

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ
ENGINEERING TECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 62-229.3:621.914:531:004.942:519.171.2

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-5-18

**ПЕРЕХОД ОТ ПОЛЮСНОГО ГРАФА МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
К ГРАФУ СИГНАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ФРЕЗЕРНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ****Пипкин Юрий Владимирович*,
Зинченко Андрей Михайлович,
Куберский Сергей Владимирович**

Донбасский государственный технический университет

*для корреспонденции: tmsi_pipkin@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

05 июня 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

29 сентября 2024 г.

Принята к публикации:

10 октября 2024 г.

Опубликована:

24 октября 2024 г.

Ключевые слова:

силовое замыкание, фрезерное приспособление, механическая поступательная система, полюсный граф, граф сигналов системы

Аннотация.

Совершенствование фрезерных станочных приспособлений с применением математического моделирования удобно выполнять с применением теории графов как математического аппарата, естественным образом отражающего связи между конструктивными элементами или параметрами технической системы. Однако современные отечественные системы автоматизированного проектирования конструкций в машиностроении не имеют соответствующего функционала. Отработка алгоритмов, обеспечивающих применение теории графов, является актуальной для исследований станочных приспособлений.

В статье на примере исследования силового замыкания фрезерного станочного приспособления рассматривается применение двух разделов теории графов — полюсных графов и графов сигналов. Используются возможности полюсных графов для создания математической модели структурной организации конструкции в форме эквивалентных схем поступательной механической системы и осуществляется переход к описанию уравнений математической модели в виде графа сигналов, наглядно отражающего взаимосвязи между параметрами и переменными технической системы. Выполненные преобразования позволили получить описание силового замыкания фрезерного станочного приспособления в форме замкнутой последовательности переменных, что рассматривается как теоретическая предпосылка для исследования адаптационных свойств системы.

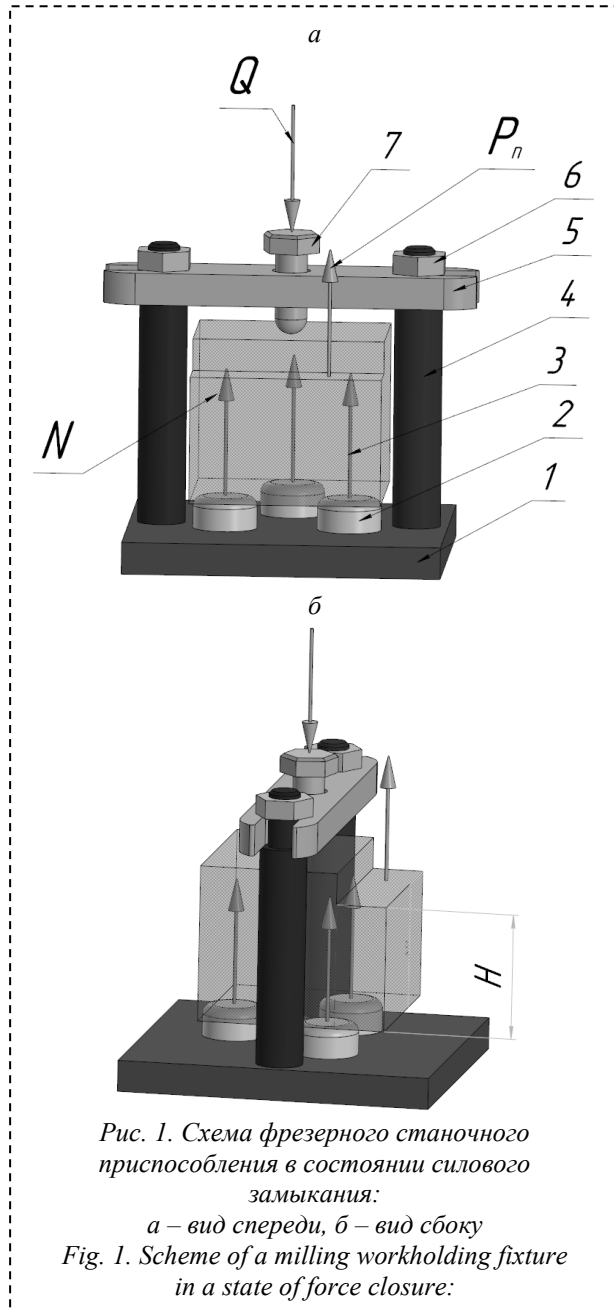
На основе практических исходных данных выполнена верификация математической модели в форме графа сигналов, реализованной в программном комплексе SimInTech.

Сделан вывод о применимости модели силового замыкания в форме графа сигналов для дальнейших исследований и практической реализации

Для цитирования: Пипкин Ю.В., Зинченко А.М., Куберский С.В. Переход от полюсного графа механической системы к графу сигналов на примере фрезерного приспособления // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 5-18. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-5-18, EDN: XYQAPP

Введение.

Одним из направлений совершенствования конструкций технологических механизмов является организация структур, обеспечивающих самонастройку на заданные технологические параметры [1, 2, 3]. Это позволяет создавать адаптивные механические системы [4, 5] и тем самым снизить требования к системам автоматического управления или повысить их



качество. В свою очередь, в области систем адаптивного управления отмечается [6], что одной из форм описания свойств адаптации в технических системах являются кольцевые зависимости между ее параметрами – управляющие кольца. Можно сказать, что таким

системам свойственна пассивная приспособляемость [7].

Станочные приспособления [8], в частности фрезерные [9], можно рассматривать как механические системы с сосредоточенными компонентами, обеспечивающие упругое силовое замыкание односторонних базирующих связей [10], преобразуемых таким образом в двухсторонние. Заготовка при этом лишается 6-ти степеней свободы относительно опорных элементов приспособления и в процессе механической обработки (лезвийной или абразивной) должна находиться неподвижно относительно режущего инструмента. При этом пассивная приспособляемость (самонастройка) проявляется в том, что в процессе обработки направление и точка приложения сил резания изменяются, а точка приложения удерживающих сил (усилий зажима или зажимающих сил) не изменяется, но, тем не менее, равновесие заготовки сохраняется. Это означает, что силовое замыкание двухсторонних базирующих связей обеспечивает изменение реактивной силы, уравнивающей силы резания в каждой точке траектории обработки. Следовательно, в системе станочного приспособления можно предположить наличие замкнутых управляющих колец между параметрами системы.

Поиск и исследование соответствующих взаимосвязей ведется в рамках государственной научно-исследовательской работы на тему «Разработка системы опорных и зажимных элементов фрезерных приспособлений на основе моделирования силового замыкания».

Выявление таких кольцевых зависимостей будет способствовать определению и дальнейшему развитию стратегий и методов совершенствования конструкций станочных приспособлений.

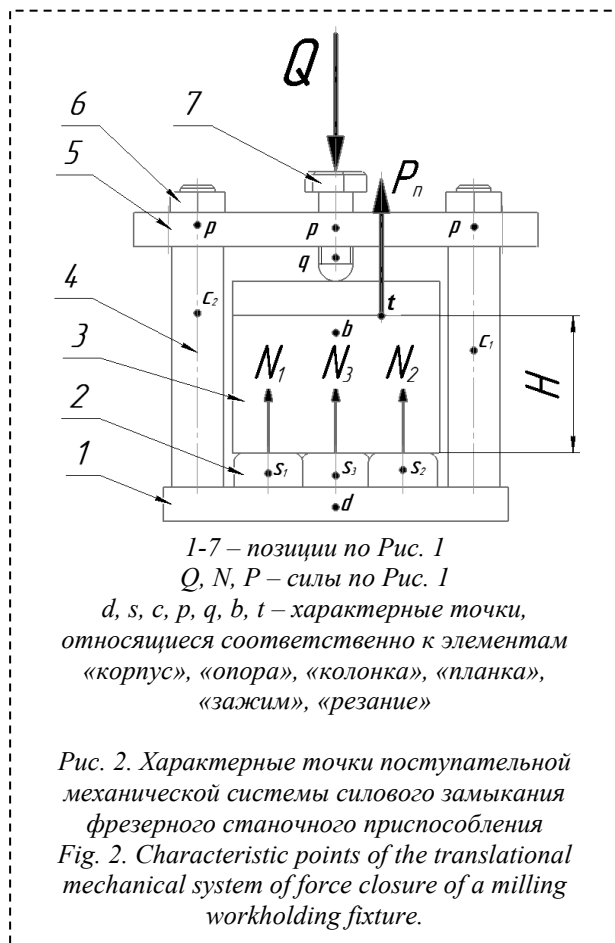
Методика исследований.

