

14. Yang T., Singhose W. Combined input shaping and feedback control for double-pendulum systems / R. Mar, A. Goyal, V. Nguyen et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 85. P. 267–277. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.08.012.

15. Duc V., Trong K. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 116. P. 310–321. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.06.056.

References

1. Xu W., Liu B., Chu J., Zhou X. An anti-swing and positioning controller for overhead cranes based on multi-sliding mode method // *Adv. Mater. Res.*, 2012. Pp. 468–471, 328–334. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.328.

2. Sorensen K., Singhose W., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes [Electronic media] // *Control Eng. Pract.*, 2007. Vol. 15. Pp. 825–837. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.03.005>.

3. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V. Analiticheskoe reshenie zadachi razgona gruza mostovym kranom s postoyannym uskoreniem pri gashenii kolebaniy gruzovogo kanata [Analytical solution of the problem of acceleration of a load by an overhead crane with constant acceleration when damping oscillations of a cargo rope] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2017. Vol. 5. No. 4. Pp. 132–135. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-132-136.

4. Singhose W., Kim D., Kenison M. Input shaping control of double-pendulum bridge crane oscillations [Electronic media] // *J. Dyn. Syst. Meas. Control – Trans. ASME*, 2008. Vol. 130. 034504–034504-7. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2907363>.

5. Vaughan J., Kim D., Singhose W. Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2010. Vol. 18. Pp. 1345–1358. DOI: 10.1109/TCST.2010.2040178.

6. Saeidi H., Naraghi M., Raie A. A neural network self-tuner based on input shapers behavior for anti-sway system of gantry cranes // *J. Vib. Control*, 2013. Vol. 19. Pp. 1936–1949. DOI: 10.1177/1077546312453065.

7. Programma vvoda dannykh. Rukovodstvo pol'zovatelya [Data input program. User's manual] [Electronic media]. URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/en/03_um_data_input_program.pdf (Accessed December 21, 2020).

8. Shesterov Yu.V. Modelirovaniye vydvizheniya sektsii teleskopicheskoi strely krana [Modeling the extension of sections of a telescopic boom of a crane] // *Innovatsionnoye razvitiye pod'emno-transportnoi tekhniki: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Innovative development of lifting and transport equipment: materials of the All-Russian scientific-practical conf.]. Bryansk: Bryansk State Technical University Publ., 2019. Pp. 55–60.

9. Kran avtomobil'nyi KS-55713-5K-1. Rukovodstvo po ekspluatatsii KS-55713-5K-1.00.000 RE [Automobile crane KS-55713-5K-1. Operating manual KS-55713-5K-1.00.000 RE] [Electronic media]. URL: <http://oakaz.ru/catalog/avtokran/KS-55713-5K-1> (Accessed August 21, 2020).

10. Reutov A.A. Dinamicheskaya model' polispasta mekhanizma pod'ema gruza: sb. nauch. tr. XII Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. «Sovremennyye instrumental'nye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii» 19–20 marta 2015. [The dynamic model of the chain hoist mechanism for lifting the load] // [Scientific works of the XII-th Intern. Scientific and Practical. Conf. "Modern instrumental systems, information technology and innovation" March 19–20, 2015]. Kursk: South-West State University, 2015. Vol. 3. Pp. 391–394.

11. Tuan L.A., Soon-Geul L., Moon S.C. Partial feedback linearization and sliding mode techniques for 2D crane control. *Trans. Inst. Meas. Control*, 2014. Vol. 36. Pp. 78–87.

12. Pai M.C. Closed-loop input shaping control of vibration in flexible structures via adaptive sliding mode control. *Shock Vib.*, 2012. Vol. 19. Pp. 221–233.

13. Maghsoudi M.J., Mohamed Z., Husain A.R., Tokhi M.O. An optimal performance control scheme for a 3D gantry crane. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2016. Vol. 66–67. Pp. 756–768.

14. Mar R., Goyal A., Nguyen V., Yang T., Singhose W. Combined input shaping and feedback control for double-pendulum systems. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2017. Vol. 85. Pp. 267–277.

15. Duc V., Trong K. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2019. Vol. 116. Pp. 310–321.

Информация об авторах

Реутов Александр Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и оборудования, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, e-mail: bgtu2012@yandex.ru

Information about the authors

Aleksandr A. Reutov – Doctor of Engineering Science, Professor, the Subdepartment of Transport and Handling Machines and Equipment, Bryansk State Technical University, Bryansk, e-mail: bgtu2012@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).32-43

УДК 621.924.93

Разработка и исследование математической модели установки гидроабразивной резки

Ш. С. Нозирзода ✉

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Российская Федерация

✉ shoni_1997@mail.ru

Резюме

В настоящее время в промышленности существуют различные методы раскроя материалов. В основном эти методы используются в заготовительном производстве. Однако появляются прогрессивные технологии, которые применяются почти во всех отраслях промышленности. Одним из таких методов является технология гидроабразивной резки. При гидроабразивной обработке не всегда удается получить нужную точность и качество изделия. Оптимизация параметров, влияющих на процесс обработки при гидроабразивной резке, для повышения качества и точности является актуальной задачей. Цель данной работы – теоретическое исследование, моделирование установки и динамических процессов гидроабразивной резки. В данной работе применен метод сравнительного анализа – метод сопоставления двух и более объектов исследования (явлений, предметов, идей, результатов и т. п.). По поставленным задачам, разработана математическая модель гидроабразивной установки, которая реализована в программном продукте MatLab. Для составленной математической модели был произведен расчет диапазона значений параметров системы. В результате теоретических исследований влияния параметров системы на вибрационные характеристики был найден вариант установки параметров, при котором наблюдались минимальные вибрации заготовки и режущей головки. В дальнейшем планируется провести модернизацию установки гидроабразивной резки как в механической части, так и в части управления. В первом случае предусматривается обеспечение жесткости системы перемещения, во втором случае будет введен контроль деформации направляющих в зависимости от зоны обработки.

