

УДК 621.92

МЕХАТРОННЫЙ МОДУЛЬ КАК ОБЪЕКТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.Е. Лысов, Я.И. Пешев, З.Х. Хамитов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: 67lysov@mail.ru

***Аннотация.** Рассматривается вопрос повышения функциональных возможностей прецизионных координатно-расточных и координатно-шлифовальных станков, их точности и производительности. Показано, что принципиально вопрос решается путем установки обрабатываемой детали на поворотный стол, который закрепляется на рабочем столе станка. Поворотный стол выполняется в виде мехатронного модуля, в котором электродвигатель и механическая часть в виде планшайбы конструктивно объединены в один блок. Исключение люфта в кинематической цепи и возможность обработки детали в различных точках решают поставленные задачи. Дана структурная схема мехатронного модуля и рекомендации по разработке системы автоматического управления им.*

***Ключевые слова:** передаточная функция, электродвигатель, температура, точность, охлаждение, мехатронный модуль, поворотный стол.*

Развитие машиностроения и в частности прецизионного станкостроения постоянно ставит задачи повышения точности позиционирования подвижных узлов станка, повышения точности воспроизведения заданной траектории движения инструмента в рабочем пространстве станка в процессе обработки изделия, а также повышения производительности станка [1, 2, 3, 4].

Поставленные задачи являются актуальными, их решение способствует созданию новых принципов реализации приводов подвижных узлов станка, а также расширению его функциональных возможностей.

С целью удовлетворения упомянутых требований, а также существенного расширения функциональных возможностей станка его оснащают прецизионным поворотным столом. В машиностроении прецизионный поворотный стол используется для расточки, сверления, чистового фрезерования, разметки и контрольных операций. В сочетании с соответствующими визирующими и отсчетными устройствами он может использоваться для контроля размеров, заданных в полярной системе координат, для измерения накопленной погрешности деления высокоточных делительных дисков, лимбов, зубчатых колес и т. п.

Следует подчеркнуть, что обработка детали производится с одной установки автоматической сменой инструмента. Это, в свою очередь, решает вопрос повы-

Лысов Владимир Ефимович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Пешев Ярослав Иванович (к.т.н.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Хамитов Зинур Хусаинович, магистрант.

шения точности и производительности станка и расширения его функциональных возможностей.

Существующие конструкции поворотных столов [5, 6, 7], оснащенных электроприводом, имеют существенные недостатки: неидеальность геометрических параметров отдельных деталей, упругие деформации, тепловые деформации, а также люфт в кинематической цепи. Так, на рис. 1 показана кинематическая схема прецизионного поворотного стола модели СК-36. Из данного рисунка видно, что люфт обусловлен наличием зазора между червяком и червячным колесом. Данный зазор необходим для исключения заклинивания передачи от тепловых деформаций. Также негативное влияние на точность угла поворота планшайбы оказывают упругие деформации соединительной муфты 2 и вала червяка. Кроме того, традиционная конструкция поворотного стола [5] требует существенных эксплуатационных расходов. Это связано с постоянным контролем уровня смазывающей жидкости в кинематической цепи передачи движения к планшайбе, контролем и минимизацией действия люфта при эксплуатации стола в силу износа трущихся поверхностей в узле передачи движения от вала электродвигателя к планшайбе поворотного стола.

