

КОНЦЕПЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРИЙНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО УДАРНОГО ГРАВИРОВАНИЯ

Магомедов М.Х.

Научно-производственное объединение «Сауно», Москва, Россия

Ключевые слова: виброгенератор, зубцовая структура статора, упругий подвес, коллекторный двигатель постоянного тока, структурная схема замещения, ШД-виброгенератор, ударный момент.

Аннотация. Обоснована возможность применения серийного промышленного шагового двигателя (ШД) в новом качестве – в режиме вынужденных ударных колебаний с малой амплитудой в частотном диапазоне от долей Гц до полутора кГц. Такого рода устройства востребованы в вибрационных робототехнических системах. Показано, что новый ШД-виброгенератор может быть эффективно использован также в прецизионных станках ударного гравирования в режиме широтно-временной модуляции управляющих импульсов.

THE CONCEPT OF USING SERIAL STEPPER MOTOR IN DIGITAL IMPACT ENGRAVING SYSTEMS

Magomedov M.H.

Scientific and Production Association "Sauno", Moscow, Russia

Keywords: vibration generator, tooth structure of the stator phase, elastic suspension, DC collector motor, structural replacement scheme, SHD-vibration generator, shock moment.

Abstract. The possibility of using a serial industrial stepper motor (SM) in a new quality is justified – in the mode of forced shock vibrations with a small amplitude in the frequency range from fractions of Hz to one and a half kHz. This mode is in demand in vibrating robotic systems. It is shown that the new SHD-vibration generator can also be effectively used in precision impact engraving systems with time-width modulation of control pulses.

Компьютеризированный гравировальный станок ударного действия нового поколения описан в [1-3]. Станок укомплектован оригинальной инструментальной головкой, её принцип действия основан на использовании серийного шагового двигателя в новом качестве. В станках предыдущих версий применялся линейный электромагнит, серийное производство которых в неспециализированных условиях было неэффективным и дорогостоящим. Это не позволяло повысить ни качество формообразования элементов гравирования, ни производительность станков.

В конце 90-х годов в НПО «Сауно» (кампания является лидером компьютеризированного художественного гравирования) был разработан принципиально новый управляемый генератор ударных импульсов, работающий в требуемых частотном диапазоне с модулируемой амплитудой удара (автор Магомедов М.Х. [1]). Новизной и отличительной особенностью генератора было то, что в качестве его базового комплектующего элемента использовался серийный технически и технологически хорошо отработанный

шаговый двигатель. Новый генератор получил название «ШД-виброгенератор» (ШДВГ или ВГ), хотя его функциональные возможности оказались гораздо шире. Положительный эффект от технической реализации серийного ШД в технологии гравирования был таким, что за несколько лет применения ШД-виброгенератор полностью вытеснил дорогостоящий «самодельный» ВГ, выполненный на базе линейного электромагнита [4].

Особенность штатного режима работы ШД заключается в пространственно-временной периодичности электромагнитных и механических процессов: периодичность в пространстве – в секторе одного зубцового деления статора (ротора), период во времени – определяется частотой задающих импульсов. В механизме создания момента пары сил на валу ротора или ударного момента ШД (в отличие от коллекторного электродвигателя постоянного тока (ЭДПТ)) первостепенную роль играет зубцовая структура статора и ротора ШД, связанная с фазной системой обмоток [5, 6].

В штатном режиме при двухфазном возбуждении управляющие прямоугольные импульсы, поступающие с выходов драйверов в отдельные фазы A и B , создают «бегущее» дискретно-круговое электромагнитное поле, которое через токи Ампера вовлекает в синхронное дискретно-круговое вращение ротор двигателя с частотой задающих импульсов.

