

УДК 681.5:621.313.13

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

© 2012 В.А. Денисов, А.В. Жуков

Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 23.04.2012

В данной статье получены уравнения и выполнено математическое моделирование электромеханических процессов в шаговом двигателе, работающем в составе мехатронного модуля. Показано, что при стабилизации тока на каждом шаге и заданных параметрах, система с шаговым двигателем способна обеспечить требуемые шаговые перемещения мехатронного модуля с заданной точностью и быстродействием.

Ключевые слова: математическая модель, шаговый двигатель, мехатронный модуль системы компенсации износа инструмента.

При обработке деталей резанием происходит износ инструмента и, как следствие этого, получение деталей с размерами, зависящими от этого износа. Необходимость контроля и компенсации износа режущего инструмента становится особенно очевидной при обработке труднообрабатываемых материалов, которые широко используются в автомобильной и авиационной промышленности, поскольку для этих материалов трудоемкость обработки заготовки соизмеримы с ресурсом инструмента. Для обеспечения заданной точности изготовления деталей, продления срока службы инструмента и повышения производительности металлорежущих станков требуется применение специальной системы компенсации износа инструмента [1], способной корректировать с высокой точностью позиции инструмента относительно детали. Развитие средств измерения и компенсации позволит учитывать текущее значение износа режущего инструмента, что даст возможность повысить размерную точность и обеспечит надежность и эффективность процесса механообработки.

Измерение износа режущего инструмента, возможно, после каждого цикла обработки, однако в этом случае нет возможности идентифицировать критические состояния инструмента. Без информации об интенсивности изнашивания инструмента невозможна оптимизация процессов резания. Современные системы компенсации износа режущего инструмента должны быть выполнены в виде мехатронного модуля, который должен обеспечивать прецизионное перемещение инструмента в условиях, когда момент и скорость

Денисов Владимир Андреевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Электрооборудование автомобилей и электромеханика". E-mail: v.denisov@tltsu.ru

Жуков Александр Вячеславович, аспирант.
E-mail: alexzhuk87@yandex.ru

на валу его исполнительного двигателя выходят за допустимые пределы [2]. При таких режимах работы в качестве исполнительного двигателя целесообразно использовать шаговый двигатель гибридного исполнения или с постоянными магнитами. В частности, шаговые двигатели с постоянными магнитами имеют более высокий пиковый врачающийся момент на единицу веса и меньший момент инерции, чем другие двигатели. Кроме того они имеют компактные размеры и относительно низкую стоимость.

Прецизионные системы с шаговыми двигателями при импульсном питании обмоток фаз статора достаточно хорошо изучены и широко применяются в электромеханических модулях различного применения. [3, 5]. При использовании шаговых двигателей в системах перемещения инструмента важное значение имеет выбор принципа стабилизации тока статорных обмоток, контроль выполнения шагов, а также учет влияния момента трения нагрузки на устойчивость работы системы. Для описания электромеханических процессов и проведения исследований в этом направлении требуются уравнения, представленные в не преобразованной системе координат.

Целью настоящей работы является разработка уравнений без координатных преобразований и математическое моделирование электромеханических процессов в шаговом двигателе при релейном принципе стабилизации тока в статорных обмотках и учете момента трения нагрузки мехатронного модуля.

Мехатронный модуль (рис.1) содержит шаговый двигатель ШД, представленный двумя фазами 1 и 2. Ротор ШД имеет $2p$ полюсов и выполнен с применением постоянных магнитов. Шаг полюсов определяется углом λ , а положе-