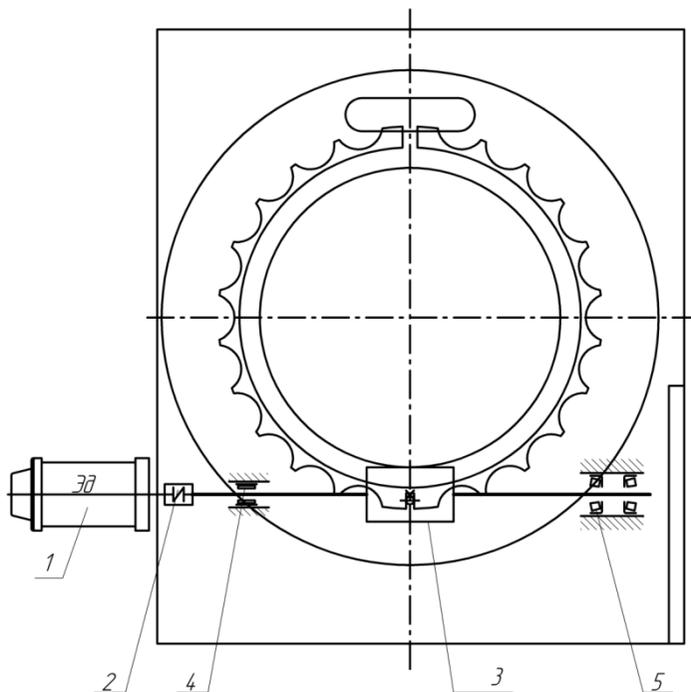


Рис. 1. Функциональная схема поворотного стола СК-36:
1 – серводвигатель; 2 – соединительная муфта; 3 – червячная передача;
4–5 – подшипниковые узлы

На сегодняшний день максимально возможная точность угла поворота планшайбы упомянутых выше поворотных столов составляет 2,5'' угловых секунд. Данная точность определяется точностью механических узлов станка и точностью датчика, который преобразует угол поворота планшайбы в цифровой код.

Точность упомянутого датчика определяется технологией его производства, и на данный момент ее максимальное значение составляет $\pm 1''$ угловой секунды. Таким образом, суммарная точность составляет $\pm 3,5''$ угловых секунд. Однако для ультрапрецизионных измерений, навигации телескопов и т. п. может потребоваться еще более высокая точность – до $1''$ угловой секунды.

Радикального увеличения точности угла поворота планшайбы можно достигнуть сокращением кинематической цепи и полным устранением люфтов. Эту задачу в наиболее полной мере решает мехатронный модуль с прямым сервоприводом – в этом случае планшайба и ротор серводвигателя являются единым кинематическим звеном. Также благодаря быстродействующим микропроцессорным системам и интеллектуальным алгоритмам управления можно достичь высоких точностей. Кроме того, необходимо компенсировать упругие и тепловые деформации.

Конструкция поворотного стола на основе синергетического объединения в одном модуле электродвигателя, механического устройства в виде планшайбы и информационного устройства в виде датчиков, контролирующих параметры движения, создает мехатронный модуль движения, который является объектом системы автоматического управления. Предлагаемый модуль может быть создан на основе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе [8, 9], например 1FW6.

Функциональная схема мехатронного модуля движения показана на рис. 2.

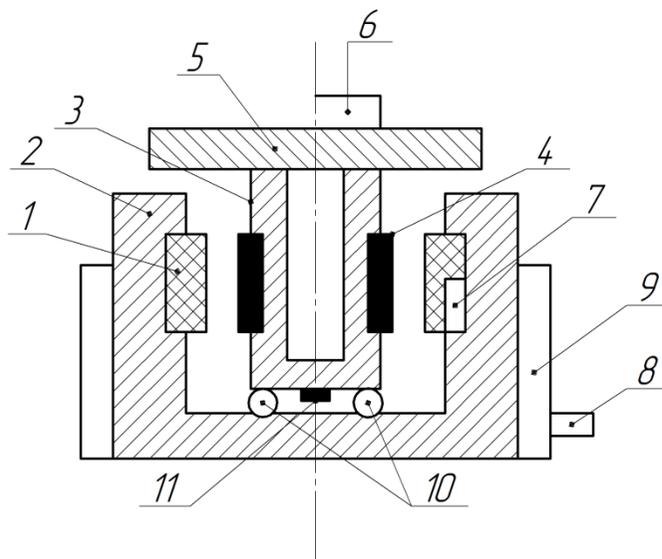


Рис. 2. Функциональная схема мехатронного модуля движения:

1 – обмотка статора; 2 – статор двигателя; 3 – ротор двигателя; 4 – постоянные магниты на роторе двигателя; 5 – планшайба; 6 – обрабатываемая деталь; 7 – датчики температуры; 8 – вход жидкости в радиатор статора; 9 – радиатор статора; 10 – подшипники статора; 11 – датчики параметров электродвигателя

Для представления мехатронного модуля движения в качестве объекта системы автоматического управления процессами его позиционирования, стабилизации или изменения скорости в зависимости от программы обработки, момента сил резания или удержания в процессе позиционирования необходимо провести его идентификацию и разработать структурную схему.

В работе рассмотрен вопрос идентификации поворотного стола в виде мехатронного модуля как объекта системы автоматического управления при действии сигнала управления на исполнительный электродвигатель.