Ключевые слова

гидроабразивная обработка, качество изделия, режим резки, математическая модель гидроабразивной установки, динамические процессы

Для цитирования

Нозирзода Ш.С. Разработка и исследование математической модели установки гидроабразивной резки / Ш.С. Нозирзода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 32–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).32-43

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.02.2021, поступила после рецензирования: 15.02.2021, принята к публикации: 21.02.2021

Development and research of a mathematical model of a waterjet cutting plant

Sh. S. Nozirezoda✉

Yaroslav the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod, the Russian Federation

✉ shoni_1997@mail.ru

Abstract

Currently, there are various methods of cutting materials in the industry. These methods are mainly used in blank production. But recently there appear progressive technologies that are used in almost all industries. One of these methods is the technology of waterjet cutting. With waterjet processing, it is not always possible to obtain the desired accuracy and quality of a product processed. Improving the accuracy and quality of the parts obtained by waterjet cutting, significantly reduce the cost of the manufactured part. In this regard, optimizing the parameters that affect the processing workflow in waterjet cutting in order to improve quality and accuracy is currently an urgent task. The purpose of this work is a theoretical study, modeling of the plant and dynamic processes of waterjet cutting. The method of comparative analysis is applied in this paper – the method of comparing two or more objects of research (phenomena, objects, ideas, results, etc.). According to the tasks set, a mathematical model of a waterjet cutter plant has been developed, which is implemented in the MatLAB software product. For the compiled mathematical model, the range of values of the system parameters was calculated. As a result of theoretical studies of the influence of the system parameters on the vibration characteristics, a variant of setting the parameters was identified, in which minimal vibrations of the workpiece and the cutting head were observed. In the future, it is planned to modernize the waterjet cutting unit, both in the mechanical part and in the control part. In the mechanical part of the plant, the displacement system rigidity is provided. In the control system of the plant, the guides' deformation control will be introduced depending on the processing zone.

Keywords

waterjet processing, product quality, cutting mode, mathematical model of the waterjet cutting plant, dynamic processes

For citation

Nozirezoda Sh. S. Razrabotka i issledovanie matematicheskoi modeli ustanovki gidroabrazivnoi rezki [Development and research of a mathematical model of a waterjet cutting plant]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 32–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).32-43

Article Info

Received: 12.02.2021, Revised: 15.02.2021, Accepted: 21.02.2021

Введение

В машиностроении существует много видов технологии обработки материалов. Способы технологии обработки материалов могут быть электрофизическими и электрохимическими. Это способы, которые позволяют разделить (раскроить) материалы, их достаточно большое количество.

В промышленности существуют различные методы раскроя материалов. В основном эти методы используются в заготовительном производстве. Однако появляются прогрессивные технологии, которые применяются почти во всех отраслях промышленности. Одним из таких методов является технология гидроабразивной резки. При гидроабразивной обработке не всегда удается получить нужную точность и качество изделия. Оптимизация параметров, влияющих на процесс обработки при гидроабразивной резке, для повышения качества и точности в настоящее время является актуальной задачей [1].

Главным преимуществом технологии гидроабразивной обработки заключается в том, что можно обрабатывать практически все виды материалов. Важно отметить, что гидроабразивная резка альтернатива не только механической, но и лазерной, плазменной, а также ультразвуковой резке, а в некоторых случаях она является единственно возможной.

Рабочая среда в данном процессе – вода с водородными показателями pH – нейтральная, под давлением 3–4 кг/см². Режущий инструмент на гидроабразивной установке – струя смеси рабочей среды с абразивом. В качестве абразива в данной работе применен гранатовый песок марки Mesh 80. Расход воды 5 л / мин, а расход абразива 400 г / мин.

Метод решения задачи и принятые допущения

Целью данной работы является исследование влияния жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки, и разработка математической модели.

Объектом исследования является взаимосвязь

конструктивных особенностей технологического оборудования и технологических параметров, влияющих на точность и качество обработки деталей при гидроабразивной резке.

Предмет исследования – влияние жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки.

При выполнении данной работы применялись следующие методы исследования: сравнительный анализ, моделирование, синтез, эксперимент, наблюдение, измерение, сравнение, описание.

Разработка математической модели и анализ параметров установки

В данной работе применяется метод представления процессов в системах из самих систем в переменных «вход – выход», т. е. которые реально действуют на систему. Рассматривается влияние измеряемых физических переменных, характеризующих динамические процессы. Данный метод позволяет более точно определить состояние устойчивости системы. В данной работе рассматривается теоретическое исследование и моделирование установки и динамических процессов гидроабразивной резки. Внешний вид гидроабразивной установки и ее расчетная схема приведены (рис. 1). Составленная расчетная схема описывает элементы конструкции установки.

Данная система состоит из шести компонентов массы: m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , m_5 и m_6 . В данной вибрационной системе, которая описывает гидроабразивную установку, масса m_1 – заготовка, m_2 – основание, m_6 – режущая головка, m_5 – порталная система перемещения, т. е. направляющие (балка), m_3 и m_4 – стойки. Определены параметры элементов, входящих в состав структурной схемы. Масса m_1 – заготовка ложится на установочную решетку с жесткостью C_1 и коэффициентом демпфирования h_1 . Жесткость решеток была определена экспериментальным путем. Основание стоит на 8 опорах с жесткостью C_2 (рис. 2).

