

УДК 621.83; 621.9.047

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-19-27

Электромеханический привод с планетарным роликвинтовым механизмом для электрохимического станка с вибрирующим электродом

И.М. Мамаев, В.Н. Филимонов

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600000, Владимир, Российская Федерация, ул. Горького, д. 87

Electromechanical Actuator with a Planetary Roller-Screw Mechanism for the Electrochemical Machine with an Oscillating Tool Electrode

I.M. Mamaev, V.N. Filimonov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov, 600000, Vladimir, Russian Federation, Gorky St., Bldg. 87

 e-mail: vano_33reg@mail.ru, tpm@vlsu.ru

i Рассмотрены вопросы модернизации электромеханического привода поступательного перемещения с планетарным роликвинтовым механизмом, разработанного для ранее реализованной конструкции электрохимического станка ЭХС-5000. Станок предназначен для изготовления тонкостенных пространственных аэродинамических профилей лопаток газотурбинных двигателей. Модернизация проведена с целью повышения точности формообразования и качества обработки сложных высокопрочных поверхностей турбинных лопаток путем создания вибрации электрода-инструмента в направлении основной подачи, формирующей межэлектродный зазор. На основании расчета необходимых амплитуды и частоты вибрации электрода-инструмента выполнен сравнительный анализ возможностей линейного электродвигателя и двух вариантов электромеханического привода поступательного перемещения с планетарным роликвинтовым механизмом на базе шагового или синхронного электродвигателя. Показано, что в наибольшей степени заданным техническим требованиям к станку ЭХС-5000 удовлетворяет электромеханический привод на базе синхронного электродвигателя FХМ14 и планетарного роликвинтового механизма 52,8×1×60 с длинными резьбовыми роликами при соосном расположении привода и цилиндрической направляющей рабочей головки. По результатам расчета такой электромеханический привод способен обеспечить вибрацию электрода-инструмента с требуемой частотой 50...10 Гц и соответствующим размахом колебаний 0,016...0,380 мм.

Ключевые слова: электромеханический привод, роликвинтовой механизм, электрохимический станок, вибрирующий электрод-инструмент, лопатки газотурбинных двигателей, точность формообразования

i This article deals with the questions of modernization of the electromechanical drive of translational movement with a planetary roller screw actuator developed for the previously

implemented design of the electrochemical machine EKHS-5000. The machine was designed for manufacturing thin-walled spatial aerodynamic blade profiles of gas turbine engines. The purpose of the modernization was to increase the accuracy of shaping and the quality of processing complex high-strength surfaces of turbine blades by creating vibration of the tool electrode in the direction of the main feed that forms the interelectrode gap. Based on the calculation of the required amplitude and vibration frequency of the tool electrode, a comparative analysis was performed to evaluate the capabilities of the linear electric motor and two variants of the electromechanical drive of translational motion with a planetary roller screw actuator based on the stepping or the synchronous motor. It is shown that the electromechanical actuator based on the synchronous electric motor FXM14 and the planetary roller-screw mechanism 52.8×1×60 with long threaded rollers with the coaxial arrangement of the drive and a cylindrical guide of the working head satisfies the requirements to the machine EKHS-5000 the most. According to the calculation results, such electromechanical drives can guarantee vibration of the tool electrode with the required frequency from 50 Hz to 10 Hz and the corresponding range of oscillations from 0.016 mm to 0.380 mm.

Keywords: electro-mechanical actuator, roller-screw mechanism, electrochemical machine tool, oscillating electrode tool, gas turbine engine blades, shaping accuracy

Одной из ключевых в авиастроении является технология изготовления тонкостенных пространственных аэродинамических профилей лопаток газотурбинных двигателей [1]. Для решения задач формообразования сложных высокопрочных поверхностей турбинных лопаток широко применяют различные виды электрохимической обработки.

Развитие технологий электрохимической обработки в первую очередь связано с повышением технического уровня станочного оборудования. По количеству и качеству выпускаемых электрохимических станков отечественный рынок заметно отстает от мирового. Станки ведущих зарубежных компаний отличаются высокой точностью позиционирования (0,002...0,005 мм) электрода-инструмента (ЭИ) за счет высокой жесткости элементов конструкции, оснащенной высокоточными электромеханическими приводами (ЭМП), например, на базе прецизионных зубчатых и шариковых передач, а также направляющих качения с предварительным натягом [2].

