УДК 621.9.06.001.5.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ 5 КООРДИНАТНОГО СТАНКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ

[1)]Николай Алексеевич Серков, [2)]Илья Семёнович Шлесберг, [2)]Игорь Викторович Никуличев, [1)]Александр Александрович Мерзляков

[1)] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

serkov1943@mail.ru

[2)] Открытое акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий», Москва, Россия

sis@niat.ru

Аннотация. *В работе представлены результаты экспериментального исследования жесткости 5-координатного станка мод. МС - 300 (ОАО НИАТ). Станок имеет последовательную структуру. Измерение статической жесткости проводилось с помощью измерительного устройства, позволяющего определять «петлю жесткости» (сжатие - растяжение) при одной установке на станке. Представлена динамическая модель (блок – схема) несущей системы станка. Предлагается использовать характер поведения «петли жесткости» в качестве диагностического признака для контроля качества изготовления (сборки) и эксплуатации многокоординатного станка с ЧПУ.*

Ключевые слова: *5 координатный станок с ЧПУ, статическая жесткость, «петля жесткости», качество сборки и эксплуатации станка.*

AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF STATIC RIGIDITY 5-AXES CNC MACHINE TOOL WITH SEQUENTIAL STRUCTURE OF CARRYING SYSTEM

[1)] N. Serkov [2)] I. Shlesberg , [2)]I. Niculichev [1)]A. Merzlyakov

[1)]Federal budget-funded research Institute of Machines Science named after A.A.Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[2)]Joint Stock Company "National Institute of Aviation Technologies ", Moscow, Russia

Abstract. *An experimental research's results of rigidity 5-axes machine tool MS - 300 (JSC NIAT) are represented in work. The machine tool has a sequential structure. A measurement of the static rigidity was proceeded using a measuring device which allows to determine the " loop of rigidity " (compression - tension) at the same installation on the machine tool. The dynamic model (block-diagram) carrying system of the machine tool is represented. The behavior of " loop of rigidity " as a diagnostic agency for the quality of manufacture's control (assembly) and multi-axis CNC machine tool exploitation is proposed to use.*

Keywords*: 5-axes CNC machine tool, static rigidity, "loop of rigidity", the quality of assembly and machine tool exploitation.*

Введение. Многоцелевые станки с ЧПУ предназначены для эффективного изготовления деталей в различных отраслях машиностроения. Требования к точности изготовления деталей непрерывно возрастают.

Поэтому проектирование, изготовление и эксплуатация станков в значительной степени подчиняются критерию точности изготавливаемых на них деталей.

Точность изготовления деталей на станке обеспечивается:

- точностью станка,

- малыми силовыми и температурными деформациями, приведенными к рабочим органам станка,

- сохранением точности станка в межремонтные периоды (малый износ и коробление несущей системы).

Обеспечение малых приведенных силовых деформаций несущей системы станка непосредственно зависит от статической и динамической жесткости.

Несущая система (НС) машины (станка) – это совокупность механизмов, через которые осуществляется передача (замыкание) сил при выполнении основных и вспомогательных операций рабочего процесса (РП).

В настоящее время для отдельных моделей многоцелевых станков с ЧПУ фрезерно-расточной группы (станок мод. DHP 50 DHP 80 ф. Mori Seiki International SA (Япония и Швейцария) достигнута высокая статическая жесткость 120 Н/мкм [1]. Хорошая статическая жесткость считается 60-80 Н/мкм [2].

Следует отметить, что вопросам экспериментального исследования (измерения и оценки) статической жесткости уделяется недостаточное внимание и число публикаций на данную тему в стране и за рубежом сравнительно небольшое.

Ниже представлены результаты экспериментального исследования суммарной статической жесткости станка мод. МС-300 (ОАО НИАТ) [3-4].

Компоновочная схема станка с системами координат, расположенными на звеньях механизмов несущей системы, представлена на рис. 1.