На рисунке 1 представлена общая схема нового ВГ в составе инструментальной головки (ИГ), основой которого является серийный модернизированный 8-ми полюсный реактивный или гибридный ШД [5]. Аппаратная модернизация ШД заключается, во-первых, в простом параллельном объединении фазных обмоток A_M и B_M статора, как показано на рисунке 1: точка « a » фазы A соединяется с точкой « c » фазы B и точки « b » фазы A – с точкой « d » фазы B . Выход двухполупериодного инвертора подключается к общей точке « ac », а точка « bd » – к минусу источника питания. В результате такого объединения фаз вектор магнитного потока при нулевом рассогласовании θ становится пульсирующим. Максимальный алгебраический момент пары сил на плече r радиуса ротора в секторе $0 < \theta < \lambda$ будет определен тангенциальной составляющей вектора силы Ампера F_a и пропорционален углу θ отклонения оси ротора:

$$M_{\max}|_{0 < \theta < \lambda} = 2nN_r I_0 \Phi \theta,$$

где n – число витков фазы; N_r – число полюсов ротора; I_0 – ток в фазах A_M и B_M ; Φ – магнитный поток, определяемый индукцией в воздушном зазоре B ; $\lambda = \frac{\pi}{4}$ для 8-ми полюсного гибридного ШД.

Пространственная ориентация осей фазных обмоток на рисунке 1 изображена условно.

Во-вторых, для преобразования малых угловых колебаний ротора в секторе $0 < \theta < \lambda$ ШД в линейные удары технологического инструмента использован одноплечий рычаг (рис. 1).

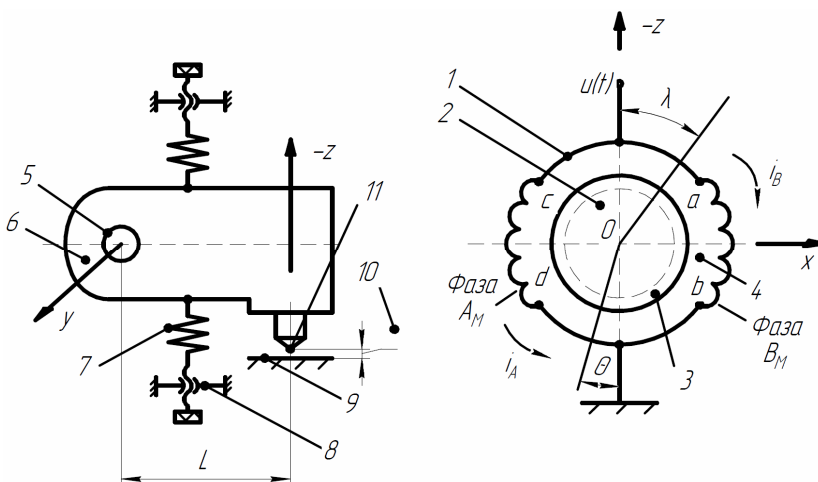


Рис. 1. Общая схема ШДВГ: 1 – параллельное соединение статорных обмоток; 2 – ротор ШД; 3 – воздушный зазор; 4 – статор ШД; 5 – вал ротора; 6 – ударный рычаг; 7 – упругий элемент; 8 – микрометрический винт; 9 – картинная плоскость; 10 – технологический зазор; 11 – ударный инструмент

Оптимальным вариантом конструкции является рычаг с плечом L , жёстко закреплённый на валу ротора. Геометрия рычага рассчитана так, что его центр масс совмещён с центром удара. На другом конце рычага в цапговом зажиме установлен гравировальный инструмент.

Для возбуждения «качающегося» электромагнитного поля при однополярном управлении необходимо после каждого последующего временного импульса возвращать ротор в предыдущее пространственное положение. Поэтому рычаг в корпусе инструментальной головки установлен в упругом подвесе (рис. 1). В качестве упругих элементов могут быть использованы как пружины, так и постоянные магниты. Для регулировки натяжения пружин применены микрометрические винты [7].

В ударном гравировальном станке упругий подвес совместно с приводом инструментальной головки осуществляет также функции выставки и регулировки технологического зазора κ , необходимого при ударном гравировании для разгона инструмента до требуемой скорости удара [8].

Физические процессы, протекающие в диапазоне $0 < \theta < \lambda$ ШД (например, $\lambda = \pi/4$ для 8-ми полюсного двигателя), в первом приближении идентичны процессам в ЭДПТ с якорным управлением $u_y(t)$, поэтому схему замещения ШДВГ можно представить известной двухконтурной структурной схемой ЭДПТ, охваченной упругой обратной связью по углу – координате θ звена [9]. В частности, упругая связь может быть линейной, характеризующейся коэффициентом упругости c_y .