Математическим языком, который естественным образом описывает замкнутость связей между объектами, является язык графов. Графами, которые описывают связи между переменными системы, являются графы сигналов (или сигнальные графы) [11]. Графы сигналов получили распространение при определении передаточных функций систем автоматического управления. В тоже время при исследовании механических систем, в том числе металлорежущих станков [12], распространение получили так называемые эквивалентные схемы. Методика перехода от эквивалентных схем к графам сигналов предложена в работе [13].

Целью данной работы является отработка последовательности перехода от эквивалентных схем механических систем к графам сигналов для выявления замкнутых взаимосвязей между переменными и параметрами системы на

примере силового замыкания фрезерных приспособлений.

Исходные положения. Эквивалентные схемы механических систем могут быть преобразованы в полюсные графы [14]. Применение полюсных



графов для получения математических моделей механических систем с сосредоточенными параметрами рассматривается как удобный математический аппарат при создании систем автоматизированного проектирования технических систем на макроуровне [15].

В работах [14-16] описывается методика получения полюсных графов механических систем.

В конструкциях фрезерных станочных приспособлений удержание заготовки в процессе обработки обеспечивается системой элементов «опорные элементы» – «заготовка» – «зажим» – «зажимной механизм» – «привод» – «корпус приспособления», которые находятся в состоянии силового замыкания на корпус. Простейшая конструктивная схема, представленная на Рис. 1 по примеру, содержит следующие элементы и обозначения [17]:

- 1 – корпус приспособления;
- 2 – опорные элементы (3 единицы);
- 3 – заготовка (деталь после обработки);
- 4 – колонка зажимного механизма (2 единицы);

- 5 – планка зажимного механизма;
 - 6 – гайка фиксации планки (2 единицы);
 - 7 – винт ручного зажима;
- Q – зажимная сила;
 P_n – сила резания, нормальная к опорам;
 N – сила реакции в опорах;
 H – размер высоты фрезеруемого уступа.

Представленная конструкция приспособления является одним из множества вариантов для фрезерования плоскостей уступа в размер H . Тем не менее, она отражает характерное конструктивное решение для достижения неподвижности обрабатываемой заготовки — зажимная сила Q направлена на три опоры 2, вследствие чего при возможном сдвиге заготовки вдоль опорной плоскости будут возникать силы трения покоя, препятствующие этому.

Сущность силового замыкания заключается в следующем. Необходимая величина зажимной силы достигается правым вращением винта ручного зажима 7 в направлении вкручивания в планку 5. При этом торец винта 7 надавит на заготовку «вниз» и тем самым прижмет ее к опорам 2. Одновременно с этим резьба винта упрется в резьбу отверстия в планке 5, закрепленную гайками 6 на колонках 4. При этом планка 5 будет испытывать упругий изгиб, а колонки 4 – упругое растяжение в направлении, противоположном направлению вектора зажимной силы Q .

Действие силы резания P_n вниз на опоры приведет к увеличению сил реакции в опорах, что в свою очередь приведет к повышению силы трения покоя, препятствующей сдвигу заготовки. Действие силы резания P_n вверх приведет к дополнительной упругой деформации планки 5 и колонок 4, вследствие которой торец винта 7 выйдет из контакта с заготовкой и перестанет ее прижимать к опорам 2. Однако это произойдет не сразу, а по мере того, как будет уменьшаться упругая деформация опор, возникшая при зажиме до момента обработки. Это произойдет, когда сила резания P_n станет равной зажимной силе Q . Таким образом получается вербальная модель силового замыкания.

Результаты исследования.

В основной части перейдем к получению математической модели силового замыкания на основе графов сигналов.

На первом этапе рассмотрим получение эквивалентной схемы в соответствии со сформулированной вербальной моделью.

В соответствии с положениями теории графов [14] механические системы с сосредоточенными компонентами делятся на поступательные и вращательные. В случае фрезерного станочного приспособления нас интересуют деформации элементов системы в направлении выдерживаемого размера H , т.е. в линейном направлении. Таким образом, имеет место

поступательная механическая система. Переменные, которые характеризуют поведение поступательной механической системы — это деформации элементов и возникающие силы (в первую очередь силы реакции в опорах, которые определяют силы трения покоя).

Следует отметить, что предложенная к рассмотрению схема силового замыкания в большей степени отражает реальные конструктивные и теоретические условия равновесия, которые в упрощенном варианте сводятся к равновесию сил, действующих вдоль одной прямой [17]. Теоретически зажимающая сила Q может быть устойчиво уравновешена реакциями в опорах только в случае, когда этих опор минимум три, а сила Q прикладывается внутри опорного треугольника. Такая расчетная схема является базовой схемой силового замыкания, обеспечивая минимальную размерность математической модели [18].

Построение эквивалентной схемы удобно начинать с указания характерных точек, которые удобно определять для каждого конструктивного элемента (Рис. 2):

- точка d — принадлежит корпусу приспособления (поз. 1);
- точка s_i — принадлежит i -й опоре (поз. 2);
- точка c_i — принадлежит i -й опорной колонке (поз. 4);
- точка p — принадлежит зажимной пластине (поз. 5);
- точка q — принадлежит зажимному винту (поз. 7);
- точка b — принадлежит заготовке (детали) (поз. 3);
- точка t — принадлежит точке резания

(приложения силы P_n).

После присвоения элементам расчетной схемы характерных точек расставляем связи между ними в соответствии с вербальной моделью. При этом вследствие того, что расчетная схема является пространственной, то для условно-недеформируемых элементов (которыми являются корпус приспособления, обрабатываемая заготовка и зажимная планка) соответствующие характерные точки могут дублироваться. Для корпуса это точка d , для планки точка p , а для заготовки точка b также дублируется в точках контакта с зажимом q и с опорами s_i . В результате на Рис. 3 можно видеть условные обозначения упругостей, обозначенных основным параметром — коэффициентом жесткости K_j (соответственно, жесткость опор — K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} , жесткость зажима — K_q , жесткость режущего инструмента — K_t , жесткость колонок — K_{c1} , K_{c2}).

На полученной схеме со связями (Рис. 3) имеем избыточность характерных точек, связи между которыми не установлены — это кортежи пар точек

$\{c; d\}$, $\{b; q\}$, $\{b; s_i\}$. Для добавления связей между этими точками проанализируем перемещения, возникающие в характерных точках в направлении выдерживаемого при фрезеровании размера H (Рис. 1). Измерение этих перемещений выполняется от общей для всех элементов посадочной поверхности приспособления — нижней плоскости корпуса (которая соответствует точке d по Рис. 2 и Рис. 3). На Рис. 3 справа показаны условными обозначениями индикаторные стойки, выполняющие с помощью индикаторных головок

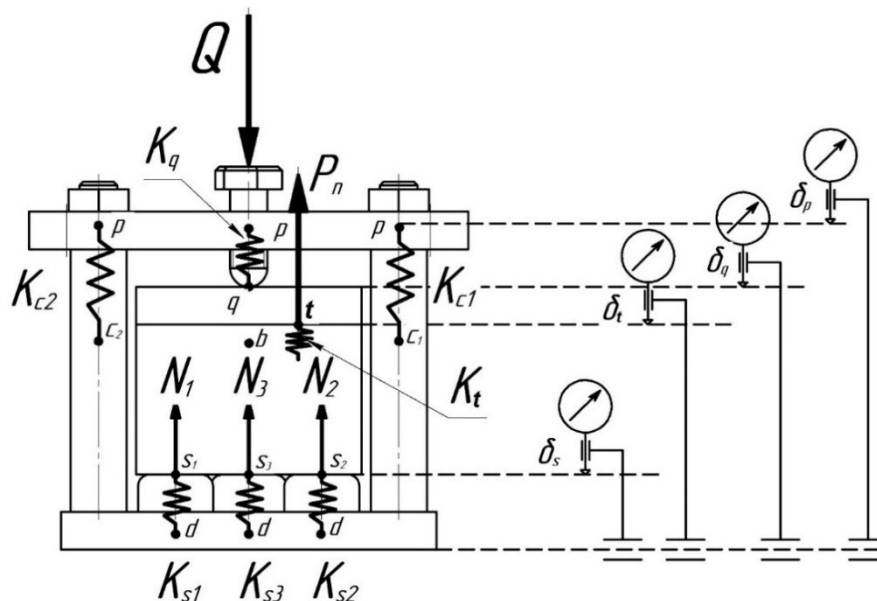


Рис. 3. Связи между характерными точками расчетной схемы силового замыкания фрезерного станочного приспособления