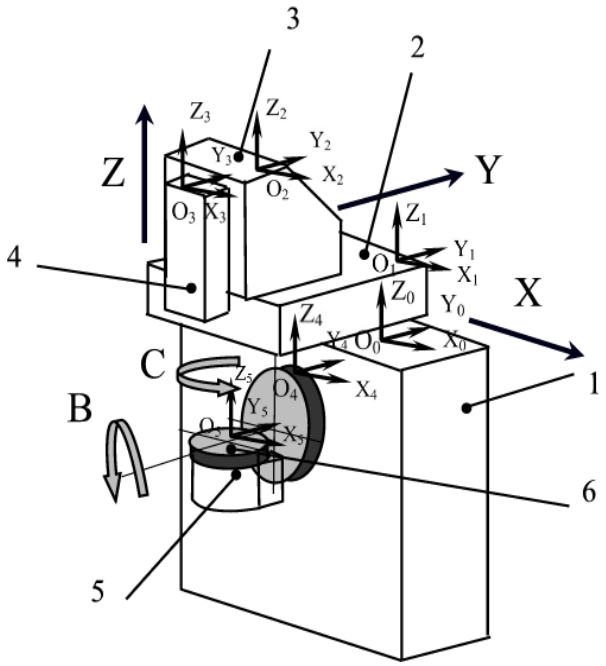


Рис. 1. Компоновочная схема станка: 1 - станина, 2 – салазки, 3 – стойка, 4 – шпиндельная бабка, 5 – корпус планшайбы, 6 – планшайба.

Методика и средства измерения статической жесткости. Для измерения статической жесткости использовалось устройство (рис.2), разработанное и изготовленное совместно ИМАШ РАН и ОАО НИАТ [5].

В устройстве применен датчик силы сжатия-растяжения с цифровым отсчетным устройством мод. UU ф. DACELL. CO (Korea). Он имеет:

- номинальный диапазон измеряемой силы 0-5000 Н,
- дискретность отсчета 1Н
- нелинейность 0,03%

