

CAD, CAE ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УЗЛОВ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

© 2016 Н.В. Емельянов, В.Л. Зубенко, И.В. Емельянова

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

В статье приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований суппортной группы токарных станков с ЧПУ. Даны рекомендации, направленные на повышение показателей точности приводов подачи.

Ключевые слова: суппорт, станина, перекосящий, накладные направляющие виртуальная лаборатория, CAE технологии.

Высокое качество обработки на станках с ЧПУ определяется их эксплуатационными показателями и техническим уровнем, определяемым в частности конструктивным исполнением, технологичностью конструкции, надежностью и долговечностью.

При этом точность обработки снижается за счет погрешностей из-за перекосящего суппорта, наличия зоны нечувствительности при реверсе и возникновению нежелательных фрикционных колебаний [1,3].

При решении практических и научных задач повышения точности обработки оборудования, работающего по «гибкой» технологии, на этапах анализа и синтеза конструкции, технологической подготовки производства и научных исследованиях используют инновационные технологии [1, 3].

Элементами станочной системы являются ее функциональные элементы, которые могут быть представлены алгебраическими, топологическими, теоретико-множественными и 2D, 3D моделями.

Задача исследования и проектирования станочной системы - станок с ЧПУ, РМ, РТК и т.д., является задачей синтеза сложной системы, заключающаяся в построении математической модели, физическая реализация которой обеспечивает изготовление системы с заданными свойствами.

Одним из распространенных методов проектирования является метод косвенного синтеза, основанный на использовании методов теоретического и экспериментального исследования.

Теоретическое исследование, заключающееся в составлении и решении математической мо-

дели, может существенно упроститься при соответствующем выборе ее описания: во временном, частотном или операторном представлении протекающих процессов и явлений в системе.

Так, например, при исследовании систем привода главного движения и подачи на переходных режимах используют временное представление происходящих процессов в системе с помощью систем дифференциальных или интегральных уравнений.

На установившихся режимах применяют частотное представление, связанное с разложением периодической функции времени $g\{t\}$ с периодом T в ряд Фурье и получением частотного спектра и значениями амплитуд каждой гармоники. Если функция $g\{t\}$ непериодическая, тогда разложение заменяют интегрированием согласно обратному преобразованию Фурье, используя спектральную плотность $g\{w\}$. Операторное представление функции $g\{t\}$ связано с обратным преобразованием Лапласа $\{L-1\}$ соотношением $g\{t\} = L^{-1} [g\{p\}]$.

Переход от операторного к частотному представлению осуществляется подстановкой $p = j\omega$.

В этом случае преобразование Лапласа и Фурье совпадают.

Инструментами исследования являются программы инженерного анализа CAD, CAE технологии такие как:

- универсальные конечно-элементные программы: ANSYS, ALGOR, NASTRAN, COSMOS;
- специализированные программы нелинейного анализа ABAQUS, LS-DYNA3D;
- программа анализа гидро-, газодинамических процессов FLOTRAN;
- программа кинематического структурного анализа типа ADAMS;
- препроцессор подготовки и передачи геометрических моделей из CAD систем в CAE системы CADfix.

Системами автоматизированного проектирования (CAD) являются AutoCAD и его приложения; КОМПАС 3D, ArchiCAD, Solid Edge, CADdy и др.

Емельянов Николай Владимирович, старший преподаватель кафедры «Инженерная графика».

E-mail: ask@samgtu.ru

Зубенко Виктор Леонтьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».

Емельянова Ирина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика».

Это программное обеспечение предоставляет мощный математический инструмент для решения комплексных задач анализа состояния конструкций и протекающих процессов.

Процесс проектирования и конструирования, как правило, итеративный и предполагает перебор нескольких вариантов построения и решения модели будущего изделия. Одним из широко распространенных методов решения этой задачи является параметрическое проектирование (параметризация), основанное на моделировании деталей и изделий с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время перебрать с помощью изменения параметров или геометрических отношений различные конструктивные схемы, выбрать оптимальные решения и избежать принципиальных ошибок.