Fig. 3. Connections between the characteristic points of the design scheme of the force closure of milling workholding fixture

измерение перемещений в соответствующих характерных точках. Измеряемые перемещения будут иметь малую величину (в пределах поля допуска технологического размера H) и могут рассматриваться как составляющие погрешности обработки. Перемещение δ_s — упругая деформация опорных элементов. Перемещение δ_i — упругая деформация режущего инструмента. Перемещение δ_q — упругая деформация зажимного элемента. Перемещение δ_p — упругая деформация колонки. По схеме измерения видно, что деформация δ_p отсчитывается от базы (точки d), что означает эквивалентность точек d и c . Более того, деформация в точке p одновременно характеризует как растяжение колонки, так и перемещение планки. Таким образом, жесткости K_{c1} , K_{c2} могут быть учтены при задании жесткости K_q . Это означает эквивалентность точек b ; q }, $\{b$; s следует из того, что обрабатываемая заготовка рассматривается как абсолютно твердое тело, и массой заготовки можно пренебречь. Окончательная эквивалентная схема со связями имеет вид, представленный на Рис 4.

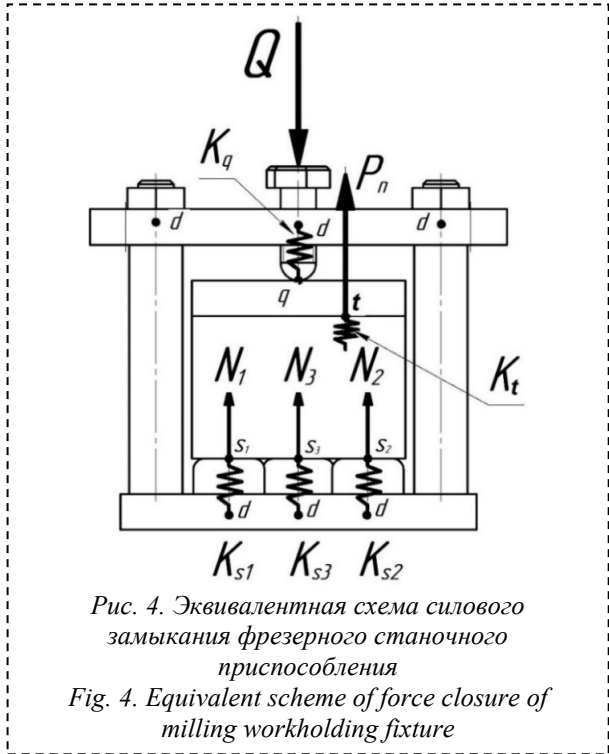


Рис. 4. Эквивалентная схема силового замыкания фрезерного станочного приспособления

Fig. 4. Equivalent scheme of force closure of milling workholding fixture

Ввиду пространственного разнесения точек приложения активных сил (зажимающей силы и силы резания) и реактивных сил (реакций в порах) будем рассматривать каждую соответствующую упругую связь как элемент отдельной подсистемы.

Компонентное уравнение упругой связи

задается на основе известной зависимости упругой деформации от величины активной действующей силы (на примере опорных элементов и зажимной силы):

$$\delta_{sq} = - (Q_{sq}/K_s)$$

или относительно упругой реакции

$$N_{sq} = - (\delta_{sq} \times K_s)$$

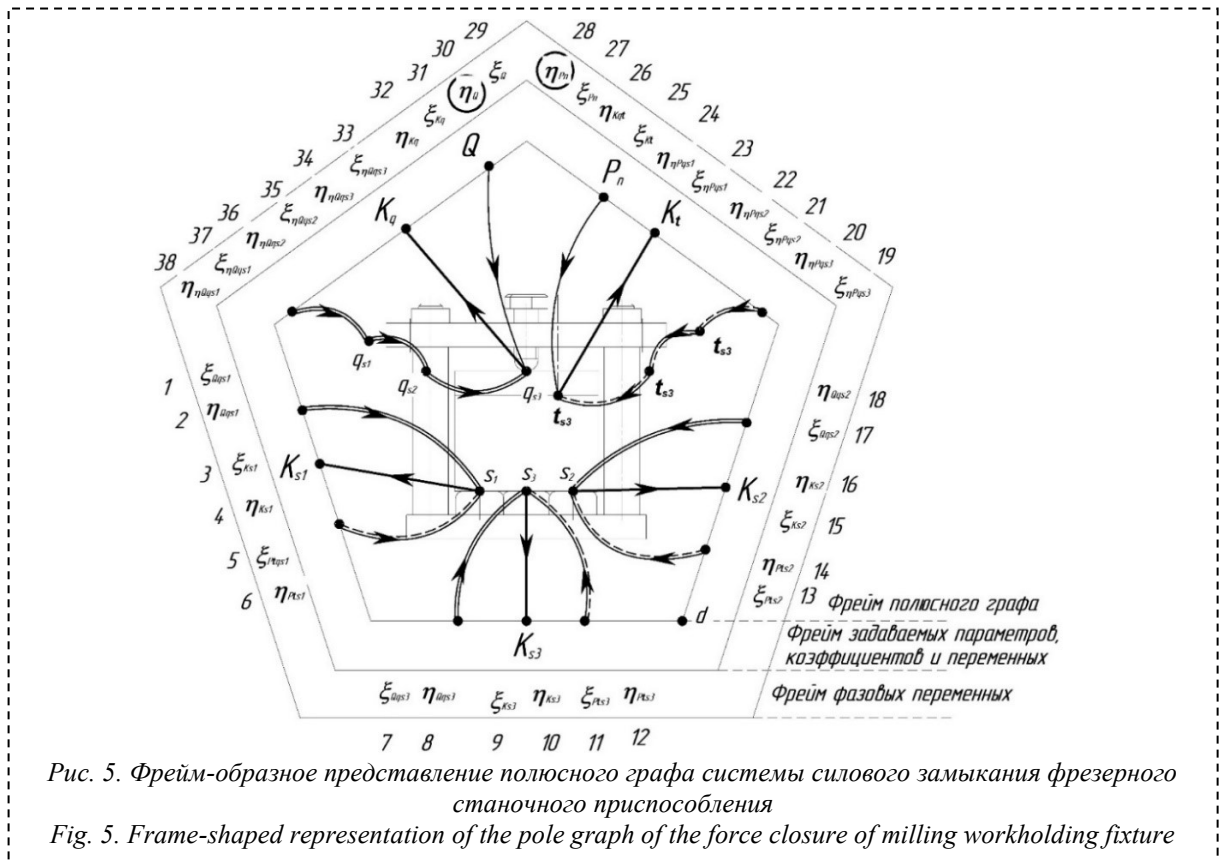


Рис. 5. Фрейм-образное представление полюсного графа системы силового замыкания фрезерного станочного приспособления

Fig. 5. Frame-shaped representation of the pole graph of the force closure of milling workholding fixture

и в соответствии с работой [13] имеет форму $\xi_{K_{si}} = -(\eta_{K_{si}}/K_s)$ и $\eta_{K_{si}} = -(\xi_{K_{si}} \times K_s)$,

где δ_{sq} – упругая деформация в точке s , вызванная активной силой Q , действующей в точке q , мм;

$\xi_{K_{si}}$ – соответствующая упругой деформации продольная (параллельная) переменная системы для связи K_{si} , зависящая от действия всех активных сил, мм;

Q_{sq} – часть активной силы Q , приходящаяся на данный опорный элемент, переданная от точки q к точке s , Н;

K_s – коэффициент жесткости опоры, Н/мм;

N_{sq} – упругая реакция в опоре, Н, причем $N_{sq} = -Q_{sq}$;

$\eta_{K_{si}}$ – поперечная (последовательная) переменная подсистемы связи K_{si} , соответствующая продольной переменной

$\xi_{K_{si}}$ (суммарной деформации опоры от действия всех активных сил), Н.