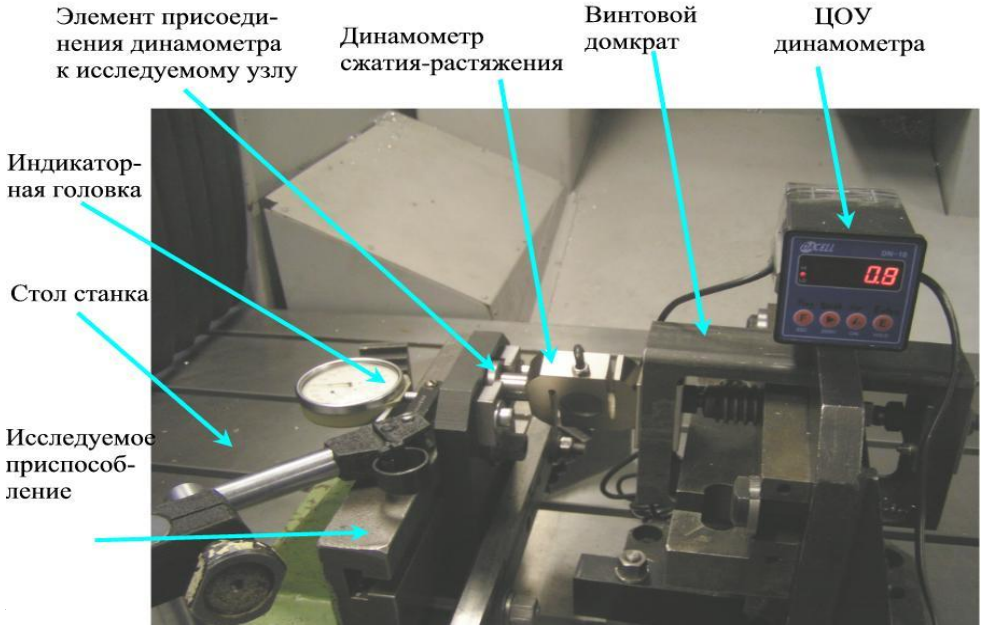


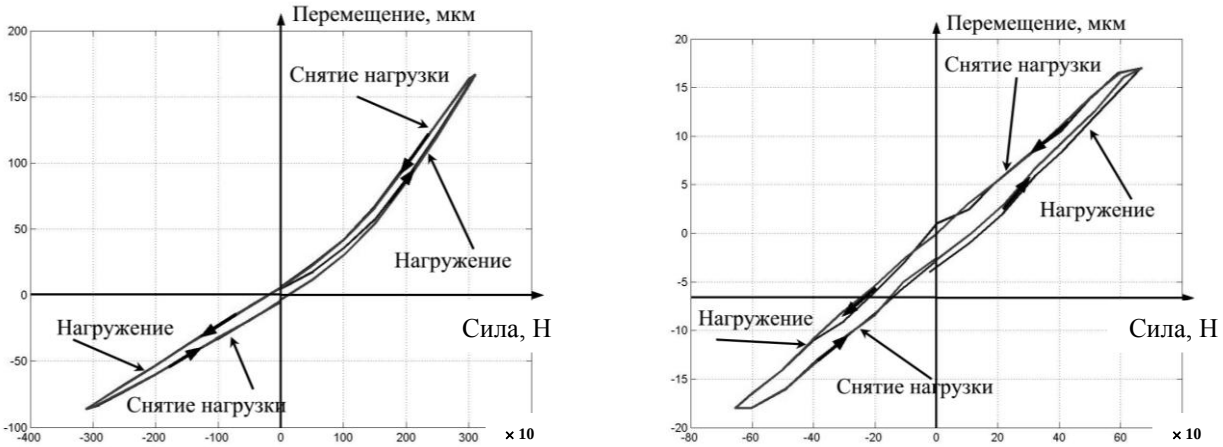
Рис. 2

Нагружение несущей системы станка осуществляется с помощью винтового домкрата. Величина нагружения (сжатия – растяжения) измеряется датчиком силы с цифровым отсчетным устройством.

Для измерения перемещений (деформаций) при сжатии и растяжении при одной настройке устройства был спроектирован и изготовлен специальный элемент присоединения датчика к исследуемому узлу. Это позволяет в отличие от широко используемых механических динамометров сжатия и растяжения мод. ДОСМ-3 и ДОРМ-3 (по точности соответствующих задачам измерения статической жесткости несущей системы широкого класса машин) получать кривые статической жесткости в виде петли гистерезиса.

Опробование устройства было проведено при нагружении стандартного станочного приспособления (кронштейн из чугуна), предназначенного для крепления обрабатываемой детали на рабочем столе станка. Приспособление было установлено на столе станка «Гексамех-1» [6] (рис.2).

С помощью описанного устройства была получена характеристика статической жесткости (станочное приспособление – стол) в виде петли гистерезиса (рис. 3).



а) б)

Рис. 3. Характеристика статической жесткости станочного кронштейна – приспособления: а) при диапазоне нагружающей силы -3000 ÷ 3000 Н, б) при диапазоне -600 ÷ 600 Н

На рис. 4 представлена схема нагружения несущей системы станка МС - 300 и схема измерений деформаций (относительных перемещений шпиндель-планшайба). Здесь: 1 – стойка, 2 – планшайба, 3 - кронштейн, устанавливаемый на планшайбе, 4 – шпиндельная бабка. Домкратом через датчик силы создается сила Fy, нагружающая несущую систему станка в направлении оси Y. Деформации Dx, Dy, Dz корпуса шпинделя относительно зеркала планшайбы измеряются с помощью индуктивных датчиков Микрон 02.