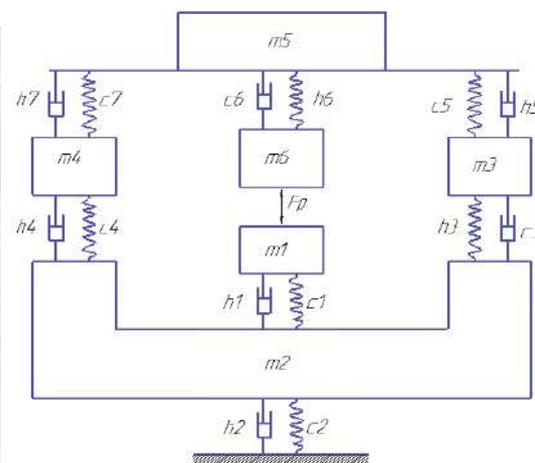


Рис. 1. Внешний вид гидроабразивной установки и расчетная схема

Fig. 1. The appearance of the waterjet plant and the design scheme

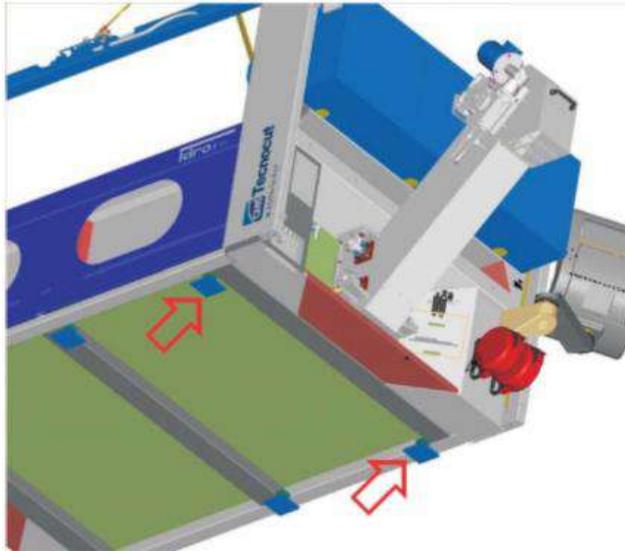


Рис. 2. Положение винтовых опор в конструкции гидроабразивной резки

Fig. 2. The position of the screw supports in the waterjet cutting structure

Приближенное значение жесткости опор винта:

$$j_0 = e d_0 \text{ (Н/мкм)}, \quad (1)$$

где $e = 5; 10; 30$ соответственно для радиально упорных, шариковых и роликовых упорных подшипников; d_0 – диаметр винта, мм [2].

Декремент затухания рассчитывается по графику затухающих колебаний. Для колебательных систем с вязким трением (сила сопротивления пропорциональна скорости движения) – физической величиной, определяющей характер колебаний, является коэффициентом демпфирования.

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}, \quad (2)$$

где c – коэффициент силы сопротивления движению; k – коэффициент упругости; m – масса подвижного груза.

При коэффициенте демпфирования меньше 1 колебательная система будет плавно затухать, чем меньше будет коэффициент, тем дольше будут длиться колебания. При коэффициенте равном 1 или больше никаких колебаний система испытывать не будет, а просто плавно будет стремиться к нулевому положению [3].

Масса m_b включает режущую головку. Режущая головка состоит из заправочной емкости и системы подачи и смешивания воды с абразивом, сопло, шланги для транспортировки воды и абразив. Между массой m_b и m_1 находится зона, где происходит обработка материалов. Тут возникает сила резания или сила резки, которая является внешним воздействием в данной вибрационной системе.

Сила резания при гидроабразивной обработки рассматривается как сила воздействия гидромониторной струи на вертикальную преграду [4], которая рассчитывается по формуле (3).

В процессе гидроабразивной обработки водяные струи оказывают гидродинамическое воздействие на обрабатываемые поверхности. Ударная сила струи, истекающей из сопла, теоретически равна

$$F_t = m \cdot \vartheta = \rho \cdot S \cdot \vartheta^2, \quad (3)$$

где F_t – сила удара струи в заготовку, Н; m – секундный расход воды, кг/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; S – площадь поперечного сечения струи, м²; ϑ – скорость вылета струи из сопла, м/с.

На достаточно близких расстояниях от сопла, где влияние трения струи о воздух и рассеивание воды в окружающую среду не столь заметны, сила воздействия струи на поверхности заготовки будет приблизительно равна теоретической величине, определяемой по уравнению (3). С дальнейшим увеличением расстояния между соплом и преградой сила воздействия струи постепенно уменьшается. Так как при гидроабразивной обработке расстояние от сопла до заготовки небольшое, применяем данную формулу для расчета силы резания.

Средняя скорость вылета струи V – средняя скорость набегания потока на тело:

$$V = \frac{G_{ж}}{S}, \quad (4)$$

где $G_{ж}$ – расход жидкости.

Расход жидкости находится по формуле:

$$G_{ж} = G_b + G_a, \quad (5)$$

где G_b – расход воды; G_a – расход абразива; S – площадь миделева сечения (площадь проекции тела на плоскость, нормальную к вектору скорости воды) –

$$S = \pi \cdot R^2, \quad (6)$$

где R радиус сопла.