Альтернативный линейный электропривод вследствие излишнего запаса по скорости имеет в несколько раз большую мощность, массу и стоимость [3]. Его применение пока ограничено лишь сегментом малонагруженных станков, предназначенных, например, для лазерной или электроэрозионной обработки. Совершенствование высоконагруженных электрохимических станков идет по пути повышения динамической эффективности, геометрической и кинематической точности ЭМП на основе достижений в области мехатроники.

Технический уровень ЭМП во многом определяется точностью и оптимальностью структуры кинематической цепи его исполнительного механизма. Планетарный роликвинтовой механизм (ПРВМ) в составе ЭМП электрохимического станка обеспечивает преобразование и передачу нормированного углового перемещения своего центрального винта в соответствующее по точности прямолинейное возвратно-поступательное перемещение гайкиштока (ГШ) и закрепленного на нем ЭИ. По сравнению с другими механизмами винт — гайка качения ПРВМ с длинными резьбовыми роликами (равной длины с винтом) обладает более высокими редукцией, удельной грузоподъемностью, кинематической точностью и плавностью работы, имея в несколько раз меньший момент инерции [4, 5]. Этим обеспечивается компактность, высокое быстродействие ЭМП и точность позиционирования ЭИ электрохимического станка.

Теория, методика проектирования и типовая технология изготовления ПРВМ с длинными резьбовыми роликами, разработанные в последней четверти прошлого века во Владимирском государственном университете под руководством профессора В.В. Козырева, позволили в основном решить ряд проблем создания мехатронных модулей межотраслевого применения с высокой разрешающей способностью [3, 4]. В частности, по заказу АО СП «Завод «Топаз» (Молдова), входящего в структуру АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» (Москва), разработан, изготовлен и испытан ЭМП на базе шагового двигателя

1FL3043 фирмы Siemens (Германия) и ПРВМ 52,8×1×60 с длинными резьбовыми роликами для электрохимического станка.

Техническая характеристика ПРВМ 52,8×1×60 с длинными резьбовыми роликами

Средний диаметр ходовой резьбы ГШ, мм	52,8
Перемещение ГШ за оборот винта, мм	1
Диапазон перемещения ГШ, мм	0...60
Заданная осевая сила, Н:	
номинальная	12 000
максимальная	15 000
Статическая грузоподъемность, Н	60 000
Осевая жесткость, Н/мкм	500...600
Коэффициент полезного действия	0,6...0,7
Долговечность при номинальной нагрузке, млн об.	500
Момент инерции, кг·м ²	0,42...0,45
Габаритные размеры, мм:	
длина	242
ширина	85
высота	85
Масса, кг	5

Стендовые испытания нагрузочной способности, коэффициента полезного действия, жесткости, геометрической и кинематической точности ПРВМ 52,8×1×60 подтвердили соответствие основных характеристик требованиям технического задания на проектирование, разработанного заказчиком [6–8].

При заданных нагрузках шаговый ЭМП отработал все необходимые перемещения без потери шагов. Применение в экспериментальном следящем ЭМП обратной связи по положению позволило получить погрешность перемещения ГШ и разрешающую способность ЭМП, равные таковым для датчика положения. Поскольку в ПРВМ 52,8×1×60 линейное перемещение ГШ за оборот винта равно 1 мм, а шаговый электродвигатель за оборот винта делает 10 000 шагов, разрешающая способность шагового ЭМП при линейном перемещении ГШ составляет 0,1 мкм. Использованный оптоэлектронный датчик положения ЛИР-17 фирмы «Измерительные системы» (Санкт-Петербург) обеспечил для следящего ЭМП погрешность перемещения в пределах ±1,0 мкм.

Динамическая эффективность ЭМП на базе ПРВМ с длинными резьбовыми роликами подтверждена испытаниями опытного образца электромеханического подъемника [4, 9] и экспериментального макетного образца тормоза электромобиля [10, 11].

В 2008–2011 гг. по договорам на создание (поставку) научно-технической продукции во Владимирском государственном университете изготовлены, испытаны и поставлены для АО СП «Завод «Топаз» восемь комплектных ЭМП (рис. 1, а) и десять ПРВМ 52,8×1×60 (рис. 1, б) как самостоятельных законченных изделий для нового электрохимического станка ЭХС-5000 (рис. 1, в).

Как и большая часть отечественных электрохимических лопаточных станков, модель ЭХС-5000, предназначенная для двухстороннего объемного формирования поверхностей лопаток газотурбинных двигателей, работает по импульсно-циклической схеме. Для повышения производительности обработку проводят одновременно с двух сторон двумя ЭИ, возвратно-поступательное перемещение которых по заданному циклу осуществляется двумя управляемыми ЭМП (рис. 2).