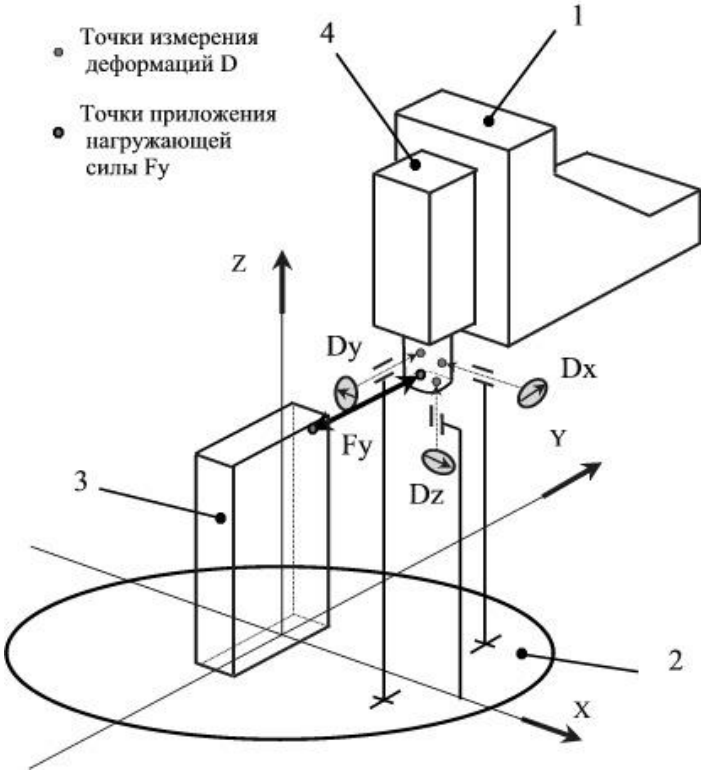


Рис. 4. Схема нагружения несущей системы станка МС 300 и схема измерений деформаций

Суммарная статическая жесткость J_{ik} по линейным координатам определяется как отношение силы Fi, действующей в направлении оси i, к деформации Dk в направлении оси k в точке, принадлежащей присоединительной поверхности конуса шпинделя или близко к ней расположенной:

$$J_{ik} = Fi/Dk \text{ [Н/мкм]}.$$

Крутильная жесткость планшайбы J_{cc} относительно станины, с целью её сопоставления с жесткостью по линейным координатам, определялась как отношение деформации в точке на зеркале планшайбы к силе, действующей в плоскости планшайбы. Точка измерения деформаций располагалась на радиусе R = 100 мм от оси вращения планшайбы, а направление измерений перемещения совпадало с касательной к окружности. Сила нагружения прикладывалась к планшайбе в плоскости её зеркала на плече H = 100 мм относительно оси вращения планшайбы.

Результаты исследования статической жесткости станка мод. МС - 300

Линейные координаты. На рис. 5 представлены экспериментальные кривые статической суммарной жесткости (планшайба – корпус шпинделя) несущей системы при нагружении вдоль оси *X* (показаны результаты трёх прогонов (нагружение - разгружение) измерений).

При нагружении по координате *Y* поведение статической жесткости аналогично статической жесткости, как при нагружении по координате *X*.

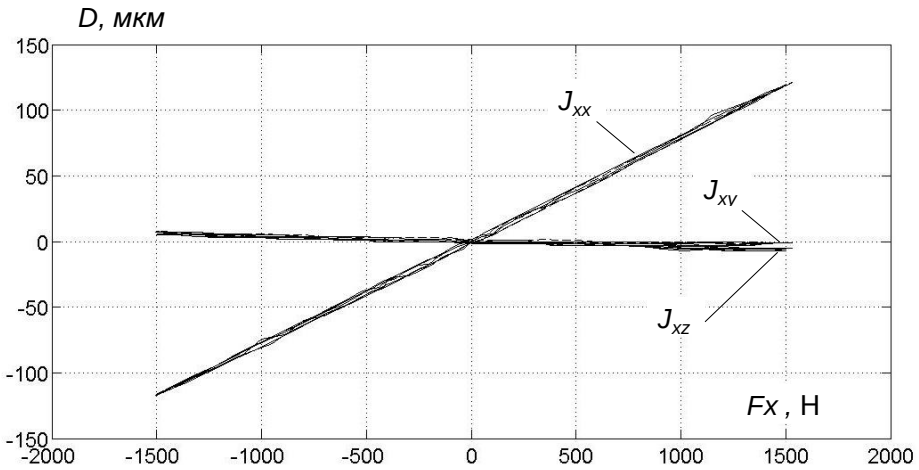


Рис. 5. Кривые статической жесткости при нагружении вдоль оси X.

Экспериментальные кривые статической жесткости J_{zz}, J_{zx}, J_{zy} несущей системы при нагружении вдоль оси *Z* представлены на рис. 6.