В случае параметрического проектирования создается по сути математическая модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации и размеров деталей, их взаимного расположения в сборках и т. п.

Использование технологии параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели, в результате чего пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом.

Современные технологические системы (станки моделей 16Б16Ф3, 16Б16Т1, 1716ПФ3, 1716ВФ4 и др.) для выполнения своих рабочих функций имеют различную компоновку элементов несущей системы [1,2,3], в которых основной причиной перекоса суппорта является несовпадение вектора равнодействующей сил трения $F_{тр}$ в направляющих с осью жесткости упругой системы перемещающегося исполнительного органа (рис. 1).

Расчетная математическая модель (токарных станков типа 16Б16Ф3, 16Б16Т1) для определения пространственного положения суппорта, перемещающегося по комбинированным направляющим, плоскость которых горизонтальна (рис. 1), имеет вид:

$$\begin{aligned} & \sqrt{2}(R_{пр} - F_{тр}^{пр} + R_{лев} - F_{тр}^{лев}) - 2m_1g - 2Q_v + \sqrt{2}F_{под}^{лев} = 0 \\ & 2Q_{1_{хвг}} - 2M'_{упр} - 2M_{хв}^B - 2Q_v(L - l_1 - l'_m) + \sqrt{2}(R_{пр} - F_{тр}^{пр}) \\ & (L - l'_m - l_{пр}) - \sqrt{2}(R_{лев} - F_{тр}^{лев})(l'_m - l_{лев}) - \sqrt{2}F_{под}^{пер}l'_m = 0 \\ & \sqrt{2}(R_{лев} + F_{тр}^{лев} - R_{пр} - F_{тр}^{пр}) - 2Q_r + \sqrt{2}F_{под}^{лев} = 0 \\ & 2M''_{упр} - 2M_{хв}^r - \sqrt{2}(R_{пр} + F_{тр}^{пр})(L_k - l'_m - l_{пр}) - \\ & - \sqrt{2}(R_{лев} + F_{тр}^{лев})(l'_m - l_{лев}) + 2Q_{1_{хвг}} - \sqrt{2}F_{под}^{лев}l'_m = 0 \\ & Q - F_{тр}^{пр} - F_{тр}^{лев} - F_{тр}^{зад} = 0 \\ & R_{зад} = m_2g - F_{под}^{зад} \\ & M'_{упр} = R_{зад}(l''_m - l_{зад}) + F_{под}^{зад}l''_m \\ & M''_{упр} = F_{тр}^{зад}q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{2}(R_{пр} - F_{тр}^{пр} + R_{лев} - F_{тр}^{лев}) - 2m_1g - 2Q_v + \sqrt{2}F_{под}^{лев} = 0 \\ & 2Q_{1_{хвг}} - 2M'_{упр} - 2M_{хв}^B - 2Q_v(L - l_1 - l'_m) + \sqrt{2}(R_{пр} - F_{тр}^{пр}) \\ & (L - l'_m - l_{пр}) - \sqrt{2}(R_{лев} - F_{тр}^{лев})(l'_m - l_{лев}) - \sqrt{2}F_{под}^{пер}l'_m = 0 \\ & \sqrt{2}(R_{лев} + F_{тр}^{лев} - R_{пр} - F_{тр}^{пр}) - 2Q_r + \sqrt{2}F_{под}^{лев} = 0 \\ & 2M''_{упр} - 2M_{хв}^r - \sqrt{2}(R_{пр} + F_{тр}^{пр})(L_k - l'_m - l_{пр}) - \\ & - \sqrt{2}(R_{лев} + F_{тр}^{лев})(l'_m - l_{лев}) + 2Q_{1_{хвг}} - \sqrt{2}F_{под}^{лев}l'_m = 0 \\ & Q - F_{тр}^{пр} - F_{тр}^{лев} - F_{тр}^{зад} = 0 \\ & R_{зад} = m_2g - F_{под}^{зад} \\ & M'_{упр} = R_{зад}(l''_m - l_{зад}) + F_{под}^{зад}l''_m \\ & M''_{упр} = F_{тр}^{зад}q \end{aligned}$$