В режиме позиционирования планшайбы модуля синхронный двигатель работает на удержание, то есть на упор. Ток статора носит стохастический характер. При режимах обработки изделия, при движении ротора ток в статоре изменяется в соответствии с нагрузочной диаграммой. Рассмотренные режимы электропривода приводят к нагреву статора, передаче температуры к ротору и установленной на нем планшайбе. Это делает возможным изменение размеров планшайбы и детали, снижая точность обработки.

Ввиду небольшого диапазона изменения температуры электродвигателя тепло, отдаваемое конвекцией и теплопроводностью, описывается [10] зависимостью

$$Qdt = Cd\tau + A\tau * d\tau, \quad (1)$$

где Q – количество тепла, сообщаемое телу в единицу времени; C – теплоемкость тела; A – теплоотдача тела; τ – превышение температуры тела над окружающей средой. С учетом того, что связь между количеством тепла и током статора носит безынерционный характер, из (1) следует

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-\frac{t}{T_s}}), \quad (2)$$

где τ_y – установившееся значение температуры статора; $T_s = \frac{C}{A}$ – постоянная времени нагрева статора.

Зависимость (2) позволяет представить процесс нагрева статора электродвигателя в виде типового апериодического звена:

$$w_s(p) = \frac{\tau(p)}{I(p)} = \frac{K_s}{T_s p + 1}. \quad (3)$$

Здесь K_s – коэффициент, характеризующий превышение температуры к току статора.

Процесс нагрева планшайбы, детали осуществляется одновременно с нагревом статора. С учетом вентиляции в воздушном зазоре между статором и ротором передаточная функция, характеризующая процесс нагрева планшайбы, представляется апериодическим звеном вида

$$w_p(p) = \frac{\tau(p)}{\tau_p(p)} = \frac{K_p}{T_p p + 1}. \quad (4)$$

Здесь τ_p – превышение температуры планшайбы относительно окружающей среды; K_p – коэффициент передачи, учитывающий снижение температуры планшайбы относительно температуры статора. Значения этих коэффициентов получены экспериментальным путем и составляют: $K_p = (0,8 \div 0,9)K_s$; $T_p = (1,2 \div 1,3)$.

Процесс изменения температурной деформации детали имеет сложный характер и определяется материалом и формой детали и также описывается апериодическим звеном:

$$w_0(p) = \frac{z(p)}{\tau_p(p)} = \frac{K_D}{T_D p + 1}, \quad (5)$$

где Z – геометрическое изменение размеров детали в зависимости от превышения температуры детали; K_D – коэффициент, учитывающий геометрическое изменение детали от превышения температуры над окружающей средой, определяется в зависимости от материала обрабатываемой детали; T_D – постоянная времени изменения размера детали.

Значение T_D определяется экспериментально и по отношению к T_p составляет $T_D = (1,1 \div 1,3)T_p$.

Синхронный двигатель с постоянным магнитом в роторе [11, 12, 13, 14] представляется типовым колебательным звеном:

$$w_M(p) = \frac{\omega(p)}{u(p)} = \frac{K_M}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1}, \quad (6)$$

где $\omega(p)$ – частота вращения вала электродвигателя; $u(p)$ – напряжение статора электродвигателя; K_M – коэффициент передачи электродвигателя, осуществляющий связь между напряжением, приложенным к статору, и частотой вращения ротора; T_E – электромагнитная постоянная времени статора; T_M – электромеханическая постоянная синхронного электродвигателя.

С учетом описания процессов при движении мехатронного модуля его структурная схема для последующей разработки системы управления представлена на рис. 3.