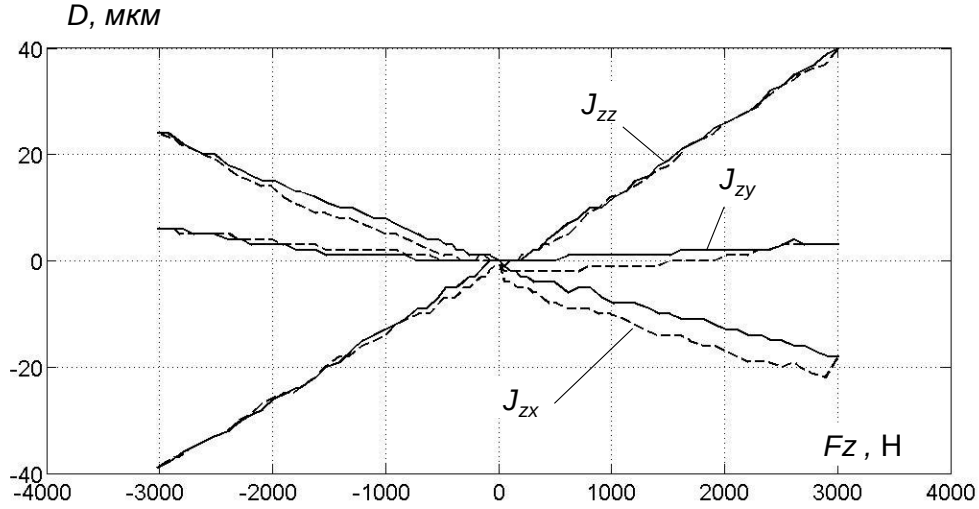


Рис. 6. Кривые статической жесткости при нагружении оси Z.

Численные значения статической жесткости для линейных координат представлены в таблице.

Таблица

Статическая жесткость станка мод. МС 300 при нагружении вдоль осей X, Y, Z (положение планшайбы горизонтальное)

Нагружающая сила F	Суммарная жёсткость, Н/мкм		
	X	Y	Z
F_x	**J_{xx} = 12,5**	J_{xy} > 500	J_{xz} > 500
F_y	J_{yx} > 500	**J_{yy} = 25**	J_{yz} > 500
F_z	J_{zx} = 136	J_{zy} > 500	**J_{zz} =75**

По результатам измерения суммарной статической жесткости в направлении линейных координат можно сделать следующие выводы.

Нагружение вдоль осей X и Y.

1) Практически отсутствуют петли гистерезиса при нагружении вдоль осей X и Y (рис. 5). Это говорит о хорошем качестве комплектующих и хорошей сборке (отсутствии зазоров в стыках и пластических деформаций в контактах).

2) Наблюдается недостаточная статическая жесткость в направлении действия нагружающей силы (J_{xx} = 12,5 Н/мкм, J_{yy} = 25 Н/мкм)**.**

3) Практически отсутствует взаимовлияние (деформации, перпендикулярные направлению действия силы) (J_{xy} > 500, J_{xz} > 500, J_{yx} > 500, J_{yz} > 500).

Нагружение вдоль координаты Z.

1) Наблюдается сравнительно высокая статическая жёсткость в направлении действия нагружающей силы (J_{zz} =75 Н/мкм).

2) Наблюдается наличие взаимовлияния между действием силы F_z и перемещениями в направлении X (J_{zx} = 136 Н/мкм). Это, возможно, является особенностью конструкции (несимметричность и отсутствие разгрузки от веса шпиндельной бабки, т.к. шпиндельная бабка «висит» на ШВП).

3) Наблюдается наличие ощутимой петли гистерезиса в жесткости J_{zx} = 136 Н/мкм. Это может быть вызвано несимметричностью конструкции и отсутствием разгрузки от веса шпиндельной бабки.

Угловая координата C. Для исследования статической крутильной жесткости поворотного стола (планшайбы) использовалась та же самая нагружающая аппаратура, что и при исследовании суммарной статической жесткости при нагружении вдоль линейных координат (винтовой домкрат и датчик силы, рис. 2). В качестве датчика линейных перемещений вместо индуктивных датчиков «микрон 02» использовался лазерный интерферометр ML 10.