Заявленная заводом-изготовителем станка точность позиционирования ЭИ (±2 мкм) [12] ниже подтвержденной точности (±1 мкм) экспериментального следящего ЭМП. Это можно объяснить отсутствием эффективной системы обратной связи вследствие сложности получения информации о состоянии межэлектродного зазора хотя бы в нескольких точках обрабатываемой поверхности [2].

Для повышения точности формообразования и качества поверхности в конструкции станка целесообразно предусмотреть вибрацию ЭИ в направлении подачи, синхронизированную с подачей рабочих импульсов тока [2, 13, 14]. Бесконтактное копирование на электродзаготовку рабочей поверхности ЭИ осуществляется при малых межэлектродных зазорах (1...10 мкм) и высоких динамических нагрузках. Исследованиями установлено, что вибрация ЭИ, формирующая межэлектродный зазор, оказывает основное влияние на точность копирования, причем более значимое, чем импульсный ток [14, 15].

Цель работы — анализ возможности создания вибраций ЭИ в направлении основной подачи и расчет необходимых амплитуд и частот вибраций ЭИ для ЭМП.

Для создания вибраций ЭИ с необходимыми амплитудой (несколько сотых долей миллиметра) и частотой (10...50 Гц) в реализованной конструкции станка предлагается два решения. Первое основано на использовании ЭМП с шаговым электродвигателем 1FL3043. В этом слу-

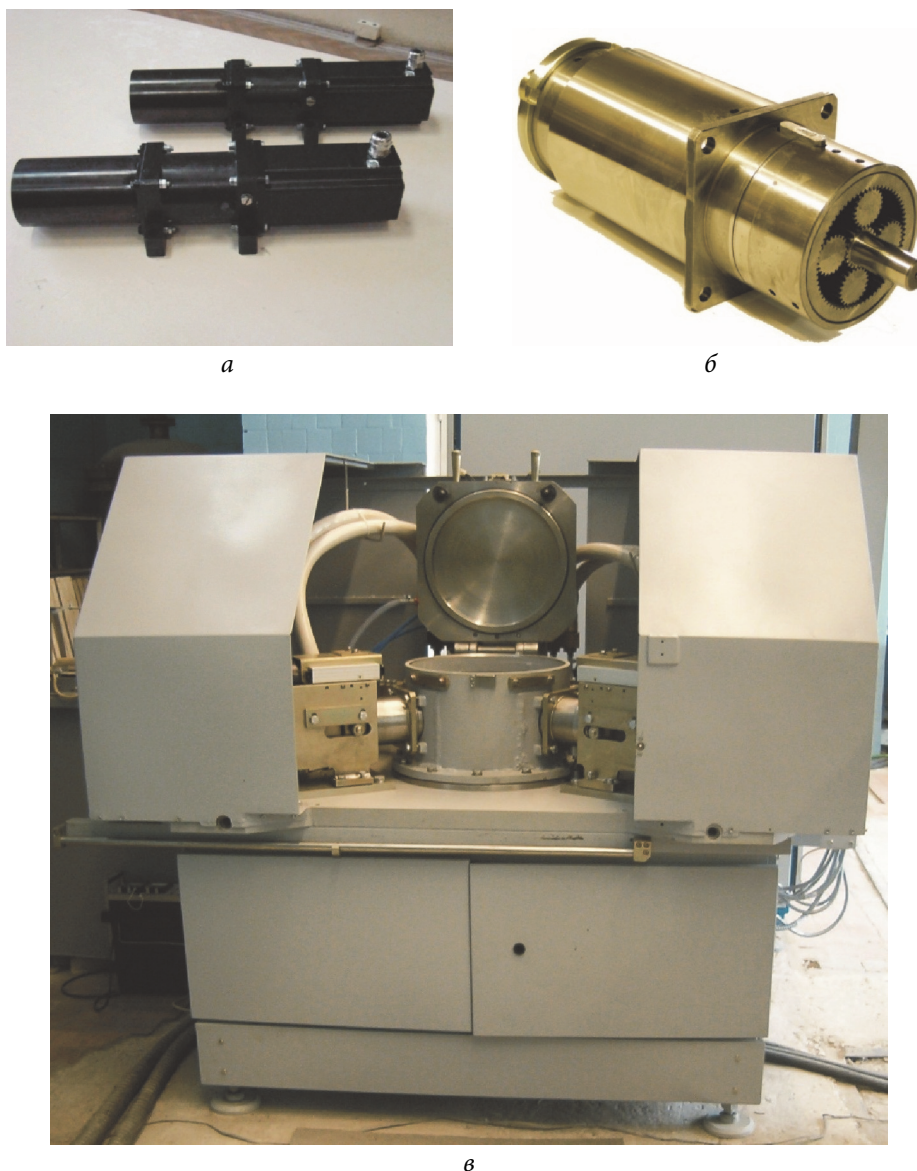


Рис. 1. Внешний вид комплектных ЭМП (а), ПРВМ 52,8×1×60 (б) и нового электрохимического станка ЭХС-5000 (в)