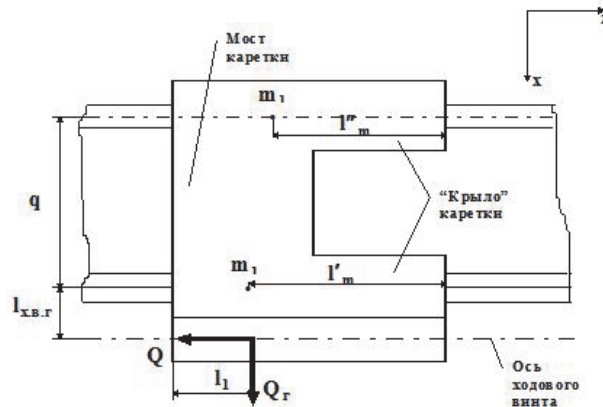


Рис. 1. Силы, действующие на суппорт станка с ЧПУ

Для проверки правильности расчетной модели перекоса суппорта и результатов расчетов, выполненных на ЭВМ на базе инновационных САЕ – технологий [1], были проведены экспериментальные исследования на станках мод. 16Б16Ф3, 18Б16Т1. Бесконтактные индуктивные датчики фиксировали изменение зазора между измерительной плоскостью датчика и шлифованными участками станины в точках, показанных на рис. 2.

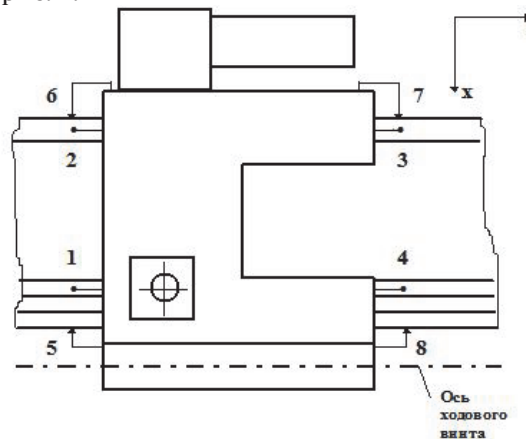


Рис. 2. Схема расположения датчиков при замере перекоса

На графиках рис. 3 приведены результаты расчета перекоса суппорта и экспериментальные данные в зависимости от скорости реверса и нагрузки суппорта дополнительными массами, приводящими к изменению сил трения:

- случай I - суппорт без дополнительной массы;
- случай II - дополнительная масса 130 кг на середине поперечного суппорта.

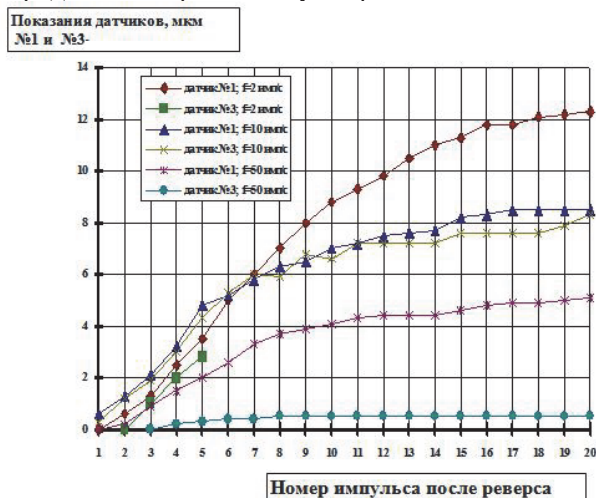


Рис. 3. Перекос суппорта в точках установки датчиков 1 и 3

Оценка влияния процесса резания на перекос суппорта проводилась при точении стали 45 на проход проходным резцом со сменной твердосплавной треугольной пластиной ($\gamma = 12^\circ$; $\alpha = 7^\circ 30'$) на малых подачах ($S = 0,1$ и $0,5$ мм/с) при различном числе оборотов шпинделя. Глубина резания менялась в пределах $0,5...3,5$ мм.