Взаимосвязь между подсистемами удобно задавать в форме трансформирующей гираторной связи (связи между одноименными переменными системы), представляющей собой рычаг, имеющий передаточное отношение между прикладываемыми силами по его концам и обратное соотношение между возникающими перемещениями в точках приложения сил. Одной из форм таких передаточных отношений для базовой расчетной схемы силового замыкания являются барицентрические координаты на базисе треугольника опорных точек [19]. В этом случае величина реакции в опорах с учетом пространственного характера силового замыкания определяется по формуле, предложенной в работе [19],

$$N_i = -\left(\sum_1^k Q_k S_{Q_{ki}} + \sum_1^f P_f S_{P_{fi}}\right),$$

где k и f – произвольные целые числа, соответствующие количеству точек приложения зажимных сил и сил резания;

$S_{Q_{ki}}$ и $S_{P_{fi}}$ – барицентрические координаты точек Q_k и P_f в « i »-й точке базисного треугольника.

Барицентрические координаты $S_{Q_{ki}}$ и $S_{P_{fi}}$ представляют собой передаточные коэффициенты сил при трансформации от точек приложения сил, в нашем случае это точки q и t соответственно, к точкам возникновения реакций в опорах s .

На втором этапе на основании эквивалентной схемы строится полюсный граф системы (Рис. 5).

Построение полюсного графа удобно вести на основе фрейм-ориентированного подхода [20], когда точка d начала отсчета преобразуется в рамку-фрейм с числом сторон по числу подсистем, внутри которой располагают конструктивный эскиз с характерными точками, а связи эквивалентной схемы преобразуются в дуги графа.

В первую очередь на полюсном графе проставляются дуги, определяющие характер поведения системы. В случае механической поступательной системы с сосредоточенными компонентами фрезерного станочного приспособления поведение системы характеризуется возникающей погрешностью обработки, которая формируется за счет перераспределения упругих деформаций в подсистемах. Следовательно, в первую очередь задаем двухполюсники упругостей (на Рис. 5 показаны прямолинейными отрезками с указанием в области фрейма параметров коэффициентов жесткости K_{si} , K_q , K_t).

Далее задаем двухполюсники, определяющие активные силы в системе — источники сил Q и P_n (на Рис. 5 показаны криволинейными сплошными дугами с указанием в области фрейма параметров задаваемых сил). Причем источники сил имеют только заданную поперечную (последовательную) переменную, а значение продольной переменной совпадает с двухполюсником упругости.

Затем задаем двухполюсники связи между подсистемами — зависимые источники поперечных и продольных (последовательных и параллельных) переменных.

Расстановку этих двухполюсников ведем из следующих соображений. Активная сила Q , задаваемая двухполюсником источника силы, распределяется на каждую из опор в соответствии со значением передаточных коэффициентов в форме барицентрических координат. Для этого в подсистемах, описывающих опоры двухполюсником жесткости, вводим зависимый источник поперечной переменной (силы), показанный в подсистемах опор дугой с двойной сплошной линией. Действие активной силы P_n моделируем введением в подсистемы опор соответствующих зависимых источников силы, показанных дугами с двойной линией, состоящей из параллельных сплошной и пунктирной линий.

В свою очередь, деформации в каждой из опор в точках s_i приводят к смещению в точках q и p (Рис. 4). Это влияние учитываем введением в подсистемах зажима и резания зависимых источников деформации в виде источников продольных (параллельных) переменных. Так как влияние деформации в опорах складывается, зависимые источники перемещений располагаются последовательно.

После задания зависимых источников переменных построение полюсного графа заканчивается. Направление стрелок на двухполюсниках обычно принимается по направлению переменных, задаваемых независимыми источниками поперечных переменных — в данном случае это силы. В работах [14, 15] для построения математической

модели используют матричные методы работы с графом, однако решения поставленной выше задачи исследования по получению кольцевых связей между параметрами и переменными системы (колец зависимостей) при этом не достигается.

На третьем этапе рассмотрим переход от полюсного графа к графу сигналов в соответствии с рекомендациями работы [13].

Первый шаг предусматривает выбор на полюсном графе опорного дерева, в ветви которого включают все источники кинематических величин (продольных переменных – деформаций). Таким образом, в опорное дерево включаем двухполюсники жесткостей в подсистемах опор и зависимые источники перемещений в подсистемах активных сил. В дерево не включают ни одного источника силы (вследствие чего они являются хордами дополнения опорного дерева).

На втором шаге все кинематические переменные хорд дополнения опорного дерева выражают через кинематические переменные ветвей дерева на основании закона Кирхгофа для относительного движения узлов в замкнутом контуре, записанного для основных контуров (контур образуется при обходе сначала по дуге опорного дерева, затем по хордам дополнения). Обход фрейма фазовых переменных системы делаем по Рис. 5 против часовой стрелки от подсистемы первой опоры, фазовые переменные которой имеют номера 1-6. В результате получаем следующие выражения:

$$\xi_{Ks1} - \xi_{Qqs1} = 0, \text{ откуда } \xi_{Qqs1} = \xi_{Ks1}; \quad (1)$$

$$\xi_{Ks1} - \xi_{Pts1} = 0, \text{ откуда } \xi_{Pts1} = \xi_{Ks1}; \quad (2)$$

$$\xi_{Ks3} - \xi_{Qqs3} = 0, \text{ откуда } \xi_{Qqs3} = \xi_{Ks3}; \quad (3)$$

$$\xi_{Ks3} - \xi_{Pts3} = 0, \text{ откуда } \xi_{Pts3} = \xi_{Ks3}. \quad (4)$$

$$\xi_{Ks2} - \xi_{Qqs2} = 0, \text{ откуда } \xi_{Qqs2} = \xi_{Ks2}; \quad (5)$$

$$\xi_{Ks2} - \xi_{Pts2} = 0, \text{ откуда } \xi_{Pts2} = \xi_{Ks2}; \quad (6)$$

$$\xi_{Kp} - \xi_{\eta Pts1} - \xi_{\eta Pts2} - \xi_{\eta Pts3} = 0, \text{ откуда}$$

$$\xi_{Kp} = \xi_{\eta Pts1} + \xi_{\eta Pts2} + \xi_{\eta Pts3}; \quad (7)$$

$$\xi_{Pn} - \xi_{\eta Pts1} - \xi_{\eta Pts2} - \xi_{\eta Pts3} = 0, \text{ откуда}$$

$$\xi_{Pn} = \xi_{\eta Pts1} + \xi_{\eta Pts2} + \xi_{\eta Pts3}; \quad (8)$$

$$\xi_{Kq} - \xi_{\eta Qqs1} - \xi_{\eta Qqs2} - \xi_{\eta Qqs3} = 0, \text{ откуда}$$

$$\xi_{Kq} = \xi_{\eta Qqs1} + \xi_{\eta Qqs2} + \xi_{\eta Qqs3}; \quad (9)$$

$$\xi_Q - \xi_{\eta Qqs1} - \xi_{\eta Qqs2} - \xi_{\eta Qqs3} = 0, \text{ откуда}$$

$$\xi_Q = \xi_{\eta Qqs1} + \xi_{\eta Qqs2} + \xi_{\eta Qqs3}. \quad (10)$$

На третьем шаге силы ветвей опорного дерева выражают через силы хорд дополнения на основании закона Кирхгофа для сил, записанного