чае вибрацию ЭИ требуемой амплитуды с частотой 50 Гц можно получить путем изменения характеристик блока управления шаговым двигателем с помощью регулировки дросселей стабилизатора. Для возбуждения вибраций ЭИ с частотой, отличной от 50 Гц, блок управления следует подключить к сети через генератор частоты.

Второе решение связано с заменой шагового электродвигателя 1FL3043 на синхронный электродвигатель FXM14 фирмы Fagor (Испания), длина которого на 100 мм больше, а соединительные и радиальные размеры обоих агрегатов практически совпадают. Вместе с тем номинальная частота вращения у синхронного элек-

тродвигателя FXM14 в 10 раз больше, чем у шагового 1FL3043.

Оценим возможности ЭМП на базе синхронного электродвигателя FXM14 и ПРВМ 52,8×1×60 по созданию вибраций ЭИ с необходимыми амплитудой и частотой. Момент инерции ЭМП $I_{\text{п}}$ складывается из моментов инерции вращающихся частей двигателя ($I_{\text{д}} = 3,30 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) и ПРВМ с поступательно перемещающейся ходовой ГШ ($I_{\text{м}} = 0,45 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$):

$$I_{\text{п}} = I_{\text{д}} + I_{\text{м}} = (3,30 + 0,45) \cdot 10^{-4} = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Пусковой момент двигателя без специальной системы охлаждения $M_0 = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Момент

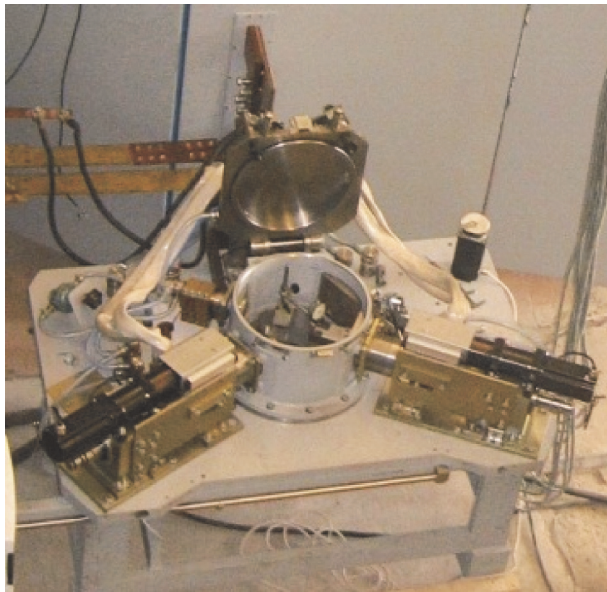


Рис. 2. Обработка изделия двумя ЭИ, возвратно-поступательное перемещение которых осуществляется двумя управляемыми ЭМП

статического сопротивления, приведенный к валу двигателя, при действии номинальной осевой силы [4]

$$M_c = \frac{FS}{2\pi\eta} = \frac{12\,000 \cdot 0,001}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,6} = 3,2 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где F — номинальная осевая сила, $F = 12\,000 \text{ Н}$; S — перемещение ГШ ПРВМ за оборот винта, $S = 0,001 \text{ м/об}$; η — коэффициент полезного действия ПРВМ, $\eta = 0,6$.

Тогда возможное максимальное угловое ускорение вала двигателя

$$\varepsilon = \frac{M_0 - M_c}{I_{\pi}} = \frac{5 - 3,2}{3,75 \cdot 10^{-4}} = 4800 \text{ рад/с}^2,$$

а возможное максимальное линейное ускорение ГШ вместе с ЭИ

$$W = \frac{\varepsilon S}{2\pi} = \frac{4800 \cdot 0,001}{6,28} = 0,764 \text{ м/с}^2.$$

При гармоническом законе движения ГШ и ЭИ с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ и амплитудой A круговая частота колебаний $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$. Тогда требуемое максимальное ускорение ГШ и ЭИ

$$W_A = \omega^2 A.$$

Полагая $W = W_A$, найдем амплитуду колебаний ЭИ:

$$A = \frac{W}{\omega^2} = \frac{0,764}{314^2} = 7,75 \cdot 10^{-6} \text{ м} \approx 0,008 \text{ мм},$$

а затем угловую амплитуду вала двигателя:

$$\varphi_A = \frac{2\pi A}{S} = \frac{6,28 \cdot 0,008}{1} = 0,05 \text{ рад}.$$

То есть размах колебаний ЭИ $2A \approx 0,016 \text{ мм}$ соответствует повороту вала двигателя приблизительно на угол 6° .