Эксперимент проводился по следующей схеме: суппорт перемещался в направлении +Z, потом происходил реверс и движение в направлении -Z. Затем происходило врезание резца в обрабатываемую деталь и дальнейшее ее точение. Расстояние от точки реверса до врезания определялось из условия, чтобы за это время перекос холостого хода достиг практически максимальной величины.

Программное обеспечение ПО включает алгоритмы обработки данных в детерминированной и стохастической постановке. Например, ПО «РС – лаборатория». Это программное обеспечение для исследования динамических процессов виртуальными приборами измерения включает: PCS500. Двухканальный цифровой осциллограф (с памятью) анализатор спектра и регистратор переходных процессов. PCS100 / K8031 Одноканальный цифровой осциллограф памяти (хранения), анализатор спектра и переходный регистратор. PCG10 / K801 генератора функций РС.

Datafeat - это математический инструмент нелинейного регрессионного анализа с построением кривых статистическими методами. Позволяет использовать до 9 независимых переменных, для регрессивных моделей – до 20 параметров.

Во всех проведенных экспериментах при точении на проход в момент врезания резца в обрабатываемую деталь происходило увеличение перекаса. Причем, при увеличении глубины

резания не наблюдалось закономерного роста перекаса. Например, величина увеличения перекаса при врезании для точек 1 и 4 (рис. 4) при $n_{шп} = 450$ об/мин составляла соответственно $1...3$ и $0,3...0,5$ мкм во всем диапазоне глубин резания.

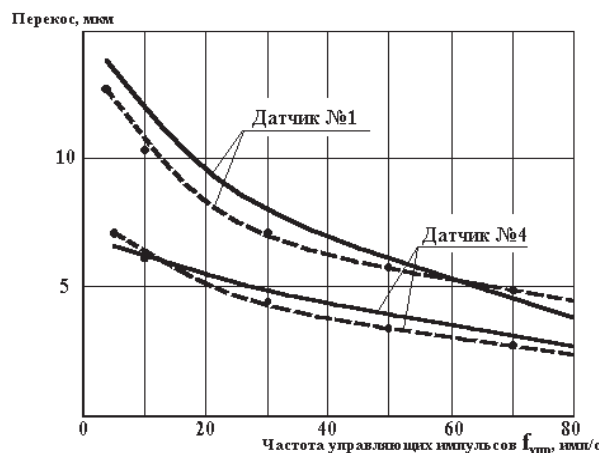


Рис. 4. Сравнение экспериментальных (---) и теоретических (—) зависимостей перекаса в точках установки датчиков 1 и 4 от скорости реверса

В станкостроении значительное распространение получили накладные направляющие из пластмасс. в том числе в станках с ЧПУ, тяжелых и высокоточных (1716ПФ3, 1716ВФ4).

Применение пластмасс для направляющих скольжения металлорежущих станков имеет целью повышение точности и долговечности станков, в частности, за счет снижения сил трения пары «станина-суппорт». При работе в паре с чугуном (закаленными чугуном и сталью) эти направляющие обеспечивают малое трение, равномерность медленных перемещений (подач), высокие точность и чувствительность позиционирования, демпфирование колебаний, достаточную износостойкость и жесткость. В то же время, эти материалы способны при необходимости (в аварийных условиях) работать без смазочного материала с ограниченной интенсивностью изнашивания, без заедания.