Плотность смеси воды и абразива равна:

$$\rho_{ж} = \frac{m_b + m_a}{\frac{m_b}{\rho_b} + \frac{m_a}{\rho_a}}, \quad (7)$$

где m_b – масса воды, m_a – масса абразива, ρ_b – плотность воды, ρ_a – плотность абразива.

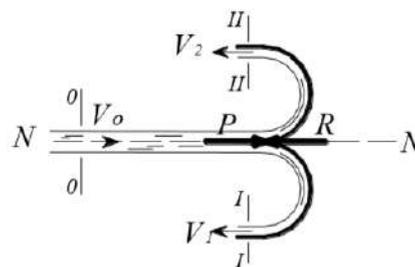


Рис. 3. Силы давления струи на криволинейную симметричную преграду

Fig. 3. Forces of the pressure of the jet on a curved symmetrical barrier

По данной схеме, когда струи направлены прямо на поверхность заготовки (рис. 3), сила давления P достигает максимума. Если струя будет направлена под углом, то в формуле вместо 2 будет соответствующий коэффициент [5]. Данный коэффициент

зависит от синуса угла наклона струи.

Сила резания в двух случаях отличается. В случае устойчивого резания величина силы резания будет уменьшаться, и зависит она от физико-механических свойств обрабатываемого материала, колебания давления струи, равномерности подачи абразива и сопла, формы зерна, режима, течения воды, трения воды и абразива и многих других факторов. Закон изменения силы резания в процессе обработки (рис. 4) необходимо определить экспериментальным путем.

Гидроабразивную струю можно рассматривать как твердый режущий абразивный инструмент, который имеет определенный диаметр. В формировании поверхности при гидроабразивной обработке можно заметить, что участвует лишь небольшой сектор режущей струи (рис. 5).

В большинстве работ, посвященных изучению зависимости длины начального участка, струи от исходных параметров, приводятся различные аналитические зависимости, в которых влияние исходных параметров струи на безразмерную длину начального участка l_n/d_0 выражается при помощи числа Рейнольдса Re . Эти зависимости имеют одно общее свойство: выраженная в них функциональная связь

$l_n/d_0 = f(Re)$ отражает постепенное уменьшение безразмерной длины начального участка с увеличением числа Re в пределах $(1,0-3,0) \cdot 10^6$.

Жесткость в любой конструкции считается важным параметром, особенно при шарико-винтовых передачах. К жесткости передачи можно отнести жесткость пары «винт – гайка», дорожек качения с шариками и жесткость самого винта. Считается, что жесткость дорожек качения и шариков можно объединить в общую жесткость, характеризующую гайку. Это значение представлено в таблицах как основная характеристика гаек.

Для определения коэффициента демпфирования передача «винт – гайка» рассматривается в виде спирали, которая сделана из проволоки с круговым сечением. Если рассматривать деформацию пружины как совокупность элементарных сдвигов в ее объеме под воздействием сил упругости, то коэффициент упругости можно вычислить при помощи формулы:

$$k = \frac{r^4 * G}{4 * R^3 * n}, \quad (8)$$

где R – радиус пружины, n – количество витков в пружине, r – радиус проволоки, G – модуль сдвига (постоянная, которая зависит от материала).

