

¹Чепуров М.С., д-р техн. наук, проф.,
¹Дудукало Д.В., аспирант,
²Горбачёв И.А., соискатель

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
²Дятьковский филиал государственного автономного профессионального образовательного учреждения «Брянский техникум энергомашиностроения и радиоэлектроники»

ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕХАТРОННОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МОДУЛЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ*

denis.dudukalo@yandex.ru

В статье рассмотрен вопрос выявления зависимостей, влияющих на точность позиционирования режущей кромки инструмента мехатронного модуля с механизмом перемещения рабочего органа при обработке заготовок типа тел вращения. В ходе проведения исследований авторами была получена математическая модель в виде системы уравнений, описывающая динамические характеристики подвижной инструментальной части мехатронного модуля, являющейся рабочим органом.

Ключевые слова: токарная обработка, резец, мехатронный модуль, функциональная зависимость, траектория инструмента, перемещение инструмента.

Введение. Основными задачами при механической обработке являются, сокращение времени получения, детали достигая наибольшего качества при наименьших затратах [1]. Для сокращения времени получения деталей применяются дополнительная оснастка и инструментальные модули. Поведение данных систем недостаточно изучены, чтобы ответить на вопрос о целесообразности применения данного оборудования на конкретной операции или переходе. Одним из факторов влияющим на качество получаемых деталей является позиционирование исполнительного органа относительно поверхности обработки [2, 3].

Повысить точность позиционирования инструмента можно путем предварительного анализа входных параметров, которые влияют на по-

зиционирование, а также определения кинематической погрешности ходового винта, зазоров и упругих деформаций механической системы. Для определения кинематической погрешности ШВП можно использовать математическое моделирование, установив функциональную связь между подводимым к винту крутящим моментом и линейным перемещением гайки [4, 5].

Схема обработки представлена на рис. 1. Адаптивный инструментальный модуль [6], состоит из корпуса 1, в котором установлен электродвигатель 2, соединенный через шариковинтовую передачу сподвижным стаканом 3 имеющий возможность перемещения вдоль оси модуля, в подвижном стакане в инструментальном блоке 4 закреплен режущий инструмент резец 5, который обрабатывает заготовку 6 [7, 8].

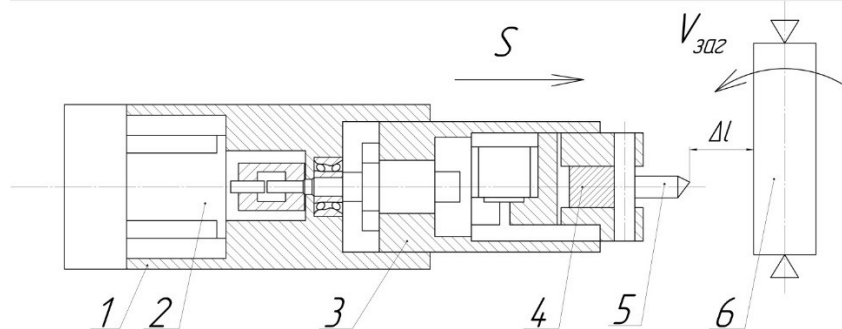


Рис. 1. Схема обработки

Методика. Условия работы модуля требуют от электродвигателя обеспечения соответствующего формирования переходных режимов, направленного на достижение либо максимального быстродействия, либо минимальных потерь,

либо ограничения динамических нагрузок возникающих в кинематической цепи [9, 10]. Управление переходными процессами может создать максимальное быстродействие при соответствующих ограничениях. Состояние двигателя и всей системы электропривода в целом определяют три

переменные: рис. 2 (а) скорость двигателя $\Omega(t)$: разгон, установившееся движение, торможение,

рис. 2 (б) ток $I(t)$: пусковой ток и максимальный ток, рис. 2 (в) положение вала $\varphi(t)$.