Непосредственно из структурной схемы замещения получим следующие лапласовские передаточные функции по переменной управления $u_y(t)$, характеризующие динамику ШДВГ в рабочем диапазоне $0 < \theta < \lambda$:

$$\Phi_u^\theta(s) = \frac{\theta(s)}{U_y(s)} = \frac{c_M}{c_y R(T^2 s^2 + (2\xi T + \frac{c_e c_M}{c_y R})s + 1)} = \frac{c_M}{c_y R(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)};$$

$$\Phi_u^\Omega(s) = \frac{\Omega(s)}{U_y(s)} = \frac{c_M s}{c_y R(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)};$$

$$\Phi_u^M(s) = \frac{M(s)}{U_y(s)} = \frac{c_M (T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)}{c_y R(T_1^2 s^2 + \frac{1}{c_y R} (2\xi_1 T_1 c_y R + c_e c_M) s + 1)},$$

где верхние индексы при функциях $\Phi_u^\theta(s)$, $\Phi_u^\Omega(s)$, $\Phi_u^M(s)$ означают соответственно θ – угол, Ω – угловую скорость, M – момент;

c_e – коэффициент противо-ЭДС эквивалентного ЭДТП;

c_M – коэффициент вращающего момента;

c_y – коэффициент упругого элемента;

R – омическое сопротивление цепи управления;

ξ – коэффициент упругого элемента;

$T = \frac{J_\Sigma}{c_{\text{вт}}}$ – суммарная механическая постоянная времени;

$c_{\text{вт}}$ – коэффициент скоростного (вязкого) сопротивления;

J_Σ – суммарный момент инерции и коэффициент скоростного (вязкого трения);

$T_1 = \sqrt{\frac{T}{c_y}}$ – постоянная времени эквивалентного обобщённого

колебательного звена;

$\xi_1 = \frac{1}{2\sqrt{c_y T}}$ – коэффициент относительного демпфирования

обобщённого колебательного звена [9].

Реакции ШДВГ на импульсные управляющие воздействия $f_y(t)$ переменной длительностью τ определены в общем виде соответствующими обратными преобразованиями Лапласа:

$$\Omega(t) = \mathcal{L}^{-1}(U_y(s)\Phi_u^\Omega(s));$$

$$\theta(t) = \mathcal{L}^{-1}(U_y(s)\Phi_u^\theta(s));$$

$$M(t) = \mathcal{L}^{-1}(U_y(s)\Phi_u^M(s)),$$

где $f(t) = h(u(t) - u(t - \tau))$ – импульсная функция управления, преобразование

Лапласа которой $\mathcal{L}F(t) = \frac{h(1 - e^{-\tau s})}{s(1 - e^{-T_0 s})}$.

На рисунке 2 представлено фото модернизированной ИГ с ШДВГ ударно-гравировального станка НПО «Сауно». В данном варианте головки в качестве упругих элементов подвеса применены две пары постоянных магнитов, включённых по дифференциальной схеме [8].

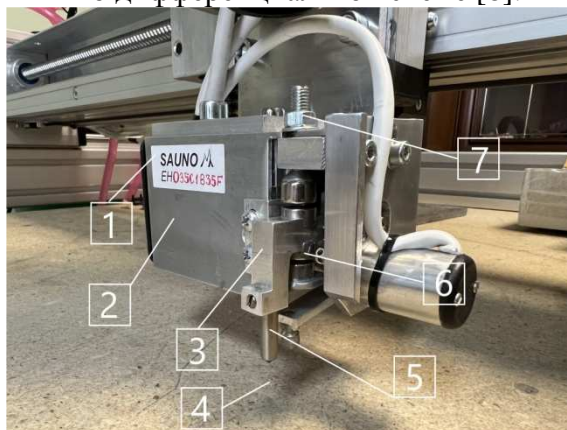


Рис. 2. Фото инструментальной головки: 1 – корпус ИГ; 2 – ударный ШД (в корпусе); 3 – рычаг; 4 – картинная плоскость заготовки; 5 – инструмент (алмазная игла); 6 – дифференциальный магнитный подвес; 7 – микрометрический винт.

Вопросы динамики удара при широтной-временной модуляции управляющих импульсов, применяемой в *DCIE*-технологии с целью получения черно-белой палитры оттенков *Br*-изображения, являются самостоятельными и в данной статье не рассматриваются.