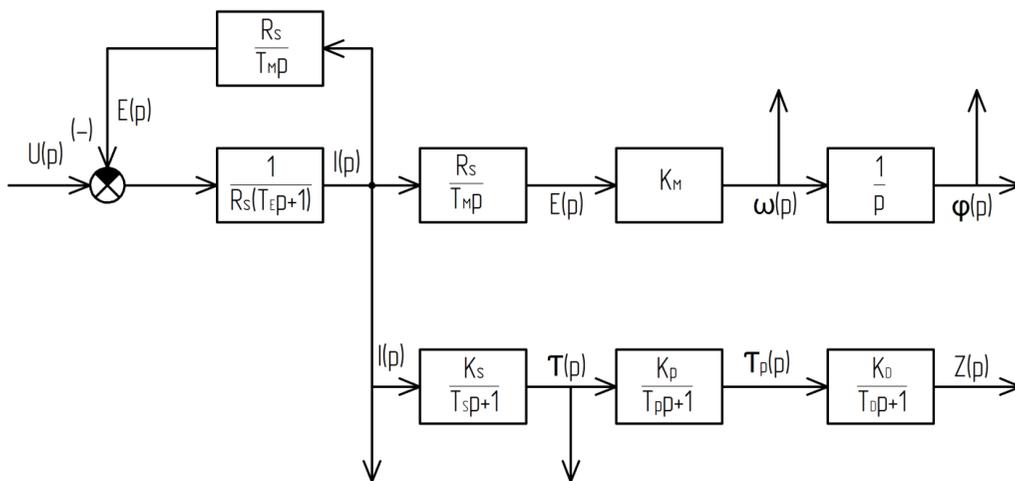


Рис. 3. Структурная схема мехатронного модуля движения

На рис. 3 стрелками выделены параметры: $I(p)$ – изображение тока в статорной обмотке серводвигателя; $\omega(p)$ – изображение угловой скорости вращения ротора серводвигателя (планшайбы); $\phi(p)$ – изображение угла поворота ротора серводвигателя (планшайбы); $\tau(p)$ – изображение превышения температуры планшайбы относительно окружающей среды. Упомянутые параметры определяют точность и производительность мехатронного модуля, которыми необходимо управлять для реализации требований по точности.

Рассмотренный подход к идентификации мехатронного модуля позволяет использовать его и применительно к идентификации кантуемого двухкоординатного стола. Это в еще большей степени расширяет функциональные возможности прецизионного координатно-расточного станка, оснащенного таким столом.

Из рис. 3 также следует, что мехатронный модуль как объект управления является двухконтурным: первый контур – формирование заданной траектории перемещения планшайбы; второй контур – стабилизация температуры мехатронного модуля.

Выводы

В результате проведенной научно-исследовательской работы по увеличению точности позиционирования планшайбы прецизионного поворотного стола, повышению динамической точности в воспроизведении заданной траектории движения были сделаны следующие выводы.

1. Для принципиального повышения точности позиционирования подвижного узла, точности воспроизведения заданной траектории движения, производительности станка необходимо поворотный стол представить в виде мехатронного модуля, исключая люфт в кинематической цепи передачи движения от электродвигателя к планшайбе.

2. Анализ структурной схемы мехатронного модуля движения показал необходимость разработки двухконтурной системы автоматического управления: контура управления движением и позиционирования и контура стабилизации температур статора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Решетов Д.Н., Портман В.Г.* Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. *Саранцев С.С., Лысов В.Е.* Повышение динамической точности позиционно-следающего электропривода с нелинейностью типа «люфт» в кинематической цепи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – №1 (29). – С. 179–184.
3. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно-следающего электропривода с экстраполятором нулевого порядка / Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 4 (48). – С. 70–75.
4. *Федонин О.Н., Петрешин Д.И., Агеенко А.В., Хандожко В.А.* Модернизация приводов подачи токарных станков ЧПУ на базе микропроцессорного электропривода серии CSD // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 4(44). – С. 86–91.
5. Стол поворотный делительный кантуемый с управлением от УЧПУ станка. Модель СК-36-1204 // Руководство по эксплуатации СК-36-1204.00.00.000РЭ, ЗАО «Стан-Самара», Самара, 2015. – 8 с.
6. *Manfred Weck.* Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 424 p.
7. Technical manual TNC620. DR JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, 83301 Traunreut, Germany. – Oktober 2010.
8. Круговые встраиваемые электродвигатели 1FW6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siemens.ru/ad/ms>
9. *Лысов В.Е., Стариков А.В., Стариков В.А.* Линеаризованная математическая модель синхронного электродвигателя при различных способах управления его скоростью // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2008. – № 1 (16). – С. 102–107.
10. *Андреев В.П., Сабинин Ю.А.* Основы электропривода. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 780 с.
11. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
12. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.

13. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильным двигателем. – М.: Машиностроение, 2010. – 328 с.
14. Pelz G. Mechatronic systems. Modeling and Heidelberg, 2001. – 213 p.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2018 г.