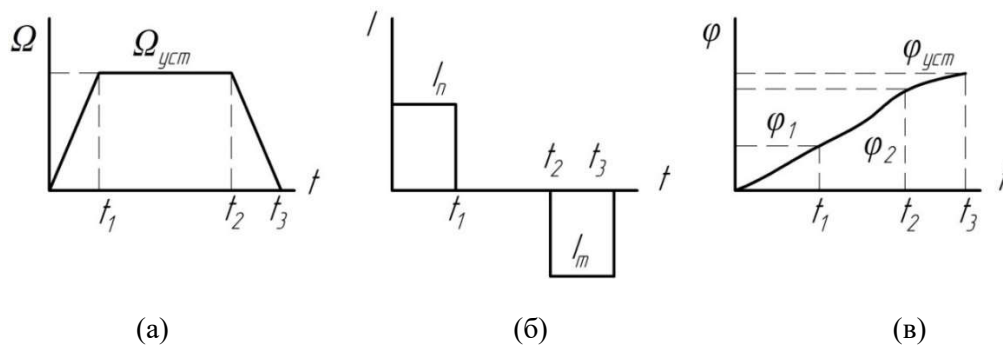


Рис. 2. Графики состояния двигателя привода модуля

Двухмассовая упругая система [11, 12] представляет собой механическую систему, состоящую из двух масс с моментами инерции J_1 и J_2 . К каждой массе прикладывается извне момент M_1 и M_2 , массы соединены валом, обладающим

упругими свойствами c , массы вращаются со скоростями ω_1 и ω_2 .

Запишем уравнения состояния двухмассовой упругой механической системы, рис. 3

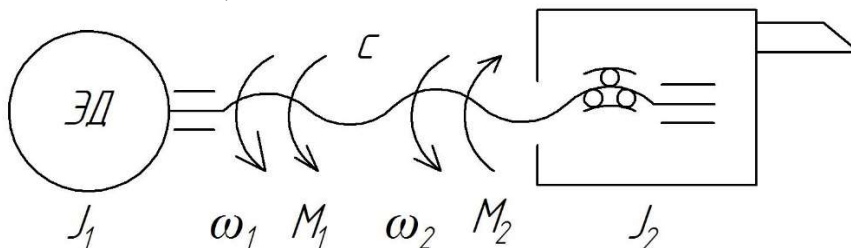


Рис. 3. Структурная схема адаптивного инструментального модуля

Система дифференциальных уравнений, описывающих систему, имеет вид:

$$\begin{cases} M_y = c\Delta\varphi = c(\varphi_1 - \varphi_2) = c \int_0^t (\omega_1 - \omega_2) dt \\ M_1 - M_y = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ M_y - M_2 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность углов положения первой φ_1 и второй φ_2 масс.

Полученные уравнения движения позволяют проанализировать динамические особенности механической части электропривода как объекта управления, пользуясь методами теории ав-

томатического управления [13]. Основой для анализа являются структурные схемы, вид которых определяется принятой расчётной схемой механической части [14].

Определим нагрузки M_{c1} и M_{c2} . Момент M_{c1} представляет собой момент потерь на валу двигателя, он составляет 5 % от номинального момента. Рассчитаем номинальный момент [15].

$$M_{в.ном} = \frac{P}{\omega_{ном}} = \frac{15 \cdot 10^3}{314} = 47,7 \text{ Н} \cdot \text{м, где} \quad (2)$$

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314, \text{ рад/с} \quad (3)$$

Момент механических потерь двигателя:

$$M_{c1} = \Delta M = 0,05 \cdot M_{в.ном} = 0,05 \cdot 47,7 = 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4)$$

Основную долю M_{c2} составляет нагрузка пропорциональная квадрату скорости $n=2$. Характеристика M_{c2} с учетом потерь ΔM имеет вид:

$$\begin{aligned} M_{c2} &= \Delta M_{в} + (M_{в.ном} - \Delta M_{в}) \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_{ном}}\right)^2 = 2,4 + (47,7 - 2,4) \cdot \left(\frac{\omega_2}{314}\right)^2 = 7,5 + (47,7 - 7,5) \cdot \left(\frac{\omega_2}{314}\right)^2 = \\ &= 7,5 + 0,0004 \cdot \omega_2^2, \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив полученные значения в систему (1), получим уравнения движения рассматриваемого электропривода.

$$M - 3210(\varphi_1 - \varphi_2) - 7,5 = 0,41p\omega_1, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (6)$$

$$3210(\varphi_1 - \varphi_2) - 7,5 - 0,0004 \cdot \omega_2^2 = 0,32p\omega_2, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (7)$$

Основная часть. Уравнения движения электропривода в данном случае нелинейны в связи с

нелинейной зависимостью момента M_{c2} от скорости ω_2 . Структурная схема, соответствующая этим уравнениям, представлена на рис. 4