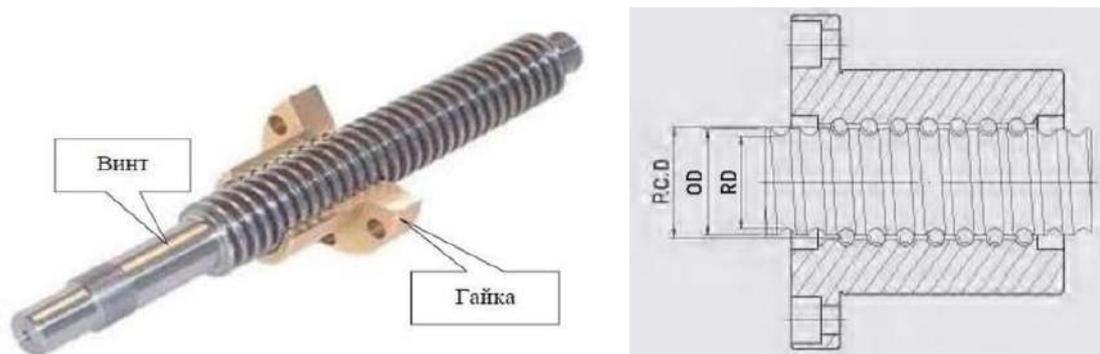


Рис. 4. Шарико-винтовая передача

Fig. 4. Ball-screw transmission

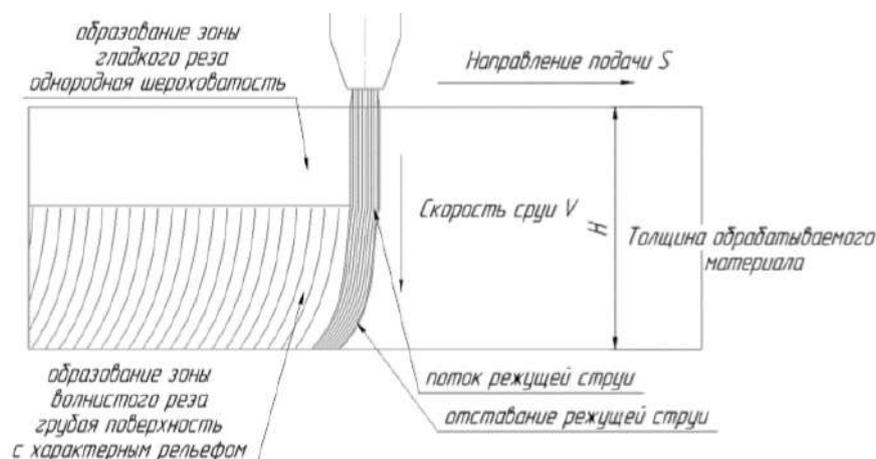


Рис. 5. Процесс обработки при гидроабразивной резки

Fig. 5. The treatment process in waterjet cutting

$$a_1 = \frac{F_p - c_1 \cdot (X_1 - X_2) - h_1 \cdot (V_1 - V_2)}{m_1}, \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{h_1 \cdot (V_1 - V_2) + c_1 \cdot (X_1 - X_2) + c \cdot (X_3 - X_2) + h_3 \cdot (V_3 - V_2) + c_4 \cdot (X_4 - X_2) + h_4 \cdot (V_4 - V_2) - h_2 \cdot V_2 - c_2 \cdot X_2}{m_2}, \quad (10)$$

$$a_3 = \frac{c_5 \cdot (X_5 - X_3) + h_5 \cdot (V_5 - V_3) - c_3 \cdot (X_3 - X_2) - h_3 \cdot (V_3 - V_2)}{m_3}, \quad (11)$$

$$a_4 = \frac{c_7 \cdot (X_5 - X_4) + h_7 \cdot (V_5 - V_4) - c_4 \cdot (X_4 - X_2) - h_4 \cdot (V_4 - V_2)}{m_4}, \quad (12)$$

$$a_5 = \frac{c_6 \cdot (X_6 - X_5) + h_6 \cdot (V_6 - V_5) - c_5 \cdot (X_5 - X_3) - h_5 \cdot (V_5 - V_3) - c_7 \cdot (X_5 - X_4) - h_7 \cdot (V_5 - V_4)}{m_5}, \quad (13)$$

$$a_6 = \frac{F_p - c_6 \cdot (X_6 - X_5) - h_6 \cdot (V_6 - V_5)}{m_6}. \quad (14)$$

Масса m_5 является направляющей, на которой установлена режущая головка. Масса m_5 включает в себя массу балки и кожух для защиты. Массы m_3 и m_4 являются стойками, на которых установлена балка, а стойки в свою очередь установлены на основании.

Для массы m_1 , которая является в данной системе заготовкой, сила резания действует как внешние воздействия. Остальные силы – силы упругости

установочной решетки с жесткостью C_1 , силы демпфирования и инерции тел m_1 будут обратной связью направлены в противоположные внешние силы. Величина силы F_{c1} будет равна произведению коэффициента жесткости C_1 и разности между перемещением тел m_1 и m_2 , так как решетка с жесткостью C_1 находится между этими телами.

Расставлены силы, действующие на системы. Составлен баланс сил каждого тела. Исходя из ба-

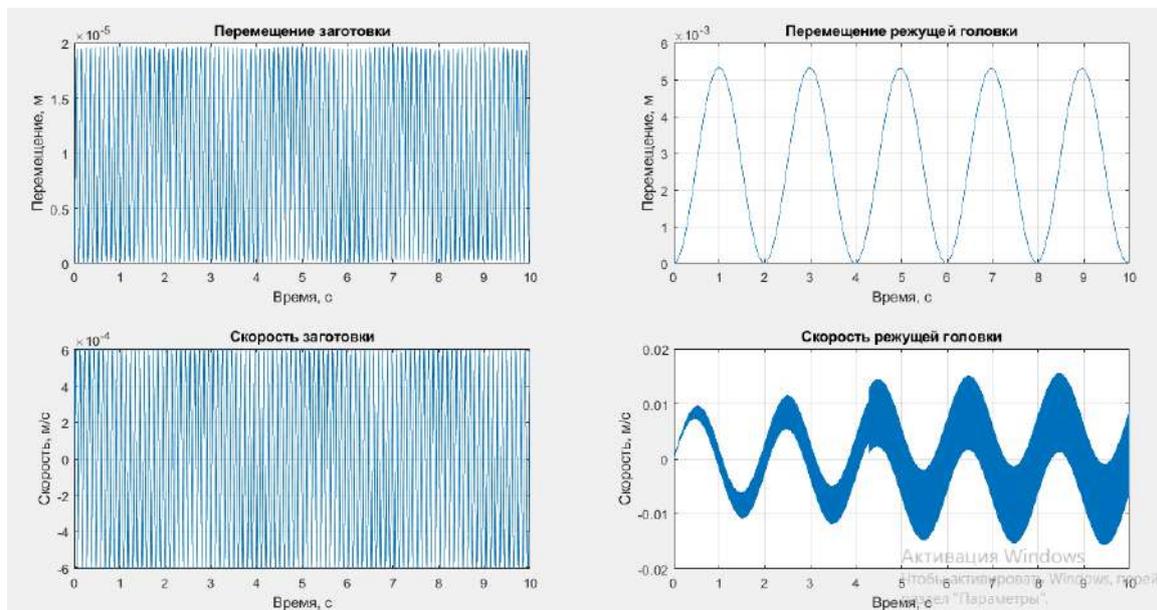


Рис. 6. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при оптимальных вариантах параметров

Fig. 6. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head with optimal variants of parameters

ланса каждого тела, получена математическая модель в виде следующих систем уравнений:

Полученная математическая модель задается в среде MatLab. Таким образом, решаются данные уравнения в среде MatLab с помощью, составленной в этой же среде программы.