Тогда его требуемая максимальная угловая скорость

$$\omega_A = \varphi_A \omega = 0,05 \cdot 314 = 15,70 \text{ рад/с}.$$

При частоте вращения $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ возможная угловая скорость вала синхронного электродвигателя FXM14

$$\Omega_A = \frac{2\pi n}{60} = \frac{6,28 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с}.$$

Снижая частоту колебательного процесса, можно увеличить амплитуду колебаний ЭИ следующим образом:

Частота f , Гц	50	30	20	10
Амплитуда A , мм	0,008	0,022	0,048	0,19

Проведенные расчеты показали, что ЭМП с синхронным двигателем FXM14 и ПРВМ $52,8 \times 1 \times 60$ способен обеспечить вибрацию ЭИ с необходимыми частотой $f = 50 \dots 10 \text{ Гц}$ и размахом колебаний $2A = 0,016 \dots 0,380 \text{ мм}$.

Экспериментально подтверждено [4, 6], что при заданных требованиях к длине перемещения ГШ ($L = 60 \text{ мм}$), размаху колебаний ($2A = 0,5 \text{ мм}$) и периоду цикла ($T = 2 \text{ с}$) реализованный ЭМП с шаговым двигателем 1FL3043 и ПРВМ $52,8 \times 1 \times 60$ обеспечивает снижение периода цикла в 2,5–3,5 раза, а именно до 0,7 с при максимальной осевой силе на штоке $F = 15\,000 \text{ Н}$ и до 0,5 с при номинальной $F = 12\,000 \text{ Н}$. При замене шагового электродвигателя 1FL3043 на синхронный FXM14 номинальная линейная скорость штока ПРВМ возрастет в 10 раз.

Максимальный момент электродвигателя FXM14 при перегрузке $M_{\max} = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Если с помощью системы принудительного охлаждения обеспечить получение длительно действующего момента M_{\max} , как это делается для линейных электродвигателей, то при необходимости, возможно, удастся увеличить амплитуду колебаний, например, на порядок при частоте 50 Гц.

Главные преимущества альтернативного линейного электродвигателя — высокие скорости, ускорения и большие длины перемещений ра-

Характеристики приводов

Характеристика	Требуемое значение	Линейный двигатель Siemens 1FN3900-4NB20	Электрохимические приводы на базе ПРВМ 52,8×1×60	
			Шаговый ЭМП с двигателем Siemens 1FL3043	ЭМП с синхронным двигателем Fagor FXM14
Сила, Н:				
номинальная	12 000	7 250	12 060	15 465
максимальная	15 000	15 849	22 619	75 400
Максимальная скорость, м/мин:				
при максимальной силе	0,03	70	0,09	3,00
при номинальной силе	0,03	129	0,30	3,00
Мощность (установленная), кВт	–	43,8	0,27	1,4
Габаритные размеры, мм:				
длина	–	719	461	562
ширина	–	342	85	86
высота	–	100	85	86
Масса, кг	–	82,2	13,50	16,90

бочего органа. Однако при требуемых коротких размахах колебаний (0,5 мм) даже самый большой типоразмер линейных электродвигателей фирмы Siemens 1FN3900-4NB20, согласно ее методике, развивает только 70 % номинальной осевой силы [16], т. е. $F = 7250$ Н, и уже по этой причине не удовлетворяет предъявляемым требованиям, имея к тому же в несколько раз большие мощность, массу и габаритные размеры (см. таблицу).

Выводы

1. Заданным требованиям к конструкции модернизированного станка ЭХС-5000 с вибрирующим ЭИ удовлетворяют ЭМП на базе ПРВМ 52,8×1×60 как с шаговым электродвига-

телем 1FL3043, так и с синхронным электродвигателем FXM14.

2. Конструкция ЭМП с шаговым двигателем несколько компактнее и дешевле, чем ЭМП с синхронным двигателем, но уступает последнему по функциональным возможностям.

3. Линейные электродвигатели не соответствуют заданным требованиям по развиваемым усилиям на рабочей головке, а также имеют в несколько раз большую массу и габаритные размеры, чем ЭМП.