THE MECHATRONIC MODULE AS PART OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

V.E. Lysov, Z.K. Khamitov, Y.I. Peshev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The problem of improving the functional possibilities of sensitive jig-boring and jig-grinding machines, as well as their accuracy and productivity, is considered in the article. It is shown that essentially the problem is solved by setting the work piece onto the rotary table which is locked on the worktable of the machine. The rotary table is a mechatronic module in which the electric engine and the mechanical part (plate) are constructively united into a single unit. The exclusion of the dead zone in the kinematic chain and the possibility of processing the piece in different points make it able to solve the set tasks. The structural scheme of the mechatronic module and the recommendations of developing the system of its automatic control are provided.*

Keywords: *transfer function, electric engine, temperature, accuracy, cooldown, mechatronic module, rotary table.*

REFERENCES

1. Reshetov D.N., Portman V.G. Tochnost metallorezhuschih stankov [Precision machine tools]. Machinostroenie, 1986. – 336 pp. (In Russian).
2. Sarantsev S.S., Lysov V.E. Povishenie dinamicheskoy tochnosti positionno-sledyaschego elektroprivoda s nelineinoŭ u tipa “luft” v kinemacheskoy tsepy [Improving the dynamic accuracy of the servodrive with backlash in mechanics]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya tehnicheckie nauki №1 (29) – 2011. Samara 179-184 pp. (In Russian).
3. Lysov V.E., Sidorov I.S. Analiz pogreshnosti v vosproizvedenii zadannoy traektorii dvizheniya positionno-sledyaschego elektroprivoda s extrapolyatorom nulevogo poryadka [Analysis of the position error signal for the servodrive with zero-order hold]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta. Seriya tehnicheckie nauki №4 (48) – 2015. Samara 70-75 pp. (In Russian).
4. Fedonin O.N., Petrreshin D.I., Ageenko A.V., Khandozhko V.A. Modernisatsiya privodov podachi tokarnih stankov TCHPU na base mikroprocessornogo elektroprivoda serii CSD [Modernization of feed drives for a lathe based on a digital servodrive CSD series]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta. Seriya tehnicheckie nauki №4 (44) – 2014. Bryansk 86-91 pp. (In Russian).
5. Stol povorotny delitelny kantuemy s upravleniem ot TCHPU stanka. Model SK-36-1204. Rucovodstvo po ekspluatatsii SK-36-1204.00.00.000RE. [Rotary dividing portable table with CNC

*Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yaroslav I. Peshev (Ph.D. (Techn.)), Engineer.
Zinur K. Khamitov, Graduate Student.*

- control Model SK-36-1204. Technical manual SK-36-1204.00.00.000RE]. ZAO "Stan-Samara", Samara 2015. 8 pp. (In Russian).
6. Manfred Weck. Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 424 p.
 7. Technical manual TNC620. DR JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, 83301 Traunreut, Germany. – Oktober 2010.
 8. *Krugovye vstraivaemie electrodvigately IFW6* [Circular embedded electric motor IFW6]. <http://www.siemens.ru/ad/ms/> (accessed September 20, 2018).
 9. *Lysov V.E., Starikov A.V., Starikov V.A.* Linearisovannaya matematicheskaya model sinhnornogo electrodvigatelya pri raslichnih sposobah upravleniya ego scorost'u [Linearized mathematical model of a synchronous motor for various ways of specifying the velocity]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya tehnikeskie nauki №1 (16) – 2008. Samara 102-107 pp. (In Russian).
 10. *Andreev V.P., Sabinin Yu.A.* Osnovi electroprivoda [Electric drive basics]. Gosenergoisdat 1963. 780 pp. (In Russian).
 11. *Anuchin A.S.* Systemy upravleniya electroprivodov [Drive control systems]. Moscow, 6th isdatel'sky dom MEI, 2015. 373 pp. (In Russian).
 12. *Lysov V.E.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory]. Moscow, Machinostroenie, 2010. 500 pp. (In Russian).
 13. *Balkovoy A.P., Tsatsenkin V.K.* Pretsisionny electroprivod s ventil'nim dvigatelem [Precision drive with switch motor]. Moscow, Machinostroenie, 2010. 328 pp. (In Russian).
 14. Pelz. G Mechatonic systems. Modeling and Heidelberg, 2001. – 213 p.