В данной вибрационной системе рассматриваются колебания и скорости перемещения заготовки $m1$ и режущие головки $m6$. Так как именно эти параметры влияют на точность и качество обработки. Исходя из разработанной математической модели и полученных графиков можно отметить, что на колебания заготовки с массой $m1$ влияет жесткость установочной платформы $C1$, а на амплитуды и скорости перемещения режущей головки оказывает влияние жесткость передачи «винт – гайка» $C6$. Но с другой стороны в данной вибрационной системе большое влияние оказывает жесткость направляющих $C5$ и $C7$. Данные параметры влияют на поведение системы в целом. По проведенным анализа получены графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при оптимальных вариантах параметров (рис. 6).

В данной работе также были выявлены амплитудно-частотные характеристики вибрационной системы. Для определения амплитудно-фазовых частотных характеристик системы необходимо найти передаточную функцию, которая равна

$$W(p) = \frac{\text{вых.}}{\text{вход.}} = \frac{Fp}{X_1}, \quad (15)$$

$$W(p) = \frac{\text{вых.}}{\text{вход.}} = \frac{Fp}{X_6}. \quad (16)$$

В данной системе передаточная функция выражается двумя уравнениями. Это связано с тем, что сила резания как внешнее воздействие оказывает свое влияние сразу на заготовку с массой $m1$ и на режущую головку с массой $m6$. Полученные амплитудно-частотные характеристики системы показали, что она является устойчивой.

Исследование математической модели

Использование моделей и моделирования при исследованиях динамических систем дает возможность решить сложные задачи проектирования технологического оборудования [6-9]. Моделирование с помощью программного обеспечения MatLab имеет свои недостатки по сравнению Simulink. Simulink дает возможность наглядно и схематично представить математическую модель, в среде Simulink также можно получить более точные результаты.

В данной работе были определены оптимальные параметры для гидроабразивной установки, проведен спектральный анализ системы, выявлены амплитудно-частотные характеристики для заготовки и режущей головки.

Далее приведены графики перемещения заготовки и режущей головки без изменения параметров системы соответственно 50, 100 и 500 кг (рис. 7–9).

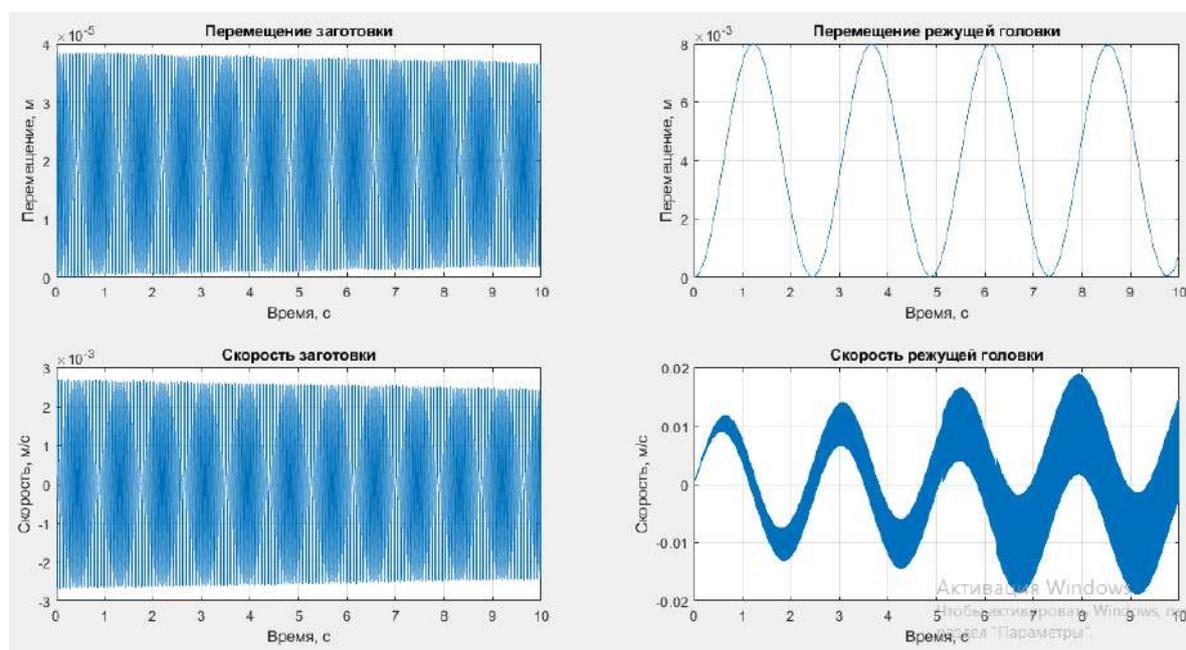


Рис. 7. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 50 кг
Fig. 7. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head at a weight of 50 kg