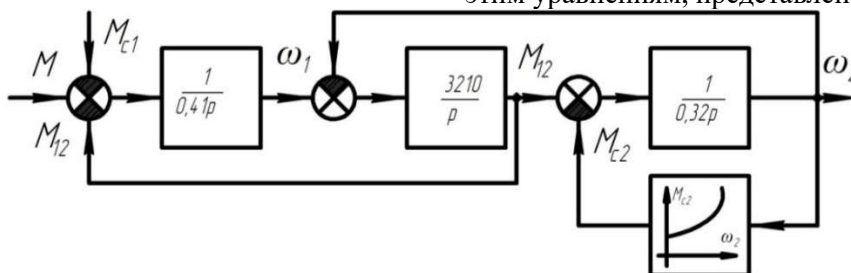


Рис. 4. Структурная схема управления модулем

Положив связь между массами абсолютно жесткой, определим момент инерции привода:

$$J_{\Sigma} = J_1 + J_2 = 0,41 + 0,32 = 0,73 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (8)$$

Статический момент нагрузки:

$$M_c = M_{c1} + M_{c2} = 2,4 + 7,5 + 0,0004 \cdot \omega_2^2, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (9)$$

где

$$\omega = \omega_1 = \omega_2$$

Определим обобщенные параметры:

$$\gamma = \frac{(J_1 + J_2)}{J_1} = \frac{(0,41 + 0,32)}{0,41} = 1,78 \quad (10)$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} = \sqrt{\frac{3210(0,41 + 0,32)}{0,41 \cdot 0,32}} = 133,6 \text{ рад/с} \quad (11)$$

$$\Omega_{02} = \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}} = \frac{133,6}{\sqrt{1,78}} = 99 \text{ рад/с} \quad (12)$$

Если нет условий для механического резонанса, т.е. отсутствуют возмущения, изменяющиеся с частотой близкой к $\Omega_{12} = 133,6 \text{ рад/с}$, то учитывать упругости не следует [7, 1]. Механическая характеристика построена в программе scilab 5.5.2 и представлена на рис. 5.

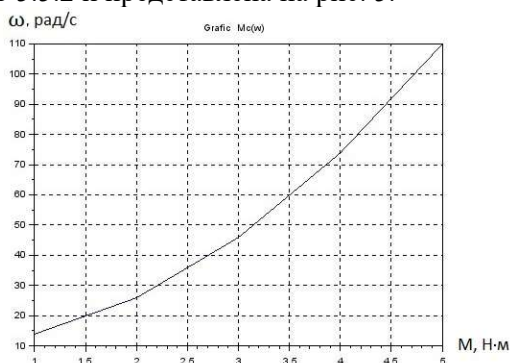


Рис. 5. Механическая характеристика привода адаптивного инструментального модуля $M_c(\omega)$

Для определения положения резца составим уравнения движения и проверим систему на граничные условия по переменным (например, ско-

рость двигателя не должна быть больше максимально возможной скорости двигателя), а также адекватность торможения при текущей скорости.

$$\begin{cases} l_x = \frac{ax^2}{2} + V_0x, \text{ при } x = \frac{V_{max} - V_0}{a} \\ l_y = \frac{-ay^2}{2} + (V_0 + ax), \text{ при } y = \frac{V_{max}}{a} \\ \Delta l = l_x + l_y \end{cases} \quad (13)$$

где a – ускорение; x – время набора скорости; y – время торможения с данной скорости; V_0 – начальное условие скорости; V_{max} – начальное условие скорости, максимальная скорость.

Решаем систему и строим график зависимости в программе scilab 5.5.2. Линейная скорость перемещения имеет зависимость от скорости двигателя.

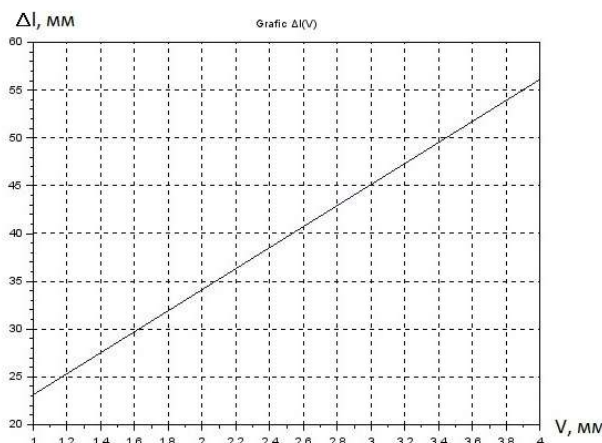


Рис. 6. График зависимости перемещения резца Δl от скорости V

Выводы. Таким образом, построена модель в виде системы уравнений описывающая динамические характеристики подвижной инструментальной части мехатронного модуля позволяющая позиционировать положение режущей

кромки инструмента, а, следовательно, и профиль получаемой поверхности, в зависимости от скорости перемещения, что позволяет прогнозировать положение режущей кромки инструмента, при получении сложной поверхности изделия. Полученная модель является основой построения схемы управления перемещением рабочего органа мехатронного инструментального модуля.

**Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чепчуров М.С., Табекина Н.А. Снижение временных затрат при получении изделий на прутковых автоматах с устройством сортировки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 6 (113). С. 64–72.
2. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные робототехнические системы: тенденции развития и проблемы разработки // Мехатроника, автоматизация и управление. 2004. №10. С. 7–18
3. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. М.: Наука, 1966. 564 с.
4. Jacobsen V. Choosing between acme screws and ball screws // Design News. 1995. Т. 50. № 1. С. 88.
5. Толков А.В., Шинаков И.В., Жданов А.В. Сравнение технических характеристик силовых винтовых механизмов // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 196–199.
6. Cherpchurov M.S., Tabekina N.A., Tyurin A.V. Application of mechatronic modules for process equipment updating // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Т. 8. № 4. С. 22619–22631.
7. Дуров Д.С. Вероятностная модель системы динамического мониторинга механической обработки детали // Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники. Ростов – на – Дону, 2000. Вып. 4. С. 66–75.
8. Лодочников Э.А., Юферов Ф.М. Микроэлектродвигатели для систем автоматики. Технический справочник М.: Энергия, 1969. 272 с.
9. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей. М.: Издательство «СТАНКИН», 2004. 360 с
10. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
11. Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А., Цаценкин В.К., Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. М.: Энергия, 1971. 624 с.
12. Максаров В.В., Ольт Ю. Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем // Металлообработка. 2012. № 2. С. 7–13.
13. Чепчуров М.С., Тюрин А.В. Управление технологической системой на базе токарного автомата, содержащей адаптивный инструментальный модуль // Информационные системы и технологии 2014. №5. С. 81–87.
14. Лебедев В.Б. Структурный анализ систем управления: учебное пособие для вузов. Пенза: Издательство ПензГУ, 2000. 100 с.
15. Егоров О.Д. Интегрированные мехатронные модули. М.: Издательство «СТАНКИН», 2011. 172 с.

Информация об авторах

Чепчуров Михаил Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения.

E-mail: avtpost@mail.ru.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дудукало Денис Васильевич, аспирант кафедры технология машиностроения.

E-mail: denis.dudukalo@yandex.ru.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Горбачёв Игорь Александрович, соискатель, преподаватель спецдисциплин.

E-mail: giasom@mail.ru

Брянский техникум энергомашиностроения и радиоэлектроники.
Россия, 241022, Брянск, ул. Академика Королева, д.7.

Поступила в сентябре 2017 г.

© Чепчуров М.С., Дудукало Д.В., Горбачев И.А., 2017

Chepchurov M.S., Dudukalo D.V., Gorbachev I.A.

DYNAMIC CALCULATIONS AT THE DETERMINATION OF THE MOVING OF THE CUTTING TOOL OF THE MECHATRON TOOLS TOUCH TREATMENT MODULE

In the article the question of revealing the dependences of the mechatronic module affecting the accuracy of positioning of the cutting edge of the tool with the mechanism of moving the working element in processing blanks such as bodies of rotation. During the research, the authors obtained a mathematical model in the form of a system of equations describing the dynamic characteristics of the mobile instrumental part of the mechatronic module, which is the working body.

Keywords: turning, cutter, mechatronic module, functional dependence, tool path, tool movement.

Information about the authors

Chepchurov Mikhail Sergeevich, PhD, Professor.

E-mail: avtpost@mail.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dudukalo Denis Vasilevich, Postgraduate student.

E-mail: denis.dudukalo@yandex.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Gorbachev Igor Aleksandrovich, Applicant.

E-mail: giacom@mail.ru

Bryansk Technical College of Power Engineering and Radioelectronics.

Russia, 241022, Bryansk, st. Akademika Koroleva, 7.

Received in September 2017

© Chepchurov M.S., Dudukalo D.V., Gorbachev I.A., 2017