Для накладных направляющих столов, салазок, бабок и других узлов станков используется лента толщиной 1,5-2 мм из наполненного фторопласта, подготовленная к склеиванию. Материалы на основе фторопласта (Фторопласт-4, Ф4К15М5, Торсайт «Б» и др.) отличаются высокой стабильностью свойств в рабочих средах, выдерживают сравнительно высокую температуру (например, торсайт «Б» - до 230°C), Лента из фторопласта марки Ф4К15М5, обработанная с двух сторон в тлеющем разряде, при склеивании клеями на основе эпоксидных смол обеспечивает высокую прочность клеевого шва. Высокую прочность склеивания дают также подготовленные к склеиванию ленты из торсайта «Б» и рулона ЛД.

Учитывая сравнительно низкую жесткость, а также наличие ползучести материалов на ос-

нове фторопласта, ограничивают давление при использовании накладных направляющих из наполненного фторопласта до 2 МПа.

Модели токарных станков с ЧПУ (типа 1716ПФ3, 1716ВФ3, 17К20ПФ3 и др.) имеют "наклонные" направляющие станины, в которых передняя и задняя направляющие расположены под углом α к вертикальной плоскости.

Расчетная модель подсистемы «суппорт - направляющие» (рис. 5, 6) с учетом деформаций, перекоса суппорта и смещения вершины режущего инструмента при реверсе, имеет вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} \Sigma X &= 0, P_x + f(A + B + C) - Q = 0, \\ \Sigma Y &= 0, -P_y - B + (G_c + G_k) \cos \alpha = 0, \\ \Sigma Z &= 0, -P_z - (G_c + G_k) \sin \alpha + A + C = 0, (1) \\ \Sigma M_x &= 0, -P_z z_p + P_y y_p - Cl + (G_c z_{gc} + G_k z_{gk}) \cos \alpha - \\ & (G_c y_{gk} + G_k y_{gk}) \sin \alpha = 0 \\ \Sigma M_y &= 0, P_x x_p - P_z z_p - Ax_a - Cx_c + (G_c x_{gc} + G_k x_{gk}) \sin \alpha = 0 \\ \Sigma M_z &= 0, P_x y_p - P_y x_p - Qy_p + (G_c x_{gc} + G_k x_{gk}) \cos \alpha - \\ & Bx_b + fCl - fB a/2 = 0 \end{aligned}$$

Из системы уравнений (1) находим [1]:

$$\begin{aligned} B &= (G_c + G_k) \cos \alpha - P_y; \\ A &= P_z + (G_c + G_k) \sin \alpha - C; \\ Q &= P_x + f(A + B + C); \\ C &= [P_z y_p - P_y z_p + (G_c z_{gc} + G_k z_{gk}) \cos \alpha - (G_c y_{gk} + G_k y_{gk}) \sin \alpha] / l \end{aligned}$$

По реакциям на гранях А, В, С направляющих определяем величины средних и максимальных давлений $p_a, p_b, p_c, p_a^{max}, p_b^{max}, p_c^{max}$.