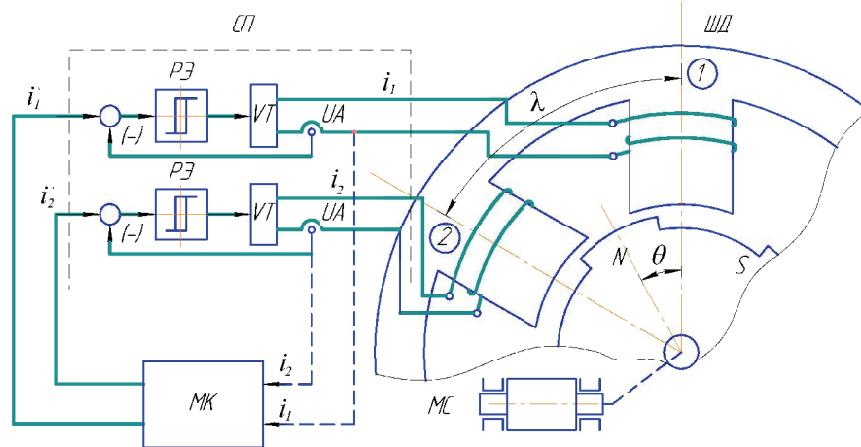


Рис.1. Схема модели мехатронного модуля

ние ротора относительно фазы 1 – углом θ . Механическая часть МС перемещения режущего инструмента представлена одномассовой жесткой системой, которая вращается в подшипниках скольжения. Статорные обмотки ШД подключены к силовому преобразователю СП, который объединяет релейные контуры регулирования тока. В каждый контур входит релейный элемент РЭ, транзисторные ключи VT и датчик тока UA обратной связи. Частота стационарных колебаний тока в контурах определяется соотношением постоянной времени статорной обмотки и малой постоянной времени фильтра датчика UA, а точность стабилизации тока определяется петлей гистерезисной характеристики РЭ. Управление СП осуществляется микроконтроллером MK. Контроль отработки микрошагов в ШД производится через контроль текущих токов i_1 и i_2 , сигналы от которых поступают на микроконтроллер MK. Алгоритм MK учитывает это и формирует требуемую последовательность и частоту задающих i_1^1 и i_2^1 токов.

Для описания динамических режимов работы ШД необходимо составить уравнения электрического равновесия для напряжений контуров регулирования токов, уравнение моментов, действующих на ротор, а также уравнение электромеханического преобразования энергии.

Уравнение равенства напряжений и Э.Д.С. обмоток статора:

$$u_1 = Ri_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + \frac{d}{dt}(\psi_M \sin p\theta); \quad (1)$$

$$u_2 = Ri_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + \frac{d}{dt}(\psi_M \sin p(\theta - \lambda)), \quad (2)$$

где u_1 , u_2 и i_1 , i_2 – соответственно напряжения и токи фаз статора; $L_1 = L_0 + L \cos 2p\theta$;

$$L_2 = L_0 + L \cos 2p(\theta - \lambda) \text{ и } M = -M_0 + M \cos 2p(\theta - \frac{\lambda}{2}) -$$

индуктивности и взаимная индуктивность обмоток двух фаз статора; R – активное сопротивление обмотки статора; ψ_M – максимальное значение потокосцепления, создаваемое постоянным магнитом.

Электромагнитный момент, создываемый обмотками фаз статора:

$$M_\vartheta = -\psi_M i_1 \sin p\theta - \psi_M i_2 \sin p(\theta - \lambda). \quad (3)$$

Уравнение моментов, действующих на ротор:

$$\frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \cdot \omega + M_c = M_\vartheta - M_H, \quad (4)$$

где $J_\Sigma = J_r + J_n$ – суммарный момент инерции, приведенный к валу ротора; $\omega = d\theta / dt$ – угловая скорость вращения ротора; D – коэффициент вязкого трения; M_c – момент трения скольжения в подшипниках; M_H – момент сопротивления нагрузки.

Характеристика момента трения скольжения носит нелинейный характер (рис. 2) и получена путем аппроксимации экспериментальных данных. Характеристика представлена уравнением