На рис. 7 представлены экспериментальные кривые статической крутильной жесткости J_{cc}.

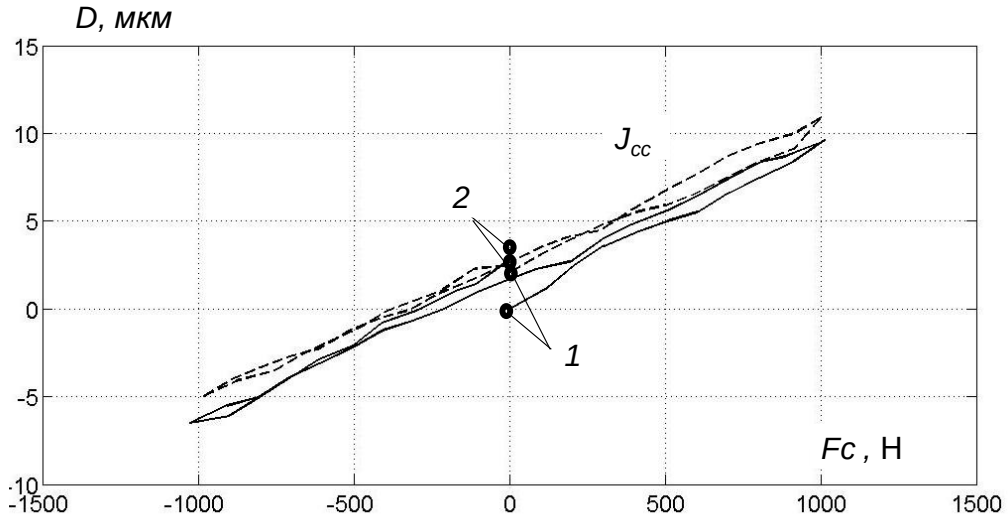


Рис. 7. Кривые статической жёсткости планшайбы: D – перемещение точки на планшайбе, отстоящей от оси вращения планшайбы на радиусе = 100 мм, при приложении нагружающей силы P на плече = 100 мм

Статическая жёсткость (крутильная) планшайбы составляет J_{cc} = 153 Н/мкм. Это говорит о высокой крутильной статической жёсткости и отсутствия геометрических и упругопластических зазоров. Можно считать, что практически отсутствует петля гистерезиса.

Интерпретация результатов измерения статической жесткости. Для решения задач анализа и синтеза несущих систем многокоординатных машин с ЧПУ оказывается полезным представить несущую систему машины в виде 2 взаимосвязанных подсистем I и II (рис. 8).

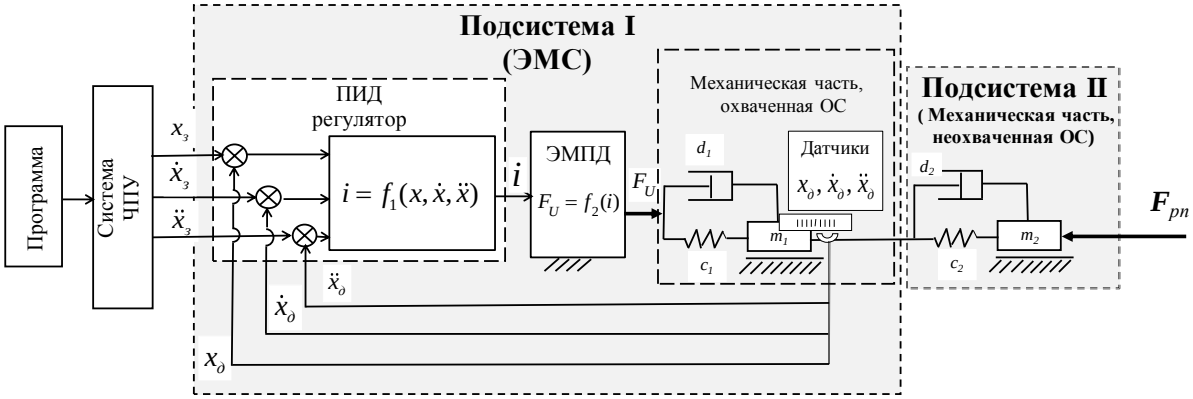


Рис. 8. Блок - схема несущей системы координаты X при действии на неё квазистатической силы F_{pn} (измерение статической жесткости)