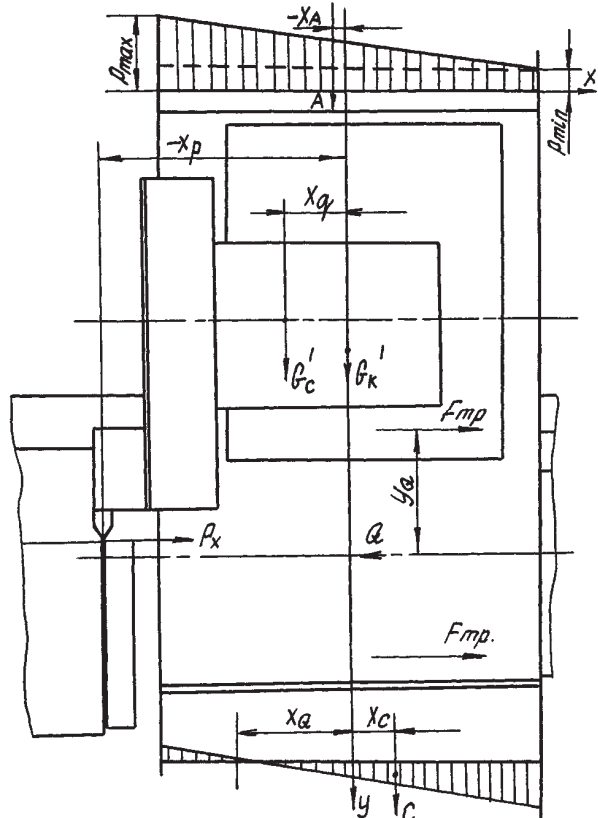


Рис. 5. Силовые факторы, действующие на суппорт станка в плоскости XY

С учетом А, В, С – ширины граней направ-

ляющих и силовых факторов и воздействий; контактные перемещения – Δ в направляющих (при наличии смешанного трения)

$$\Delta = K p, \quad (2)$$

где К – коэффициент податливости;

углы поворота салазок суппорта в плоскостях YOZ, XOZ и XOY в результате контактных деформаций

$$\begin{aligned} \varphi_{yoz} &= K (p_a - p_c) / l + \Delta / l_1 \\ \varphi_{xoz} &= [(12 M_y K_\varphi K_\Delta K_c) / (A+C) l^3] + \Delta / l, \\ \varphi_{xoy} &= (12 M_z K_\varphi K_\Delta K) / b l^3, \end{aligned} \quad (3)$$

где K_φ – коэффициент, учитывающий распределение давлений по длине направляющих; l – длина грани; K_Δ – коэффициент, учитывающий перераспределение давлений в зависимости от величины зазора; К – коэффициент, учитывающий распределение давлений по длине направляющих.

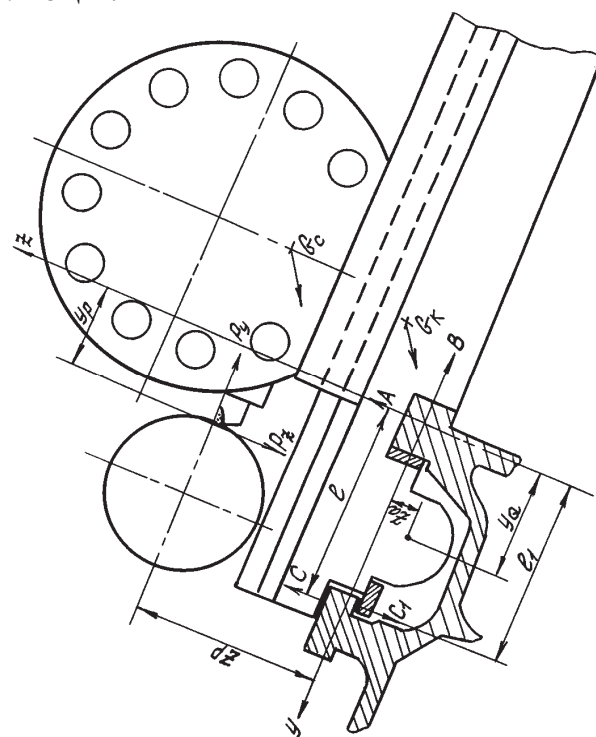


Рис. 6. Расчетная схема системы «суппорт - заготовка»

Контактные деформации приводят к точке приложения силы резания и учитывают по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

Упругие перемещения резца с координатами X_1, Y_1, Z_1

$$\begin{aligned} \delta_y &= \delta_{y0} + \varphi_{yoz} Z_1, \\ \delta_z &= \delta_{z0} + \varphi_{yoz} Y_1, \\ \delta_x &= K_\tau \tau_x + \varphi_{xoy} X_1 \end{aligned} \quad (4)$$