для основных сечений графа (сечение образуется при «разрезании» дуг опорного дерева и хорд дополнения границей сечения таким образом, чтобы «разрезалась» только одна дуга опорного дерева и остальные хорды дополнения). Обход фрейма фазовых переменных системы также делаем по Рис. 5 от подсистемы первой опоры против часовой стрелки. Положительный отсчет переменных определяем по направлению переменной потока для ветви опорного дерева. В результате получаем выражения, которые нумеруем в продолжение уравнений для контуров:

$$\eta_{Ks1} - \eta_{Qqs1} - \eta_{Pts1} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{Ks1} = \eta_{Qqs1} + \eta_{Pts1}; \quad (11)$$

$$\eta_{Ks2} - \eta_{Qqs2} - \eta_{Pts2} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{Ks2} = \eta_{Qqs2} + \eta_{Pts2}; \quad (12)$$

$$\eta_{Ks3} - \eta_{Qqs3} - \eta_{Pts3} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{Ks3} = \eta_{Qqs3} + \eta_{Pts3}; \quad (13)$$

$$\eta_{\eta Pts1} + \eta_{Pn} - \eta_{Kp} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{\eta Pts1} = \eta_{Kp} - \eta_{Pn}; \quad (14)$$

$$\eta_{\eta Pts2} + \eta_{Pn} - \eta_{Kp} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{\eta Pts2} = \eta_{Kp} - \eta_{Pn}; \quad (15)$$

$$\eta_{\eta Pts3} + \eta_{Pn} - \eta_{Kp} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{\eta Pts3} = \eta_{Kp} - \eta_{Pn}; \quad (16)$$

$$\eta_{\eta Qqs1} + \eta_Q - \eta_{Kq} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{\eta Qqs1} = \eta_{Kq} - \eta_Q; \quad (17)$$

$$\eta_{\eta Qqs2} + \eta_Q - \eta_{Kq} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{\eta Qqs2} = \eta_{Kq} - \eta_Q; \quad (18)$$

$$\eta_{\eta Qqs3} + \eta_Q - \eta_{Kq} = 0, \text{ откуда}$$

$$\eta_{\eta Qqs3} = \eta_{Kq} - \eta_Q. \quad (19)$$

Число дуг и хорд полюсного графа – 19. Каждая дуга описывается двумя фазовыми переменными, следовательно, их 38 (наружная нумерация по Рис. 5). Из всех фазовых переменных известными являются задаваемые переменные активных источников – источников активных сил в механической системе, которых 2. Таким образом, количество неизвестных фазовых переменных – 36. Выше получено 19 топологических уравнений, связывающих переменные. К топологическим добавляются компонентные уравнения пассивных двухполюсников. Таких уравнений по числу двухполюсников жесткости K_j 5. Также добавляются уравнения связей между зависимыми источниками переменных. Таких уравнений 12 (по числу зависимых источников).

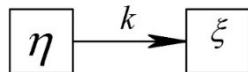


Рис. 6. Дуга графа сигналов
Fig. 6. Arc of the signal-flow graph

Имеем количество уравнений, описывающих систему, равное количеству неизвестных, следовательно, система уравнений разрешима.

На четвертом шаге полученные на предыдущих шагах зависимости изображают графически по правилам графов сигналов [11, 13]. Здесь следует отметить, что переменные зависимых источников будут сокращаться, и в окончательном варианте графа сигналов должны остаться только независимые фазовые переменные. Таких переменных 12 (от общего числа неизвестных переменных 36 отнимаем число неизвестных зависимых переменных, которых 24). Основной формой представления графа сигналов является граф (Рис. 6), в вершинах которого располагаются переменные, а вес соединяющей дуги (ребра) графа равняется коэффициенту, связывающему переменные в соотношении вида

$$\xi = k \cdot \eta,$$

где η и ξ – связанные переменные системы (могут быть как одинакового типа, как в топологических уравнениях, так и разного типа,

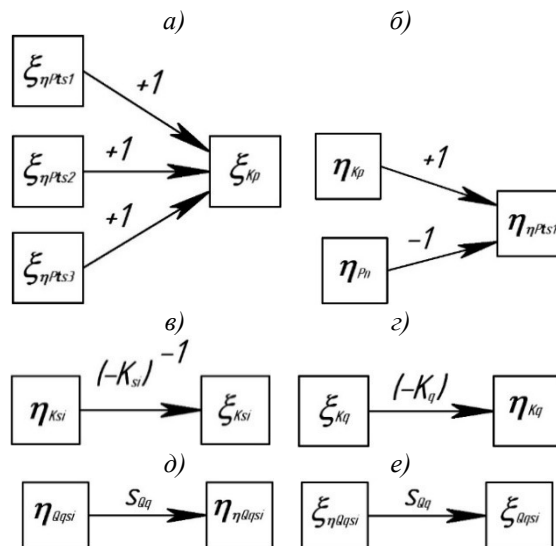
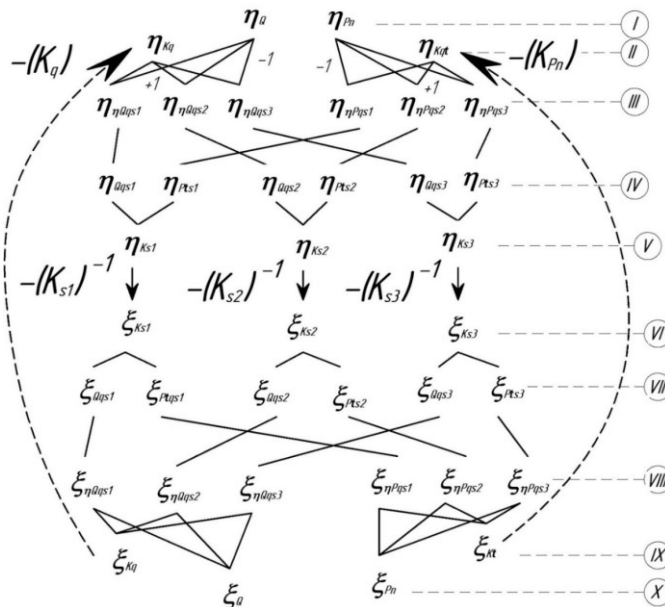


Рис. 6.1. Графы сигналов для некоторых уравнений математической модели:
а – уравнение контура, б – уравнение сечения, в – уравнение ветви дерева, г – уравнение хорды дополнения, д, е – уравнения гираторной связи
Fig. 6. Signal-flow graphs for some equations of the mathematical model: a – contour equation, b – section equation, c – tree branch equation, d – addition chord equation, e, f – gyration coupling equations



- I – слой задаваемых переменных активных сил (зажимных и резания)
- II – слой поперечных переменных пассивных двухполюсников жесткости активных сил
- III – слой входных поперечных переменных зависимых источников гираторной связи
- IV – слой выходных поперечных переменных зависимых источников гираторной связи
- V – слой поперечных переменных пассивных двухполюсников жесткости опор
- VI – слой продольных переменных пассивных двухполюсников жесткости опор (перемещения, деформации)
- VII – слой входных продольных переменных зависимых источников гираторной связи
- VIII – слой выходных продольных переменных зависимых источников гираторной связи
- IX – слой продольных переменных пассивных двухполюсников жесткости активных сил
- X – слой выходных продольных переменных

Рис. 7. Граф сигналов силового замыкания фрезерного станочного приспособления
Fig. 7. Signal-flow graph for force closure of a milling workholding fixture