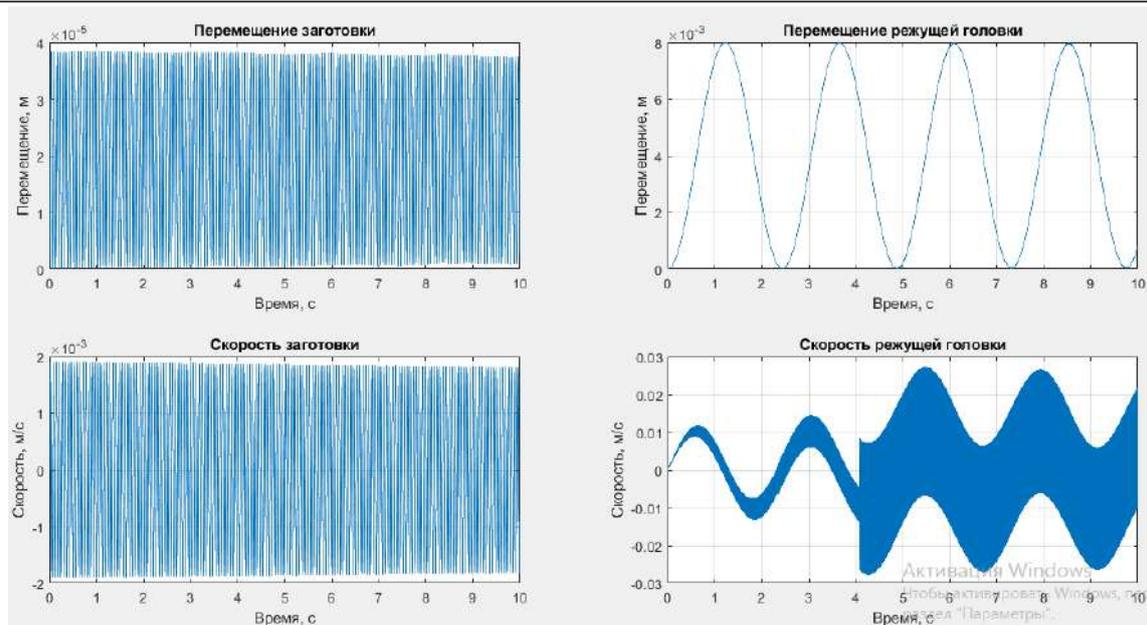


Рис. 8. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 100 кг
Fig. 8. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head at a weight of 100 kg

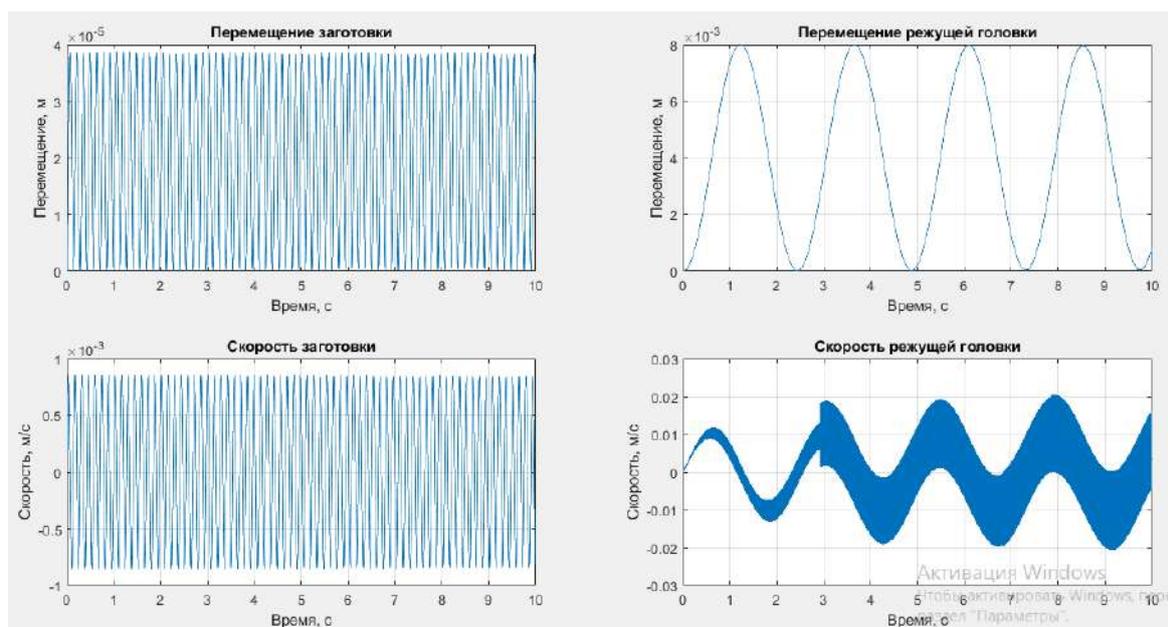


Рис. 9. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 500 кг
Fig. 9. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head at a weight of 500 kg

На амплитуду колебания заготовки и режущей головки, которая в данной системе должна быть минимальной, влияет много факторов [10-17]. Важно отслеживать колебания режущей головки в данной установке. Величина амплитуды ее колебания напрямую влияет на точность обработки. При анализе параметров были рассмотрены жесткости: передачи «винт – гайка», направляющей и установочной платформы. Сила резания рассматривается как величина постоянная, она зависит от скорости выле-

та струи, давления и плотности смеси воды с абразивом. Изменяя данные параметры, сила резания может меняться в пределах малых значений.

Масса самой заготовки в данной системе также играет очень важную роль. Некоторые заготовки на установочной платформе при гидроабразивной обработке не закрепляются, т. е. в таком случае жесткость установочной платформы остается неизменной. Однако если масса заготовки недостаточная и вызывает большие колебания в системе, то необходимо закреп-

пить заготовку на установочной платформе. В данной ситуации жесткость установочной платформы в разы увеличивается. С целью изучения влияния массы заготовки на колебания самой заготовки в данной системе были рассмотрены разные заготовки на устано-

вочной платформе. Далее приведены графики перемещения и скорости первого и четвертого тела при оптимальных вариантах параметров при массе заготовки соответственно 50, 100 и 500 кг (рис. 10–12).