4. Станок ЭМП должен иметь соосное расположение с цилиндрической направляющей рабочей головки с ЭИ, что обеспечит наилучшие показатели по точности, надежности и массогабаритным параметрам [17].

Литература

- [1] Klocke F., Klink A., Veselovac D., Aspinwall D.K., Sein Leung Soo, Schmidt M., Shilp M., Levy G., Kruth J.-P. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2014, no. 63, pp. 703–726.
- [2] Митрюшин Е.А., Саушкин С.Б., Саушкин Б.П. Состояние и тенденции развития станочного оборудования для электрохимической обработки аэродинамических профилей лопаточных машин. *Труды ГОСНИТИ*, 2010, т. 106, с. 215–229.
- [3] Козырев В.В., Филимонов В.Н., Крылов А.В., Федотов О.В. Мехатронные модули с высокой размещающей способностью. *Высокие технологии XXI века. Матер. Десятого юбилейного междунар. форума*, Москва, 21–24 апреля 2009 г., Москва, ЗАО «НПКФ «МаВР», 2009, с. 625–629.

- [4] Козырев В.В. *Конструкция, теория и методика проектирования и исследования планетарных передач винт-гайка с резьбовыми роликами и мехатронных модулей на их базе*. Владимир, Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. 238 с.
- [5] Козырев В.В. *Планетарная передача винт-гайка с длинными резьбовыми роликами*. Пат. 2341707 РФ, 2008, бюл. № 35, 6 с.
- [6] Козырев В.В., Крылов А.В., Филимонов В.Н., Кузьмин И.Н., Рябов К.В., Тутубалин Р.Ю. Экспериментальные исследования роликовинтовой передачи РВПЗК 52,8×1×60 в составе шагового электромеханического привода для станка электрохимической обработки лопаток турбин авиационных двигателей. *Труды ГОСНИТИ*, 2010, т. 106, с. 165–168.
- [7] Mamaev I.M., Morozov V.V., Fedotov O.V., Filimonov V.N. Harmonic analysis of the kinematic error in a planetary roller screw. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 7, pp. 515–519.
- [8] Кузьмин И.Н., Новоселов Е.А., Филимонов В.Н. Электромеханический привод подачи электрода на базе роликовинтовой передачи РВПЗК 52,8×1×60 для станка электрохимической обработки лопаток авиационных турбин. *Исследование, проектирование, испытание и эксплуатация информационно-измерительных устройств военной техники. Матер. Всерос. науч.-техн. конф.*, Владимир, 6–8 октября 2010 г., Москва, Изд-во РАН, 2010, с. 95–98.
- [9] Толков А.В., Круглов А.В., Жданов А.В., Филимонов В.Н., Морозов В.В. Исследование долговечности силового роликовинтового механизма электромеханического привода поступательного движения. *Современные проблемы науки и образования*, 2015, № 1-1. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18516> (дата обращения 01 марта 2018).
- [10] Терентьев П.В., Тутубалин Р.Ю., Филимонов В.Н. Разработка и испытания электромеханического привода тормоза автомобиля на базе роликовинтовой передачи. *Исследование, проектирование, испытание и эксплуатация информационно-измерительных устройств военной техники. Мат. Всерос. науч.-техн. конф.*, Владимир, 6–8 октября 2010, Москва, Изд-во РАН, 2010, с. 166–168.
- [11] Тутубалин Р.Ю., Филимонов В.Н. Математическое моделирование динамики электромеханического тормозного привода. *Современные проблемы науки и образования*, 2013, № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9207> (дата обращения 01 марта 2018).
- [12] *Станок ЭХС-5000 для импульсной электрохимической обработки лопаток газотурбинных двигателей и установок*. URL: <http://topaz.md/ru/Produktsiya/Elektrohimicheskoe-oborudovanie/> (дата обращения 01 марта 2018).
- [13] Kozhina T.D., Kurochkin A.V. Results of Investigative Tests of Gas Turbine Engine Compressor Blades Obtained by Electrochemical Machining. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127, conf. 1.
- [14] Галиев В.Э., Фарвазова Г.И. Особенности гидродинамических процессов в межэлектродном зазоре при электрохимической обработке с импульсным током и вибрацией электрод-инструментов. *Вестник УГАТУ*, 2011, т. 15, № 4, с. 189–195.
- [15] Щербак Г.А., Трифанов И.В., Трифанова Л.И. Моделирование процесса электрохимической размерной обработки катодом, совершающим колебательное и вибрационное движение. *Вестник СибГАУ*, 2005, вып. 6, с. 262–265.
- [16] *Технические характеристики линейного двигателя 1FN3900-4NB20-0BA1*. URL: <https://mall.industry.siemens.com/mall/ru/se/Catalog/Product/1FN3900-4NB20-0BA1> (дата обращения 01 марта 2018).
- [17] Зайцев А.Н., Салахутдинов Р.М., Серавкин Н.В., Шестаков Н.А. Выбор компоновки электрохимических копировально-прошивочных станков для импульсной обработки. *Вестник УГАТУ*, 2011, т. 15, № 1, с. 76–82.