Подсистема I – это часть несущей системы, охваченная обратными связями. Она представляет собой электромеханическую систему (ЭМС), включающую в себя: ПИД регулятор, электродвигатель с электромагнитным полем (ЭМПД) и механическую часть, охваченную обратной связью. В случае станка МС - 300 механическая часть, охваченная обратной связью, содержит: ротор двигателя, зубчато-ремённую передачу, предохранительную муфту, ШВП и салазки. На блок - схеме механическая часть представлена в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы m_1, приведенной жесткости c_1 и демпфирования d_1.

Подсистема II – это оставшаяся механическая часть несущей системы, неохваченная обратными связями. В частности, применительно к несущей системе координаты X – это все механические узлы, расположенные на салазках, а именно, стойка, с расположенной на ней шпиндельной бабкой, несущей шпиндель. Это чисто механическая система, которую можно представить в виде колебательной системы, состоящей из приведенной массы m_2, приведенной жесткости c_2 и демпфирования d_2.

На салазках располагается приёмник (каретка) сигнала обратной связи по положению x_∂ с линейки (*ф. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH*), расположенной на станине станка. Сигнал, снимаемый с датчика скорости, установленного на валу электродвигателя, считается пропорциональным действительной скорости $\dot{x}_\partial$ движения салазок, а сигнал о текущем значении тока двигателя – действительному значению ускорения $\ddot{x}_\partial$ движения салазок.

Сигналы x_∂, $\dot{x}_\partial$, $\ddot{x}_\partial$ используются в ПИД – регуляторе для выработки управляющего сигнала – тока $i = f_1(x_з, \dot{x}_з, \ddot{x}_з, x_\partial, \dot{x}_\partial, \ddot{x}_\partial)$, подаваемого на двигатель привода. В двигателе ток i изменяет электромагнитное поле и соответственно движущий крутящий момент $F_U = f_2(i)$, действующий между статором и ротором.

Данное представление является дальнейшим развитием подхода к исследованию динамики машин, предложенного проф. М. З. Коловским [7].

Представленная блок-схема является основой для исследования поведения несущей системы в различных режимах, среди которых можно выделить следующие:

а) - невозмущённое состояние ($x_з(t) = 0$, $\dot{x}_з(t) = 0$, $\ddot{x}_з(t) = 0$, $F(t) = 0$) (система в покое: отсутствует воздействие на несущую систему со стороны системы ЧПУ и со стороны рабочего процесса);

б) - квазистатическое силовое нагружение при заданном нулевом значении управляемой координаты ($x_з(t) = 0$, $F_i \neq 0$, $i = 1,\ldots,n$) (измерение статической жесткости);

в) - нагружение несущей системы заданным силовым воздействием, например, ступенчатым силовым воздействием, при заданном нулевом значении управляемой координаты ($x_з(t) = 0$, $\dot{x}_з(t) = 0$, $\ddot{x}_з(t) = 0$, $F(t) = 500$ Н при $t < t_0$, $F(t) = 0$ при $t \geq t_0$) (измерение динамической жесткости по реакции на ступенчатое силовое воздействие);

г) - движение исполнительного органа машины при заданном ступенчатом воздействии по управляемой координате и нулевом силовом воздействии ($x_з(t) = 0$ при $t < t_0$, $x_з(t) = X = Const$ при $t \geq t_0$, $F(t) = 0$) (изучение реакции привода на ступенчатое изменение управляемой координаты);

д) - движение исполнительного органа машины при заданной эталонной траектории и нулевом силовом воздействии ($x_з(t) = 0$ при $t < t_0$, $x_з(t) = sin(\omega t)$ при $t \geq t_0$, $F(t) = 0$) (изучение движения исполнительного органа машины по эталонным траекториям на холостом ходу (без нагрузки на рабочий орган));

е) - движение исполнительного органа машины при заданной эталонной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ($x_з(t) = 0$ при $t < t_0$, $x_з(t) = sin(\omega t)$ при $t \geq t_0$, $F(t) = Var$) (обработка деталей - образцов);