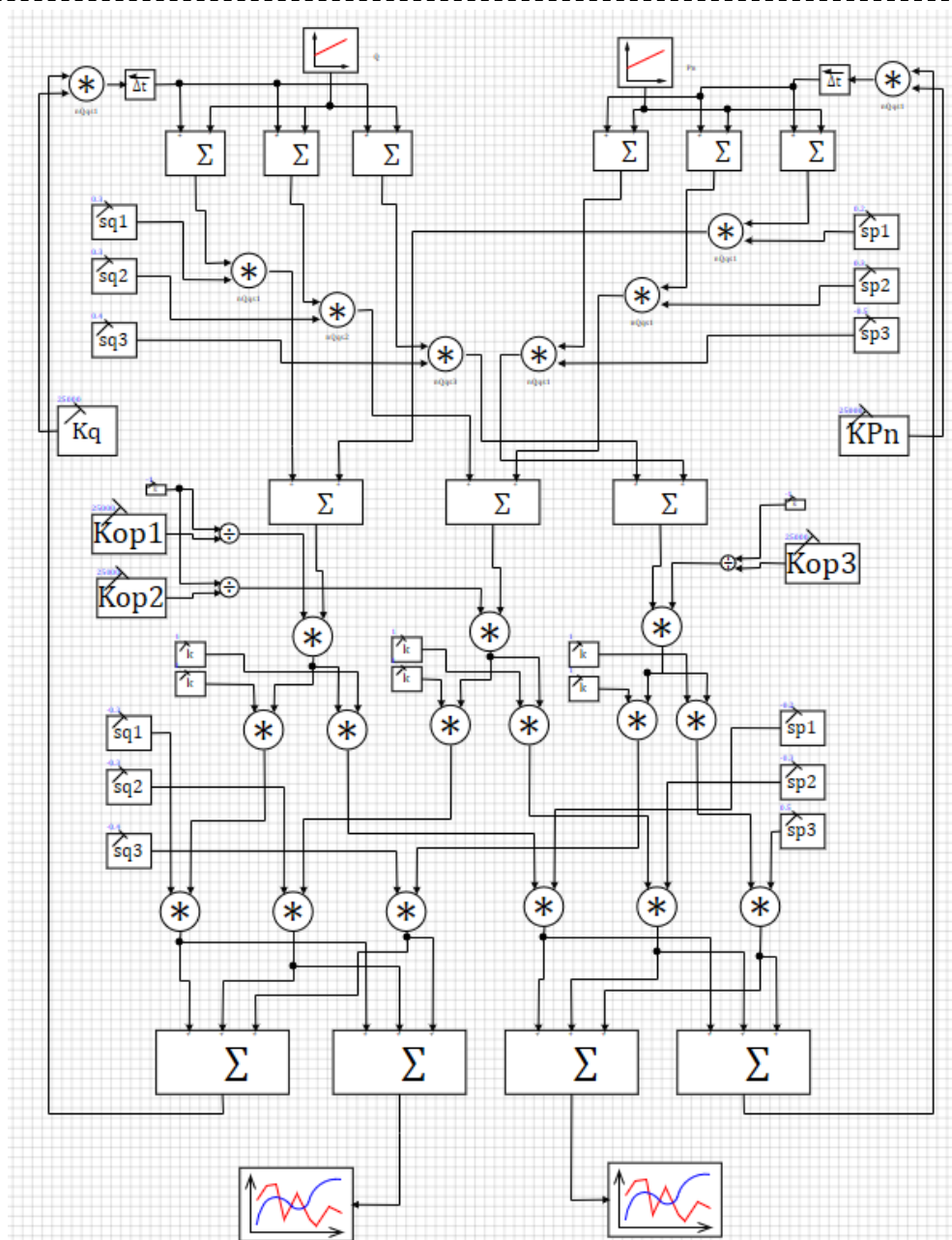


Рис. 8. Структурная схема представления графа сигналов в программном комплексе «Среда динамического моделирования SimInTech»

Fig. 8. Structural scheme of the signal-flow graph representation in the software package "SimInTech Dynamic Simulation Environment"

как в компонентных уравнениях); k – коэффициент связи, может быть безразмерным при связывании одностипных переменных или иметь размерность при связывании переменных разного типа.

Например, для контурного уравнения (7) получаем граф сигналов, представленный на Рис. 6.1, а. Для уравнения сечения (14) имеем граф сигналов на Рис. 6.1, б.

Компонентному уравнению жесткости ветви опорного дерева K_{st} соответствует граф сигналов на Рис. 6.1, в. Компонентному уравнению жесткости хорды дополнения K_q соответствует

граф сигналов на Рис. 6.1, г. Уравнению гираторной связи по силе Q соответствует граф сигналов на Рис. 6.1, д. Уравнению гираторной связи по перемещениям для силы Q соответствует граф сигналов на Рис. 6.1, е.

Анализ графов сигналов для одношаговых преобразований, представленных на Рис. 6.1, показывает, что закольцовывание переменных возможно, так как имеются взаимобратные переходы между переменными.

Итоговый граф сигналов представлен на Рис. 7. Преобразование переменных происходит в центральной части графа снизу вверх через связи

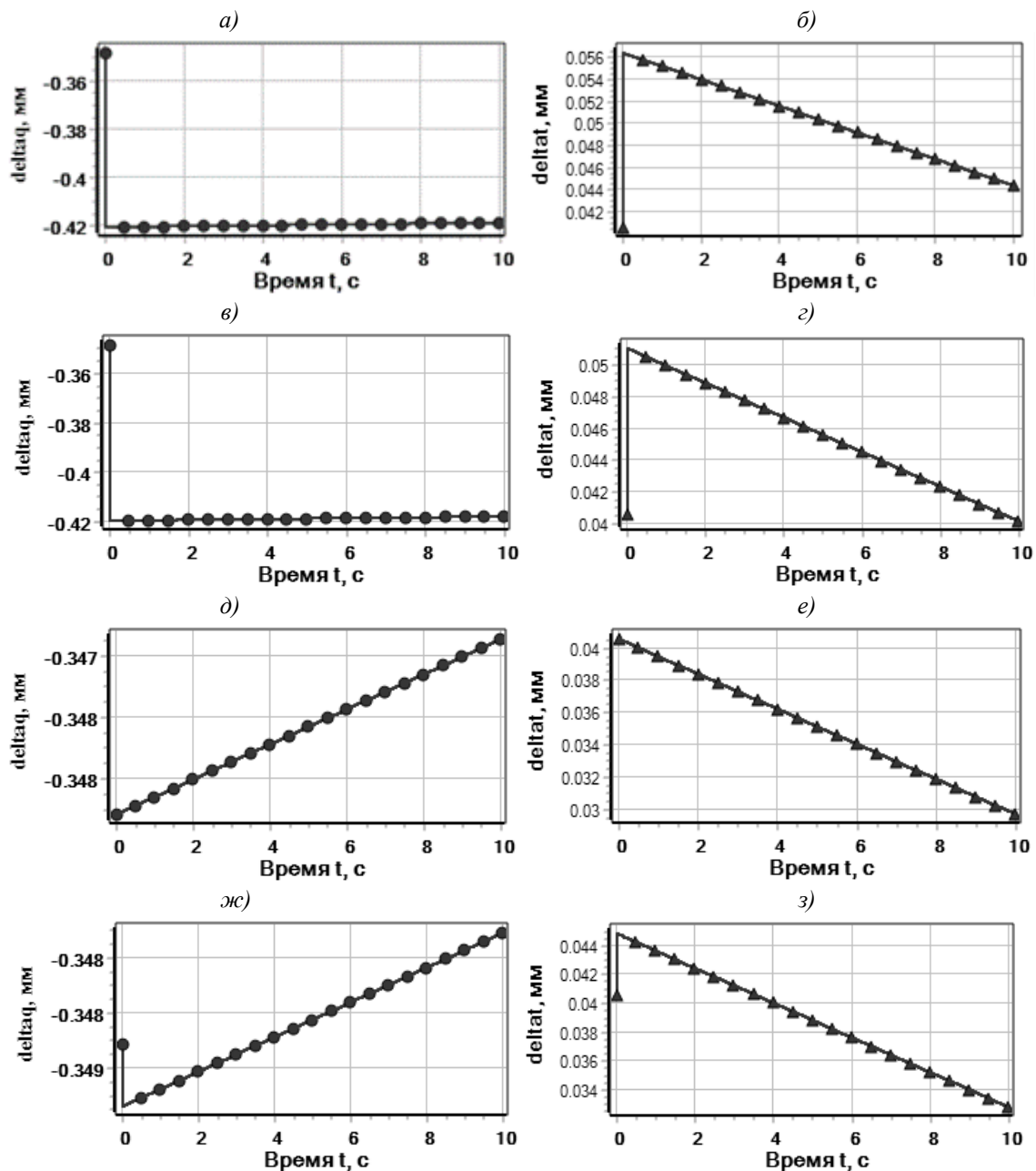


Рис. 9. Результаты расчета деформаций в системе силового замыкания для элементов «зажим» (а, в, д, ж) и «режущий инструмент» (б, г, е, з)
 Fig. 9. Results of calculating deformations in the force closure system for the elements "clamp" (a, v, d, j) and "cutting tool" (b, g, e, z)

коэффициентов жесткости опор K_{si} , а затем выполняется замыкание снизу вверх по коэффициентам жесткости зажима K_q (слева по Рис. 7) и режущего инструмента K_{Pi} (справа по Рис. 7).