References

- [1] Klocke F., Klink A., Veselovac D., Aspinwall D.K., Sein Leung Soo, Schmidt M., Shilp M., Levy G., Kruth J.-P. Turbomachinery component manufacture by application of electro-

- chemical, electro-physical and photonic processes. *CIRPAnnals–Manufacturing Technology*, 2014, no. 63, pp. 703–726.
- [2] Mitriushin E.A., Saushkin S.B., Saushkin B.P. Sostoianieitendentsiirazvitiia stanochno go oborudovaniia dlia elektrokhimicheskoi obrabotkia aerodinamicheskikh profilei lopatochnykh mashin [State of the art and basic development trends of the equipment for electrochemical machining of the aerodynamic profiles of the blade machines]. *Trudy GOSNITI* [Proceedings of GOSNITI]. 2010, vol. 106, pp. 215–229.
- [3] Kozyrev V.V., Filimonov V.N., Krylov A.V., Fedotov O.V. Mekhatronnye moduli s vysokoi razmeshchaiushchei sposobnost'iu [Mechatronic modules with high placement capacity]. *Vysokietekhnologii — strategii 21 veka: Materialy desiatogo iubileinogo mezhdunarodnogo foruma* [High technologies – the strategy of the 21 century. Materials of the tenth anniversary international forum]. Moscow, 21–24 April 2009, Moscow, ZAO NPKF «MaVR» publ., 2009, pp. 625–629.
- [4] Kozyrev V.V. *Konstruktsiia, teorii i metodika proektirovaniia i issledovaniia planetarnykh peredach vint-gaika s rez'bovymi rolnikami i mekhatronnykh module na ikh baze* [The design, theory and methodology of designing and researching planetary screw-nut gears with threaded rollers and mechatronic modules based on them]. Vladimir, VISU publ., 2011. 238 p.
- [5] Kozyrev V.V. *Planetarnaia peredacha vint-gaika s dlinnymi rez'bovymi rolnikami* [Planetary gear screw-nut with long threaded rollers]. Patent RF no. 2341707. 2008.
- [6] Kozyrev V.V., Krylov A.V., Filimonov V.N., Kuz'min I.N., Riabov K.V., Tutubalin R.Iu. Eksperimental'nye issledovaniia rolkovintovoi peredachi RVP3K 52,8×1×60 v sostave shagovogo elektromekhanicheskogo privoda dlia stanka elektrokhimicheskoi obrabotki lopatok turbin aviatsionnykh dvigatelei [Experimental studies to a part of steps electromechanical drives for machine tools electrochemical machining of turbine blades aircraft engine]. *Trudy GOSNITI* [Proceedings of GOSNITI]. 2010, vol. 106, pp. 165–168.
- [7] Mamaev I.M., Morozov V.V., Fedotov O.V., Filimonov V.N. Harmonic analysis of the kinematic error in a planetary roller screw. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 7, pp. 515–519.
- [8] Kuz'min I.N., Novoselov E.A., Filimonov V.N. Elektromekhanicheskii privod podachi elektroda na baze rolkovintovoi peredachi RVP3K 52,8×1×60 dlia stanka elektrokhimicheskoi obrabotki lopatok aviatsionnykh turbin [Electromechanical drive for feeding the electrode on the basis of a roll screw drive PBI3K 52,8×1×60 for the machine for electrochemical treatment of blades of aircraft turbines]. *Issledovanie, proektirovanie, ispytanie i ekspluatatsiia informatsionno-izmeritel'nykh ustroistv voennoi tekhniki. Mat. Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Research, design, testing and operation of information and measuring devices of military equipment. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Vladimir, 6–8 October 2010, Moscow, RARAN publ., 2010, pp. 95–98.
- [9] Tolkov A.V., Kruglov A.V., Zhdanov A.V., Filimonov V.N., Morozov V.V. *Issledovanie dolgovechnosti silovogo rolkovintovogo mekhanizma elektromekhanicheskogo privoda postupatel'nogo dvizheniia* [Study of durability of the power roller screw mechanism of electromechanical drive translational motion]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern problems of science and education]. 2015, no. 1–1. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18516> (accessed 01 March 2018).
- [10] Terent'ev P.V., Tutubalin R.Iu., Filimonov V.N. Razrabotka i ispytaniia elektromekhanicheskogo privoda tormoza avtomobilia na baze rolkovintovoi peredachi [Development and testing of electromechanical drive of a car brake based on a roller screw drive]. *Issledovanie, proektirovanie, ispytanie i ekspluatatsiia informatsionno-izmeritel'nykh ustroistv voennoi tekhniki. Mat. Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Research, design, testing and operation of information and measuring devices of military equipment. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Vladimir, 6–8 October 2010, Moscow, RARAN publ., 2010, pp. 166–168.
- [11] Tutubalin R.Iu., Filimonov V.N. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki elektromekhanicheskogo tormoznogo privoda [Mathematical modeling of dynamics of an electromechanical brake drive]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern problems of science and education]. 2013, no. 3. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9207> (accessed 01 March 2018).