ж) - движение исполнительного органа машины по заданной произвольной траектории и силовом воздействии, меняющемся во времени ($x_з(t) = Var$, $F(t) = Var$) (общий случай изучения движения исполнительного органа машины);

Поведение несущей системы в соответствии с рис. 8 при измерении статической жесткости (режим б). При воздействии на несущую систему статической силой F перемещение исполнительного органа машины - массы m_2 будет происходить за счет деформации пружины (жесткости) c_2. Деформации в механической части подсистемы I (c_1) не влияют на перемещение массы m_2 благодаря действию ПИД – регулятора, обеспечивающего $x_д = x_з = 0$.

По характеру поведения кривых статистической жесткости можно судить о двух важных положениях:

- насколько сильно деформируется механическая часть несущей системы подсистемы II от действия на неё квазистатической силы (степень изменения (трансформации) траектории движения рабочих органов машины под действием квазистатической силы),

- насколько качественно изготовлена механическая часть подсистемы II несущей системы машины (форма петли может свидетельствовать о наличии зазоров в подвижных соединениях, качестве изготовления и сборки неподвижных соединений и др.)

По характеру поведения кривых статической жесткости, получаемых по данной методике, ничего нельзя сказать о жесткостных свойствах подсистемы I. Однако о жесткостных и демпфирующих свойствах подсистемы I и всей несущей системы машины в целом можно судить по «отклику» несущей системы на силовое воздействие и/или кинематическое воздействие [8].

По результатам экспериментального исследования статической жесткости несущей системы 5 координатного станка последовательной структуры можно сделать **вывод.**

Измерение статической жесткости многокоординатных станков (машин) с ЧПУ *по разработанной методике* может применятся:

- для оценки уровня совершенства конструкции несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ;
- для оценки качества сборки отдельных подсистем машины;
- для анализа возможных причин (диагностики) низкой статической жесткости несущей системы многокоординатной машины с ЧПУ.

Список литературы

1. Accuracy Drives Machine Tools // American Machinist. 2007. V. 21. № 12. [Электронный ресурс]. URL: http://www.americanmachinist.com/ (дата обращения: 23.03.2012).
2. Petru F. Valasek M. Concept, Design Evaluated Properties of TRI¬JOINT 900H / Conference Proceedings “The 4th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, 2004, April 20-21”. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2004. P. 569-583.
3. Многокоординатный обрабатывающий центр модели МС-300 // [сайт ОАО НИАТ]. [Электронный ресурс]. URL: http://www.niat.ru/data/org/1288669644/1290567415/1290567644/1290674367/ (дата обращения: 26.04.2013).
4. Никуличев И.В., Шлесберг И.С., Серков Н.А. Исследование жесткости станков с ЧПУ по отклику на силовое воздействие //«Научное обозрение» - 2013. – № 1. - С. 124 – 129.
5. Серков Н. А., Мерзляков А. А., Сироткин Р. О., Орлова Г. Н. Устройство для измерения статической жесткости несущей системы машин-автоматов / Сб. научных трудов и инженерных разработок научной конференции «Ориентированные фундаментальные исследования – новые модели сотрудничества в инновационных процессах»; Под ред. Член-корр. РАН, академика РИА Б.В. Гусева. М.: Экспо дизайн – Холдинг, 2008. С. 195 - 198.
6. Вайнштейн И. В., Серков Н. А., Сироткин Р. О. Станки для высокоскоростной обработки деталей и перспективы их развития в машиностроении // Авиационная промышленность. № 3. 2006. С. 49-55.
7. Коловский М.З. Динамика машин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 263 с.
8. Серков Н. А., Мерзляков А. А. Тестирование несущей системы машины силовым ступенчатым воздействием Сб. докладов: XI сессии международной научной школы "Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов" ВПБ-2013 (21-25 октября 2013 г., Санкт-Петербург, С. 160-167 [Электронный ресурс] URL: http://www.ipme.ru/ipme/conf/VPB-13/SBOR_VPB13.pdf (дата обращения: 29.12.2013).