где δ_{y0}, δ_{z0} – упругие перемещения точки O_1 – начала координат, расположенного посередине между направляющими

$$\delta_{y0} = K p_b; \quad \delta_{z0} = K (p_a - p_c) / 2. \quad (5)$$

Величина пространственного отклонения

вершины режущего инструмента $\delta_{\Sigma x}$, $\delta_{\Sigma y}$, $\delta_{\Sigma z}$, с учетом зоны нечувствительности при реверсе и деформации подсистемы «суппорт-станина» переносится на деталь в виде следующих погрешностей, величины которых зависят от вида обработки, а также условий сборки, в частности, «затяжки» клина.

$$\begin{aligned} \delta_{\Sigma x} &= 2F/C\Sigma_{np} + \delta_x; \\ \delta_{\Sigma y} &= 3НПР_{пн} + \delta_y = 3НПР_{пн} + Kp_B + K(p_A - p_C)z_p/l + \Delta l_1; (6) \\ \delta_{\Sigma z} &= \delta_z; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\Sigma x}^2 + \delta_{\Sigma y}^2 + \delta_{\Sigma z}^2}. \end{aligned}$$

Таким образом, по приведенным выше формулам можно рассчитать перемещение вершины резца в трех взаимно перпендикулярных направлениях, обусловленные пространственной переориентацией суппорта при реверсе, и, погрешности, возникающие при обработке деталей сложного профиля, вызванные указанными явлениями.

С учетом полученных зависимостей составлена программа расчета переориентации суппорта при реверсе и смещение вершины инструмента (рис. 7), позволяющая определить точность обработки на станке с учетом жесткости привода подачи и конструкции узла суппорта станка (задача анализа), или по заданной точности обработки осуществить проек-

тирование системы «направляющие-суппорт» с получением конструктивных размеров суппорта с учетом названных ранее факторов (задача проектирования).

В диалоговом режиме осуществляется анализ результатов расчета; изменение параметров системы, силовых факторов, конструктивных параметров и проведение расчетов до получения рациональных параметров конструкции и оптимальных эксплуатационных характеристик.

Разработанное программное обеспечение позволяет при решении задачи анализа получить величину пространственной переориентации суппорта, отклонение вершины режущего инструмента с учетом жесткости цепи привода подачи, величины ЗНПР и контактных деформаций подсистемы «направляющие - суппорт» станка и факторов, обусловленных условиями сборки узлов станка («затяжка» клина) с целью дальнейшей компенсации погрешностей станка.

По данной методике были проведены расчеты привода главного движения и подачи токарного станка с ЧПУ, выявлена степень влияния пространственных деформаций систем на величину точности обработки деталей сложного контура [3].

Экспериментальное изучение характера переориентации суппорта в зависимости от его условий сборки и определение величины момента трения в направляющих проводилось на станке модели 1716ПФ3 в 3-х положениях суппорта по длине направляющих станины: у шпинделя станка, в среднем положении станины и около задней бабки при различной регулировке («затяжке») клина.