Предложенная послойная классификация переменных системы (Рис. 7) является авторской и направлена на выделение параметров зависимых источников переменных с целью их дальнейшего сокращения. В частности, выделены 12 зависимых поперечных переменных в слоях III и IV, а также 12

зависимых продольных переменных в слоях VII и VIII.

Для выполнения моделирования полученный граф сигналов может быть реализован в специальной среде моделирования (Рис. 8) [21].

Для выполнения тестового моделирования были определены значения параметров и задаваемых активных сил.

Величину коэффициента жесткости в системе зажима принимали равной 35000 Н/мм для опор, 17 500 Н/мм для зажимного элемента и 8 750 Н/мм для режущего инструмента [17]. Усилие

зажима принималось исходя из допускаемой нагрузки на опорные пальцы со сферической головкой по ГОСТ 13441-68 [8] и составило 12 кН на одну опору диаметром 25 мм. Следовательно, для трех опор можно принять величину зажимающей силы 36 кН. Силу резания берем с учетом коэффициента трения покоя, принимаемого равным 0,1, в обратной величине от зажимного усилия — 3,6 кН. Результаты расчета на модели в программном комплексе SimInTech представлены на Рис. 9.

Обсуждение результатов.

Приведенные результаты расчета (Рис. 9) характеризуются следующими особенностями:

1) полученные значения деформаций лежат в пределах от 0,35 мм до 0,42 мм для элемента «зажим» и от 0,03 мм до 0,056 мм для элемента «режущий инструмент», что достаточно соотносится с эмпирическим опытом фрезерования, а разница между значениями отличается на порядок и соответствует порядку входных значений сил;

2) знаки полученных значений деформации соответствуют вербальной модели силового замыкания, так как деформация со стороны элемента «зажим» происходит против направления зажимной силы (соответственно, имеет знак «минус»), а деформация со стороны элемента «режущий инструмент» происходит по направлению действия условной нормальной силы резания (соответственно, имеет знак «плюс»);

3) при изменении величины силы резания от 1000 Н до 2000 Н деформация в элементе «зажим» находится примерно на одном уровне — около 0,42 мм при учете жесткости K_q (Рис. 9, а, в) и около 0,348 мм без учета этой жесткости (Рис. 9, д, ж);

4) при изменении величины силы резания от 1000 Н до 2000 Н деформация в элементе «режущий инструмент» изменяется в зависимости от учета жесткостей — имеет максимальное значение от 0,056 мм до 0,046 мм при учете одновременно жесткости элемента «зажим» K_q и жесткости элемента «режущий инструмент» K_{pn} (Рис. 9, а, б), при учете только K_q значение снижается от 0,05 мм до 0,04 мм (Рис. 9, в, г), при учете только K_{pn} значение снижается от 0,044 мм до 0,034 мм (Рис. 9, ж, з), без учета K_q и K_{pn} наблюдаются минимальные значения от 0,04 мм до 0,03 мм (Рис. 9, д, е);

5) максимальные величины деформаций получаются при учете обратных связей по параметрам жесткости K_q и K_{pn} , что указывает на важность их учета.

Полученные результаты позволяют считать верификацию модели в форме графов сигналов вполне адекватной.

Выводы. Таким образом, основная поставленная в работе цель достигнута —

выполнены преобразования полусного графа механической системы с сосредоточенными компонентами на примере силового замыкания фрезерного приспособления. При этом получено описание силового замыкания в форме замкнутой последовательности переменных системы, которое позволяет предположить наличие в системе свойств самонастройки, определить состав соответствующих параметров и переменных. Полученные результаты будут использованы для исследования взаимосвязи свойств самонастройки с конструктивными параметрами и технологическими режимами фрезерования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетов Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1985. 272 с.
2. Reshetov L. N. Self-aligning mechanisms. Translated from Russian by Leo M. Sachs. Moscow : Mir Publishers, 1982. 528 p.
3. Дровников А. Н. Адаптивные структуры механизмов и машин. Ростов : Изд-во Ростовского университета, 1984. 128 с.
4. Балакин П. Д. Механические системы с адаптивными свойствами // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 1. С. 15–20.
5. Балакин П. Д. Элементы теории реальных механических систем: монография. Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. 272 с.
6. Нейман М. С. Автоматические процессы и явления (Общие вопросы теории системы, содержащих управляющие кольца зависимостей). М. : Сов. Радио, 1958. 148 с.
7. Крайнев А. Ф. Идеология конструирования: Монография. М.: Машиностроение-1, 2003. 384 с.
8. Станочные приспособления: Справочник в 2-х т. / Под ред. Вардашкина Б. Н. М. : Машиностроение, 1984.
9. Стаханов А. Г. Приспособления фрезеровщика. М. : Машиностроение, 1987. 110 с.
10. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения / ГК СССР по управлению качеством продукции и стандартам. Издание официальное Москва: Издательство стандартов, 1990. 37 с.
11. Райцын Т. М. Синтез систем автоматического управления методом направленных графов. Л. : Энергия, 1970. 96 с.
12. Кудинов В. А. Динамика станков. М. : Машиностроение, 1967. 359 с.
13. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). М. : Машиностроение, 1981. Т.5. Измерения и испытания. Под ред. М. Д. Генкина, 1981. 496 с.
14. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера. - Киев: Техника, 1975. 768 с.
15. Системы автоматизированного проектирования в 9-ти кн. Кн. 4. Математические

модели технических объектов: Учеб. пособ. для вузов / В. А. Трудоношин, Н. В. Пивоварова; Под ред. И. П. Норенкова. М. : Высш. шк., 1986. 160 с.

16. Ильинский Н. Ф., Цаценкин В. К. Приложение теории графов к задачам электромеханики. - М. : Энергия, 1968. 200 с.

17. Корсаков В. С. Основы конструирования приспособлений: Учебник для вузов. М. : Машиностроение, 1983. 277 с.

18. Пипкин Ю. В., Зелинский А. Н., Коцюбинская Н. В. Базовая расчетная схема силового замыкания в станочных приспособлениях // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. Донецк : ДонНТУ, 2006. Вып. 31. С. 227–

237.

19. Пипкин Ю. В. Бариецентрические координаты на базе опорного треугольника при моделировании силового замыкания станочного приспособления // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2023. № 1(80). С. 62–71.

20. Пипкин Ю. В., Коцюбицкий В. Ю. Фрейм-ориентированный подход к составлению полусных графов механических систем с сосредоточенными компонентами // Научно-технические технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2023. № 2(76). С. 84–90.

21. Среда динамического моделирования SimInTech. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://simintech.ru/>.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Пипкин Юрий Владимирович – к.т.н., доцент кафедры технологии и организации машиностроительного производства, старший научный сотрудник НИЧ ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», Адрес: Российская федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16, <https://orcid.org/0000-0003-3770-5525> e-mail: tmsi_pipkin@mail.ru

Зинченко Андрей Михайлович – к.э.н., доцент, зав. кафедрой технологии и организации машиностроительного производства, старший научный сотрудник НИЧ ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», Адрес: Российская федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16, <https://orcid.org/0009-0006-0023-1003> e-mail: kafedra.tomp@dstu.education

Куберский Сергей Владимирович – к.т.н., профессор, профессор кафедры металлургических технологий, старший научный сотрудник НИЧ ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», Адрес: Российская федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16, <https://orcid.org/0009-0003-5970-9356> e-mail: kafedra.metteh@dstu.education

Заявленный вклад авторов:

Пипкин Юрий Владимирович – разработка идеи, постановка исследовательской задачи, оформление статьи.

Зинченко Андрей Михайлович – подготовка необходимых документов для публикации, вычитка, формулирование выводов.