Выводы

Шаговый двигатель является техническим средством импульсного типа, его принцип действия основан на ударном характере колебаний ротора в диапазоне одного зубцового деления статора с частотой задающих импульсов и поэтому априори может быть применён в качестве альтернативного ВГ.

Посредством несложной аппаратной модернизации серийный ШД из штатного режима может быть переведён в режим вынужденных ударных колебаний малой амплитуды, то есть преобразован в виброгенератор, работающий в частотном диапазоне, задаваемом импульсами опорной частоты [5-7].

Список литературы

1. Патент №2429133 РФ. Гравировальное устройство (варианты) / М.Х. Магомедов. – Заявка № 2010111630/05 от 29.03.2010; опубл. 20.09.2011, Бюл. №26.
2. Магомедов М.Х., Громов А.Е., Яковлев А.В. Цифровая технология управляемого ударного гравирования // Вестник компьютерных информационных технологий. – 2015. – № 10. – С. 3-11. – doi: 10.14489/vkit.2015.010.pp.003-011.
3. Патент № 2399497 РФ. Устройство для нанесения изображения на поверхности твёрдых материалов методом ударного или ударно-вращательного гравирования. / М.Х. Магомедов. – Заявка №2009119902/12 от 27.05.2007; опубл. 20.09.2010, Бюл. №26.

4. Миков И.Н. Технология автоматизированного гравирования художественных изделий. – М.: Изд-во «Мир горной книги», 2007. – 346 с.
5. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1987. – 201 с.
6. Филимонов Н.Б. Системы многорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза // Известия вузов. Серия Приборостроение. – 1988. – № 2. – С. 18-33.
7. Кокорев Ю.А., Звягин Ф.В. Способы расчёта точностных характеристик деталей и узлов приборов. – М.: Изд-во «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2016. – 211 с.
8. Магомедов М.Х., Громов, Яковлев А.В. Прецизионный гравировальный станок-автомат интегрированной компьютерно-копировальной системы // Вестник машиностроения. – 2020. – № 11. – С. 71-77. – doi: 10.36652/0042-4633-2020-11-71-77.
9. Красовский А.Б. Основы электропривода. – М.: Изд-во «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2019. – 403 с.

References

1. Patent No. 2429133 RU. Engraving device (variants) / M.H. Magomedov. – Appl. No. 2010111630/05 from 29.03.2010; publ. 20.09.2011, Bul. No.26.
2. Magomedov M.H., Gromov A.E., Yakovlev A.V. Digital technology of controlled impact engraving // Bulletin of Computer and information technologies. 2015, no. 10, pp. 3-11. doi: 10.14489/vkit.2015.010.pp.003-011.
3. Patent No. 2399497 RU. A device for drawing images on the surface of solid materials by the method of impact or impact-rotational engraving / M.H. Magomedov – Appl. No. 2009119902 /12 from 27.05.2007; publ. 20.09.2010, Byul. No.26.
4. Mikov I.N. Technology of automated engraving of art products. – М.: Publ. house "The World of the Mining book", 2007. – 346 p.
5. Kenio T. Stepper motors and their microprocessor control systems. – М.: Publ. house "Energoatomizdat", 1987. – 201 p.
6. Filimonov N.B. Systems of multimode regulation: concept, principles of construction, problems of synthesis // News of universities. Series Instrumentation. 1988, no. 2, pp. 18-33.
7. Kokorev Yu.A., Zvyagin F.V. Methods of calculating the accuracy characteristics of parts and assemblies of devices. – М.: Publ. house "Bauman Moscow State Technical University". 2016, 211 p.
8. Magomedov M.H., Gromov, Yakovlev A.V. Precision engraving machine-automatic integrated computer-copying system // Bulletin of Mechanical Engineering. 2020, no. 11, pp. 71-77. doi: 10.36652/0042-4633-2020-11-71-77.
9. Krasovsky A.B. Fundamentals of electric drive. – М.: Publ. house "Bauman Moscow State Technical University", 2019. – 403 p.

Магомедов Магомед Хабибович – директор НПО «САУНО»	Magomedov Magomed Habibovich – General Director of the NGO "SAUNO"
mxsauno@mail.ru	

Received 28.02.2023