$$M_c = M_0 + \alpha_1 \omega, \quad (5)$$

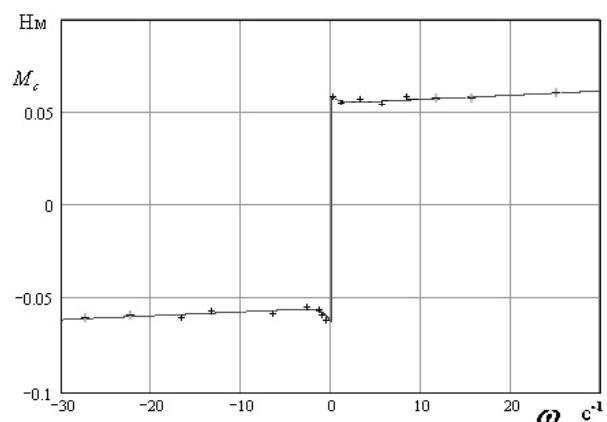


Рис. 2. Экспериментальная характеристика момента трения

где $M_0 = 0,056 \text{Нм}$ и $\alpha_1 = 1,94 \cdot 10^{-4}$. Однако, при малых скоростях $\omega < 7 \cdot \text{рад/с}$. движения начальный участок характеристики имеет вид экспоненты. Таким образом, после пуска момент трения несколько снижается, а затем возрастает за счет составляющей пропорциональной скорости вращения ротора.

Для упрощения системы уравнений (1) ч (5) введем относительные единицы. В качестве базисных величин принимаем [3]:

1. Базисные единицы напряжения, сопротивления и тока:

$$u_\delta = u_n; R_\delta = k_\phi R; I_\delta = u_\delta / R_\delta,$$

где u_n – номинальное напряжение питания и k_ϕ – коэффициент форсировки.

2. Базисные единицы момента, круговой частоты и безразмерного времени

$$M_\delta = \frac{m}{2} p \psi_\delta I_\delta; \omega_0 = \sqrt{\rho \cdot M_m / J_\Sigma}; \tau = \omega_0 t,$$

где m – число фаз ШД; M_m – максимальный статический момент.

Представим уравнения ШД, записанные в относительных единицах:

$$\begin{aligned} u_1^* = ri_1^* + (\chi_0 + \chi_1 \cos 2p\theta) \frac{di_1^*}{d\tau} + (-\dot{\chi}_0 + \\ + \chi'_1 \cos 2p(\theta - \frac{\lambda}{2})) \frac{di_2^*}{d\tau} - p\delta \cdot k_\psi \cos p\theta \frac{d\theta}{d\tau}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_2^* = ri_2^* + (\chi_0 + \chi_1 \cos 2p(\theta - \lambda)) \frac{di_2^*}{d\tau} + (-\dot{\chi}_0 + \\ + \chi'_1 \cos 2p(\theta - \frac{\lambda}{2})) \frac{di_1^*}{d\tau} - p\delta \cdot k_\psi \cos p(\theta - \lambda) \frac{d\theta}{d\tau}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } r = R/R_\delta; \quad \chi_0 = \frac{L_0 \omega_0}{u_\delta}; \quad \chi_1 = \frac{L_1 \omega_0}{u_\delta};$$

$$\dot{\chi}_0 = \frac{M_0 \omega_0}{u_\delta}; \quad \dot{\chi}_1 = \frac{M \omega_0}{u_\delta} \text{ – соответствен-}$$

но относительная величина активного сопротивления обмотки статора, безразмерные постоянные времени; u_1^* , u_2^* и i_1^* , i_2^* – соответственно относительные величины напряжений и токов фаз

статора; $\delta = \frac{\psi_\delta \omega_0}{u_\delta}$ – безразмерное внутреннее

демпфирование; $k_\psi = \frac{\psi_m}{\psi_\delta}$ – относительная величина максимального потокосцепления.

$$\mu_s^* = -\frac{2}{pm} k_\psi i_1^* \sin p\theta - \frac{2}{pm} k_\psi i_2^* \sin p(\theta - \lambda), \quad (7)$$

где $\mu_s^* = \frac{M_\delta}{M_\delta}$ – относительная величина врачающего момента двигателя.

$$\mu^* = \frac{d^2\theta}{d\tau^2} = \mu_s^* - d\omega^* - \mu_c^* - \mu_H^*, \quad (8)$$

где μ^* – динамический момент, развивающий

$$\text{ШД; } \mu_c^* = \frac{M_c}{M_\delta} \text{ – относительная величина мо-}$$

$$\text{мента сопротивления; } d = \frac{D\omega_0}{M_\delta} \text{ – коэффициент}$$

демпфирования, обусловленный вязким трением.

Результаты моделирования электромеханических процессов в шаговом двигателе при релейной стабилизации тока статора на каждом шаге перемещения ротора с учетом момента трения нагрузки приведены в виде осциллографов на рис. 3 и 4. Моделирование выполнено в программе MATLAB с использованием параметров, представленных в табл. 1.