Куберский Сергей Владимирович – курирование, подготовка необходимых документов для публикации, формулирование выводов, работа с редакцией.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

TRANSITION FROM THE POLE GRAPH OF A MECHANICAL SYSTEM TO THE SIGNAL-FLOW GRAPH ON THE EXAMPLE OF A MILLING WORKHOLDING FIXTURE

Pipkin Yuriy Vladimirovich^{1,*},
Zinchenko Andrej Mihajlovich¹,
Kuberskii Sergej Vladimirovich¹

Donbass State Technical University

*for correspondence: tmsi_pipkin@mail.ru



Article info

Received:

05 June 2024

Accepted for publication:

29 September 2024

Accepted:

10 October 2024

Published:

24 October 2024

Keywords: force closure, a milling workholding fixture, mechanical translational system, system with lumped components, pole graph, system signal-flow graph.

Abstract.

To improve milling workholding fixtures using mathematical modeling, it is convenient to use graph theory as a mathematical apparatus that naturally reflects the connections between structural elements or parameters of a technical system. However, modern systems for computer-aided design of structures in mechanical engineering do not have the appropriate functionality. The development of algorithms that ensure the application of graph theory is relevant for the research of workholding fixtures.

Using the example of research the force closure of a milling workholding fixture, the article examines the use of two sections of graph theory - pole graphs and signal-flow graphs. The capabilities of pole graphs are used to create a mathematical model of the structural organization of a design in the form of equivalent circuits of a translational mechanical system and a transition is made to the description of the equations of the mathematical model in the form of a signal-flow graph that clearly reflects the relationships between the parameters and variables of the technical system.

The performed transformations made it possible to obtain a description of the force closure of a milling workholding fixture in the form of a closed sequence of variables, which is considered as a theoretical prerequisite for studying the adaptive properties of the system.

Based on empirical initial data, a mathematical model in the form of a signal-flow graph, implemented in the SimInTech software package, was verified.

A conclusion is made about the applicability of the force closure model in the form of a signal-flow graph for further research and practical implementation

For citation: Pipkin Yu.V., Zinchenko A.M., Kuberskii S.V. Transition from the pole graph of a mechanical system to the signal-flow graph on the example of a milling workholding fixture. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 5(165):5-18. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-5-18, EDN: XYQAPP

REFERENCES

- Reshetov L.N. Self-aligning mechanisms: Handbook. [Samostanavlivajushhiesja mehanizmy: Spravochnik.] 2-e izd. pererab. i dop. M.: Mashinostroenie; 1985. 272 p. (rus)
- Reshetov, L. N. Self-aligning mechanisms. Translated from Russian by Leo M. Sachs. Moscow: Mir Publishers; 1982. 528 p.
- Drovnikov A.N. Adaptive structures of mechanisms and machines. [Adaptivnye struktury mehanizmov i mashin.] Rostov: Izd-vo Rostovskogo universiteta; 1984. 128 p. (rus)
- Balakin P. D. Mechanical systems with adaptive properties [Mehanicheskie sistemy s adaptivnymi svojstvami]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin.* 2014. № 1. P. 15–20. (rus)
- Balakin P.D. Elements of the theory of real mechanical systems: monograph [Elementy teorii real'nyh mehanicheskikh sistem: monografija]. Minobrnauki Rossii, OmGTU. Omsk : Izd-vo OmGTU; 2016. 272 p. (rus)
- Nejman M.S. Automatic processes and phenomena (General questions of the theory of systems containing control rings of dependencies). [Avtomaticheskie processy i javlenija (Obshhie voprosy teorii sistem, sodержashhij upravljajushhie kol'ca zavisimostej).] M.: Sov. Radio; 1958. 148 p. (rus)
- Krajnev A.F. Design ideology: Monograph. [Ideologija konstruirovaniya: Monografija.] M.: Mashinostroenie-1; 2003. 384 p. (rus)
- Workholding fixture: Handbook in 2 volumes. [Stanochnye prisposoblennija: Spravochnik v 2-h t.] / Pod red. Vardashkina B.N. M.: Mashinostroenie; 1984. (rus)
- Stahanov A.G. Milling workholding fixtures to machine operator [Prisposoblennija frezerovshhika.] M.: Mashinostroenie; 1987. 110 p. (rus)
- GOST 21495-76* Bazirovanie i bazy v mashinostroenii. Terminy i opredelenija = Locating and bases

in machine building industry. Terms and definitions. GK SSSR po upravleniju kachestvom produkcii i standartam. Izdanie oficial'noe. Moskva: Izdatel'stvo standartov; 1990. 37 p.

11. Rajcyn T.M. Synthesis of automatic control systems using the directed graph method [Sintez sistem avtomaticheskogo upravlenija metodom napravlenyh grafov.] L.: Energija; 1970. 96 p. (rus)

12. Kudinov V.A. Dynamics of machine tools. [Dinamika stankov.] M.: Mashinostroenie; 1967. 359 p. (rus)

13. Vibrations in technology: A reference book. At 6 volumes. V.5. Measurements and tests. [Vibracii v tehnikе: Spravochnik. V 6-ti t. T.5. Izmerenija i ispytaniya.] / Red. sovet: V.N. Chelomej (pred.). M.: Mashinostroenie; 1981. Pod red. M.D. Genkina, 1981. 496 p. (rus)

14. Sigorskij V.P. Mathematical apparatus of an engineer [Matematicheskij apparat inzhenera]. K.: Tekhnika; 1975. 768 p. (rus)

15. Trudonoshin V.A., Pivovarova N.V. CAD systems in 9 books. Book 4. Mathematical models of technical objects: study letter. for universities. Eds. I.P. Norenkov [Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v 9-ti kn. Kn. 4. Matematicheskie modeli texnicheskix ob'ektov: ucheb. posob. dlya vuzov]. M.: Vysshaya shkola; 1986. 160 p. (rus)

16. Il'inskij N.F., Cacenkin V.K. Applying Graph theory to electromechanical problems [Prilozhenie teorii grafov k zadacham e'lektromexaniki]. M.: Energiya; 1968. 200 p. (rus)

17. Korsakov V.S. Basics of designing retaining fixtures: Textbook for universities. [Osnovy konstruirovaniya prisposoblenij: Uchebnik dlja vuzov.] M.: Mashinostroenie; 1983. – 277 p. (rus)

18. Pipkin Ju.V., Zelinskij A.N., Kocjubinskaja N.V. Basic design scheme of force closure in workholding fixtures [Bazovaja raschetnaja shema silovogo zamykanija v stanochnyh prisposoblenijah] // Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunarodnyj sb. nauchnyh trudov. Doneck: DonNTU; 2006. Vyp. 31. P. 227–237.

19. Pipkin Ju.V. Barycentric coordinates on the specified to locating points triangle in modeling the force closure in workholding fixture. *Progressive technologies and systems of mechanical engineering*. 2023; 1(80):62–71.

20. Pipkin Ju.V., Kotsyubinsky V.Ju. Frame-oriented approach to formation pole graphs of mechanical systems with lumped components. «*Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building*». 2023; 2(76):84–90.

21. SimInTech dynamic modeling environment. Electronic resource. Access mode: <https://simintech.ru/>.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Pipkin Yu. Vladimirovich, C. Sc. in Engineering, Assistant Professor of the Department of Technologies and Organizations of Mechanical Engineering Production, senior scientific researcher SRD Donbass State Technical University, Lenina str., 16, 294204, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia
<https://orcid.org/0000-0003-3770-5525> E-mail: tmsi_pipkin@mail.ru

Zinchenko A. Mihajlovich, C. Sc. in Engineering, head of department of the Department of Technologies and Organizations of Mechanical Engineering Production, senior scientific researcher SRD Donbass State Technical University, Lenina str., 16, 294204, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
<https://orcid.org/0009-0006-0023-1003> E-mail: kafedra.tomp@dstu.education

Kuberskii S. Vladimirovich, C. Sc. in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies, senior scientific researcher SRD Donbass State Technical University, Lenina str., 16, 294204, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, <https://orcid.org/0009-0003-5970-9356> E-mail: kafedra.metteh@dstu.education

Contribution of the authors:

Pipkin Yu. Vladimirovich – development an idea, formulation of a research problem, making edits.

Zinchenko A. Mihajlovich – preparation of necessary documents for publication, making edits due to proofreading, formulation of conclusions.

Kuberskii S. Vladimirovich – supervision, preparation of necessary documents for publication, formulation of conclusions, work with the editorial board.

All authors have read and approved the final manuscript.

