А.И. и др. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании). – М.: Радио и связи, 1981. – 344 с.
8. Самонастраивающиеся зажимные механизмы.: Справочник / Кузнецов Ю.Н., Вачев А.А., Сяров С.П., Цървенков А.И.; под ред. Ю.Н. Кузнецова. К.: Техника; София: Гос. изд-во Техника, 1988. – 222 с.
9. Шинкаренко В.Ф. Основы теории еволюції електромеханічних систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288с.
10. SolidWorks Motion 2009. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Concord, Massachusetts, USA, 2009. – 348 p.
11. SolidWorks Simulation 2009. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Concord, Massachusetts, USA, 2009. – 506 p.
12. SolidWorks Simulation Premium: Dynamics 2009. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Concord, Massachusetts, USA, 2009. – 128 p.
13. SolidWorks Simulation Premium: Nonlinear 2009. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Concord, Massachusetts, USA, 2009 – 248p
14. SolidWorks Simulation Professional 2009. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Concord, Massachusetts, USA, 2009. – 230 p.