Осциллографы (рис. 3, а) соответствуют перемещению ротора ШД на два шага и при длительности задающих токов фазных обмоток 8 о.е. Из осциллографов видно, что при задании и стабилизации тока в фазных обмотках, действии вязкого трения и трения скольжения нагрузки возможно достичь перемещения угла u с заданной точностью при мягким изменении скорости вращения ω^* и малой величине перерегулирования. В конце каждого шага перемещения наблюдается фиксация положения ротора, благодаря значительному синхронизирующему моменту. Быстродействие отработки одного шага составляет 0,06 сек.

На рис. 3, б показан электромеханический процесс отработки микрошага, путем изменения алгоритма формирования фазных токов. Это обеспечивает поворот ротора на угол 0,78 рад, что соответствует 0,5 полного шага.

На рис. 4, а приведены осциллографы скорости вращения ω^* и динамического момента μ^* с учетом момента трения скольжения нагрузки, а на рис. 4, б – без учета трения скольжения нагрузки. Сравнение кривых показывает, что момент трения скольжения искажает форму динамического момента, снижает его амплитуду на 4%, но вместе с тем способствует подавлению колебаний ротора ШД.

Сравнительные осциллографы (рис. 4, в) получены, когда в исходных уравнениях (5) и (6)

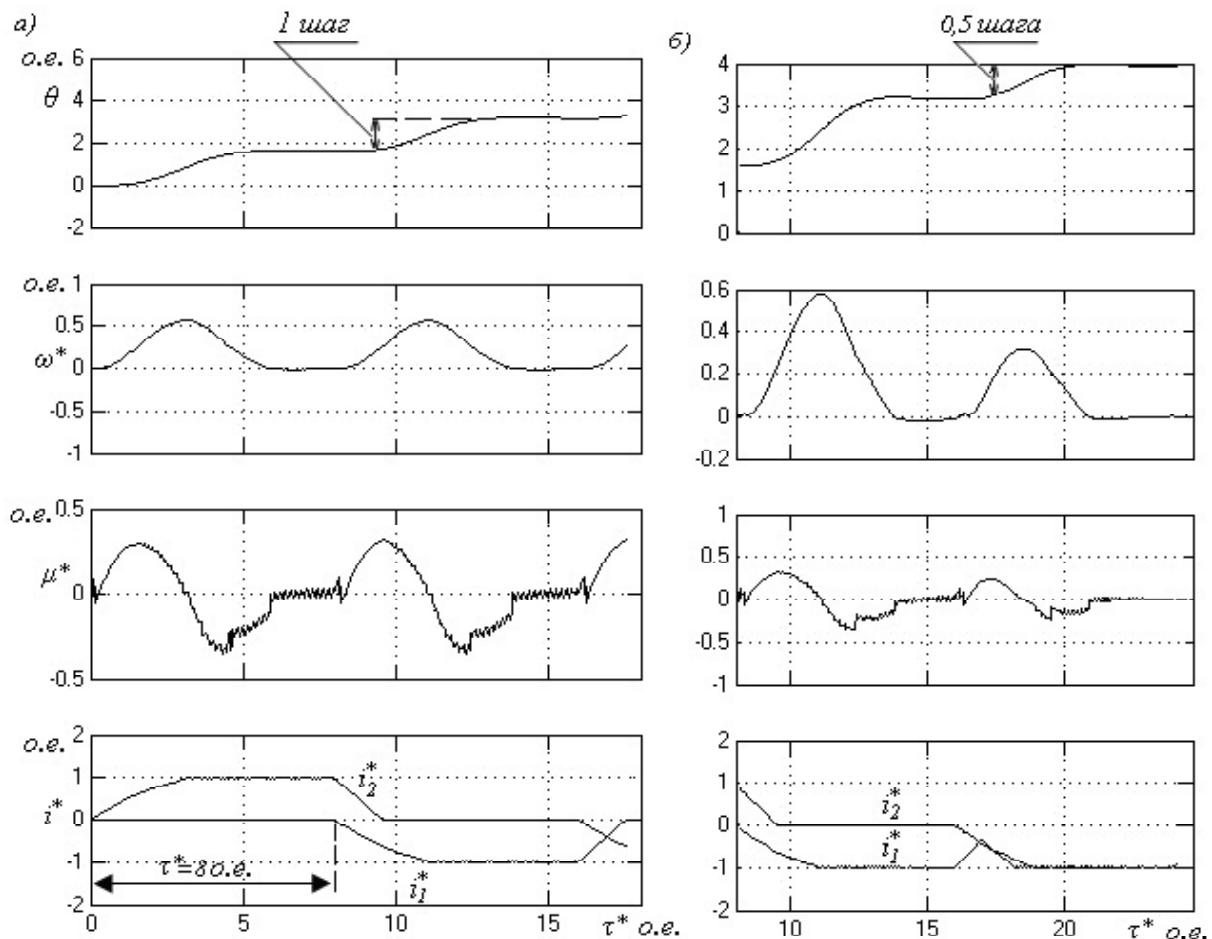


Рис. 3. Осциллограммы электромеханических процессов в ШД

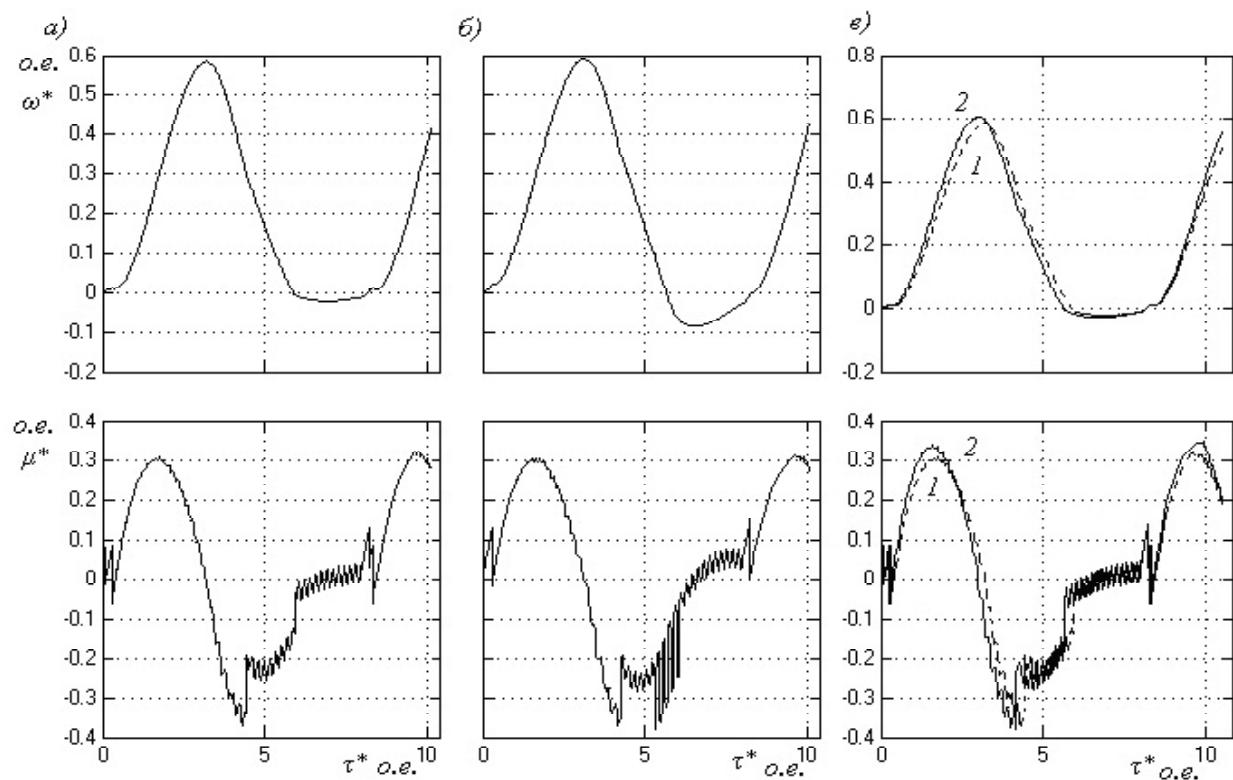
Рис. 4. Сравнительные осциллограммы угловой скорости и динамического момента ШД:
а – с учетом момента трения; б – без учета момента трения;
в – с учетом 1 и без учета 2 переменной индуктивности фаз