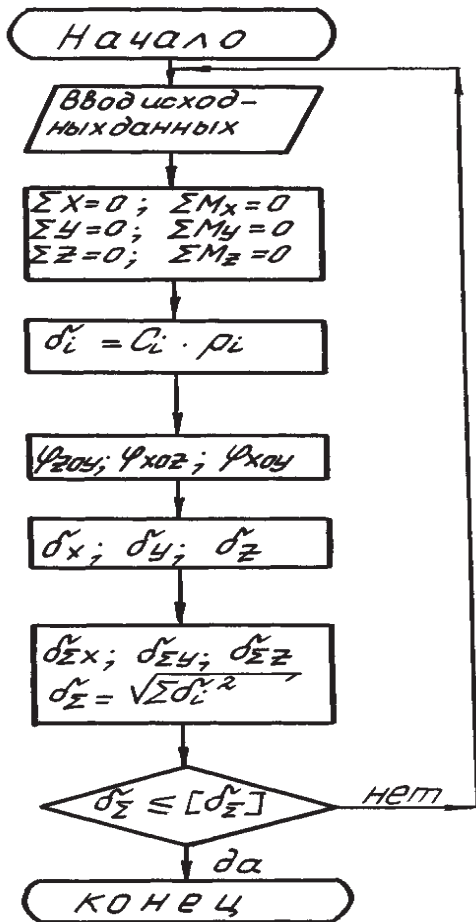


Рис. 7. Структурная блок-схема алгоритма программы

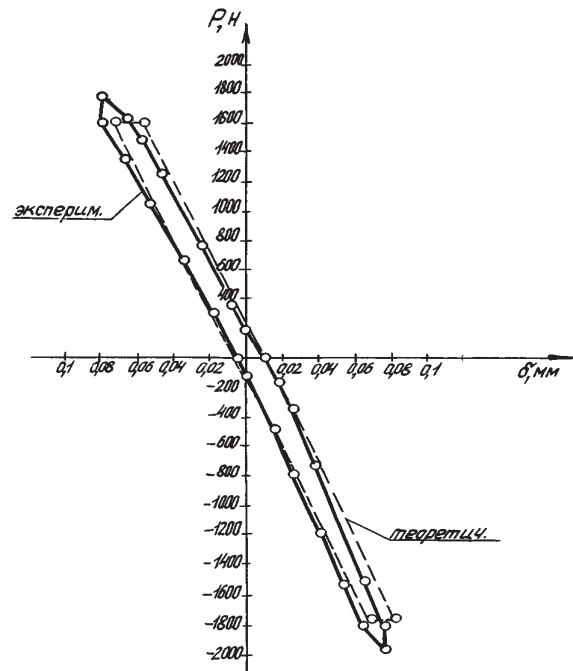


Рис. 8. Жесткость привода продольной подачи станка мод. 1716ПФ4

Одновременно с этим фиксировалась величина момента трения в системе с помощью тензометрических датчиков, установленных на ходовом винте по мостовой схеме с токосъемными кольцами [1, 3]. При обработке траектория резца вначале смещается из-за погрешностей станка, а затем - по мере износа резца. Задача управления — не допустить выхода резца из установленной зоны и появления брака. Для чего необходимо вводить подналадочные импульсы с помощью системы ЧПУ в направлении «к детали» при износе задней грани.

Количество подналадок N равно [1]:

$$N = h_{\text{пр}} / h_{\text{з}}.$$

Сравнение результатов расчета величин упругих деформаций и жесткости приводов на ЭВМ показало удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными (рис. 8).

Разработанное программное обеспечение и практические рекомендации переданы СВЗ, которые нашли применение при проектировании новых моделей станков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубенко В.Л., Емельянов Н.В.* Приводы станков с ЧПУ. Монография. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. 325 с.
2. *Проников А.С.* Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
3. *Денисенко А.Ф., Зубенко В.Л., Болотов Б.Е.* Прогнозирование надежности станочных систем по виброакустическим критериям. М.: Машиностроение-1, 2004. 254 с.

CAD, CAE TECHNOLOGIES OF DESIGNING TAKING INTO ACCOUNT FORCES OF THE FRICTION OF MOBILE CONNECTIONS OF KNOTS OF LATHES WITH NUMERICAL PROGRAMMED CONTROL

© 2016 N.V. Yemelyanov, V.L. Zubenko, I.V. Yemelyanova

Samara State Technical University

In article results analytical and experimental researches of support group of lathes with ЧПУ are resulted. The recommendations directed on increase of indicators of accuracy of drives of giving are made.
Keywords: support, bed, warp, waybills directing, virtual laboratory, CAD, CAE technologies.

Nikolay Yemelyanov, Senior Lecturer at the Engineering Graphics Department. E-mail: ask@samgtu.ru
Viktor Zubenko, Candidate of Technics, Associate Professor at the Automated Machine Tools and Tooling Systems Department.
Irina Yemelyanova, Candidate of Technics, Associate Professor at the Engineering Graphics Department.