- [12] Stanok EKhS-5000 dlia impul'snoi elektrokhimicheskoi obrabotki lopatok gazoturbinykh dvigatelei i ustanovok [Machine EHS-5000 for pulsed electrochemical machining of blades of gas turbine engines and installations]. Available at: <http://topaz.md/ru/Produksiya/Elektrokhimicheskoe-oborudovanie/> (accessed 01 March 2018).
- [13] Kozhina T.D., Kurochkin A.V. Results of Investigative Tests of Gas Turbine Engine Compressor Blades Obtained by Electrochemical Machining. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127, conf. 1.
- [14] Galiev V.E., Farvazova G.I. Osobennosti gidrodinamicheskikh protsessov v mezhelektroдном zazore pri elektrokhimicheskoi obrabotke s impul'snym tokom i vibratsiei elektrod-instrumentov [Features of hydrodynamic processes in the interelectrode gap while electrochemical processing with pulse current and vibration of electrode-tools]. *Vestnik UGATU [Vestnik USATU]*. 2011, vol. 15, no. 4, pp. 189–195.
- [15] Shcherbak G.A., Trifanov I.V., Trifanova L.I. Modelirovanie protsessa elektrokhimicheskoi razmernoi obrabotki katodom, sovershaiushchim kolebatel'noe i vibratsionnoe dvizhenie [Modelling of process of electrochemical dimensional processing by the cathode making oscillatory and vibrating movements]. *Vestnik SibGAU [Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva]*. 2005, is. 6, pp. 262–265.
- [16] *Tekhnicheski ekarakteristiki lineinogo dvigatelja 1FN3900-4NB20-0BA1* [Specifications of the linear motor 1FN3900-4NB20-0BA1]. URL: <https://mall.industry.siemens.com/mall/ru/se/Catalog/Product/1FN3900-4NB20-0BA1> (accessed 01 March 2018).
- [17] Zaitsev A.N., Salakhutdinov R.M., Seravkin N.V., Shestakov N.A. Vybor komponovki elektrokhimicheskikh kopiroval'no-proshivochnykh stankov dlia impul'snoi obrabotki [Choice of configuration of the electrochemical copy machine tools for impulse handling]. *Vestnik UGATU [Vestnik USATU]* 2011, vol. 15, no. 1, pp. 76–82.

Статья поступила в редакцию 11.04.2018

Информация об авторах

МАМАЕВ Иван Михайлович (Владимир) — инженер-исследователь кафедры «Технология машиностроения». Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Владимир, Российская Федерация, ул. Горького, д. 87, e-mail: vano_33reg@mail.ru).

ФИЛИМОНОВ Валерий Николаевич (Владимир) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Владимир, Российская Федерация, ул. Горького, д. 87, e-mail: tpm@vlsu.ru).

Information about the authors

MAMAIEV Ivan Mikhailovich (Vladimir) — Research Engineer, Department of Mechanical Engineering Technology. Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov (600000, Vladimir, Russian Federation, Gorky St., Bldg. 87, e-mail: vano_33reg@mail.ru)

FILIMONOV Valeriy Nikolaevich (Vladimir) — Candidate of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov (600000, Vladimir, Russian Federation, Gorky St., Bldg. 87, e-mail: tpm@vlsu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мамаев И.М., Филимонов В.Н. Электромеханический привод с планетарным роликвинтовым механизмом для электрохимического станка с вибрирующим электродом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 8, с. 19–27, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-19-27.

Please cite this article in English as:

Мамаев I.M., Filimonov V.N. Electromechanical Actuator with a Planetary Roller-Screw Mechanism for the Electrochemical Machine with an Oscillating Tool Electrode. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 8, pp.19–27, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-19-27.