Таблица 1. Номинальные параметры модели

| Наименование параметра | Величина | Наименование параметра | Величина |
|------------------------------------|----------|---------------------------------------|---|
| Количество фаз - m | 2 | Активное сопротивление обмотки - R | 0,62 Ом |
| Количество полюсов - $2p$ | 2 | Индуктивность обмотки - L_0 | 0,0115 Гн |
| Максимальный момент - M_m | 2,21 Нм | Индуктивность обмотки - L | 0,0015 Гн |
| Номинальное напряжение - U_n | 30 В | Коэффициент форсировки - k_ϕ | 7,3 |
| Номинальный ток статора - I_{ph} | 5,59 А | Суммарный момент инерции - J_Σ | $1,9 \cdot 10^{-4}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ |

не учитываются переменные составляющие индуктивностей фаз $\chi_1 \cdot \cos 2p\theta$ и $\chi_1 \cdot \cos 2p(\theta - \lambda)$. Из кривых следует, что переменные составляющие индуктивностей фаз оказывают незначительное влияние на динамические процессы. Это дает основание принять индуктивности фаз постоянными величинами при исследовании многофазных ШД.

В целом результаты моделирования позволяют оценить точность отработки заданного перемещения, динамические качества системы, рассчитать механические усилия в элементах системы и влияние момента трения скольжения на основные переменные электромеханических процессов ШД.

Проведенные исследования выявили возможности для создания системы более точного позиционирования без датчика обратной связи. В этом случае алгоритм работы МК должен включать в себя наблюдатель состояния переменных мехатронного модуля на основе математической модели ШД, работающей в реальном масштабе времени.

ВЫВОДЫ

1. Разработана система уравнений в относительных единицах, позволяющая проводить исследования электромеханических процессов в ШД с различными видами статических преобразователей.

2. Точное задание и релейная стабилизация тока в фазах ШД на каждом шаге движения ротора при наличии демпфирующего момента трения обеспечивает заданные шаговые перемещения ротора без перерегулирования.

3. Рассмотренная система способна обеспечить заданную точность перемещения мехатронного модуля компенсации износа режущего инструмента с фиксацией его выходного вала в конце каждого шага перемещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегрированное интеллектуальное управление и диагностика мехатронных станочных систем / В.Ц. Зориктуев, А.Г.Лютов, Ю.А. Никитин // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 8. С. 26-30.
2. Сидоров А.С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2007. 201 с.
3. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями [под редакцией М.Г. Чиликина]. М.: Энергия, 1971. 624 с.
4. Денисов В.А., Жуков А.В. Исследование динамической модели электромеханической части системы компенсации износа режущего инструмента // Вектор науки ТГУ. 2011. №3(17). С.56-59.
5. An adaptive position tracking controller for permanent magnetic stepper motors / S. Kamalasadan, Adel A. Ghandakly // Proceedings of International Conference on Automatic Control "Automatica 2002", Reference P - 089, pp 101, summary book ISBN: 84 - 699 - 9025 – X, Santiago de Cuba, July 17-19, 2002.

MATHEMATIC SIMULATION OF PART STEPPING MOTOR MECHATRONIC MODULE WEAR CUTTING TOOL

© 2012 V.A. Denisov, A.V. Zhukov

Togliatti State University

In this article we got equations and performed mathematical simulation of electromechanical processes in stepping motor running in mechatronic module. It is shown that current stabilization at each step and set parameters of system with stepping motor is able to provide necessary stepping movements mechatronic module with required accuracy and speed.

Key words: mathematic model, stepping motor, tool wear, mechatronic module, system of compensation.

Vladimir Denisov, Candidate of Technics, Associated Professor at the Cars Electrical Equipment and Electromechanics Department. E-mail: v.denisov@tltsu.ru
Alexander Zhukov, Graduate Student.
E-mail: alexzhuk87@yandex.ru