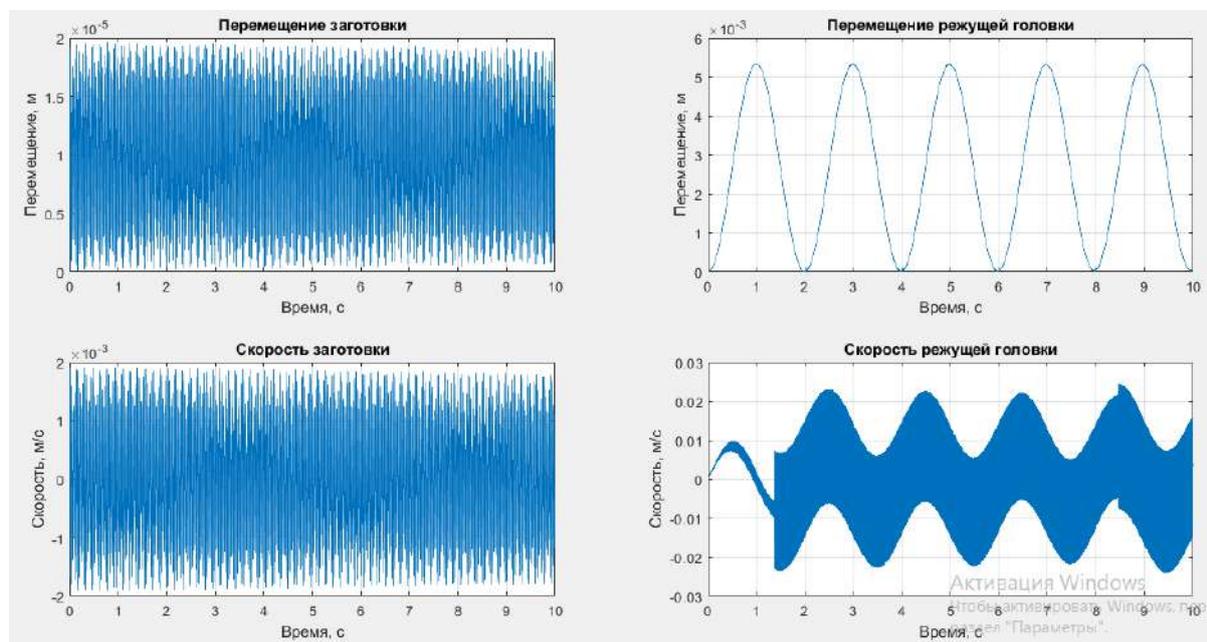


Рис. 10. Графики перемещения и скорости заготовки режущей головки при оптимальных вариантах параметров при массе 50 кг

Fig. 10. Graphs of the movement and speed of the cutting head workpiece with optimal variants of parameters at a weight of 50 kg

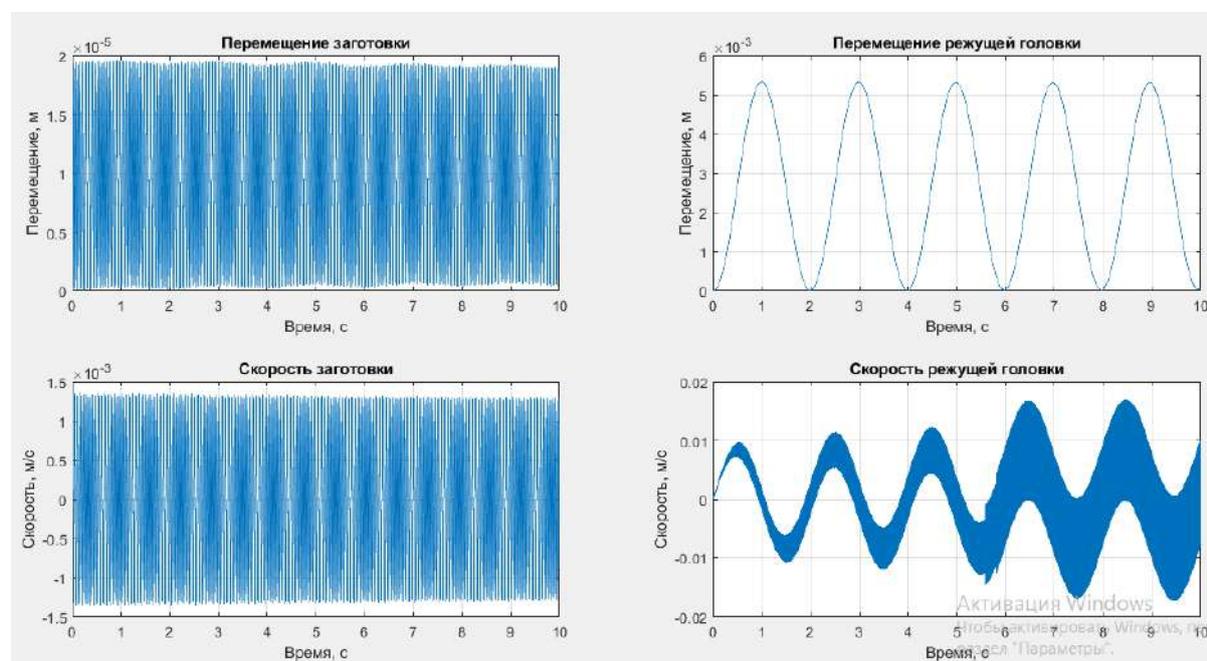


Рис. 11. Графики перемещения и скорости заготовки, режущей головки при оптимальных вариантах параметров и массе 100 кг

Fig. 11. Graphs of the movement and speed of the workpiece, the cutting head with optimal variants of parameters and a weight of 100 kg

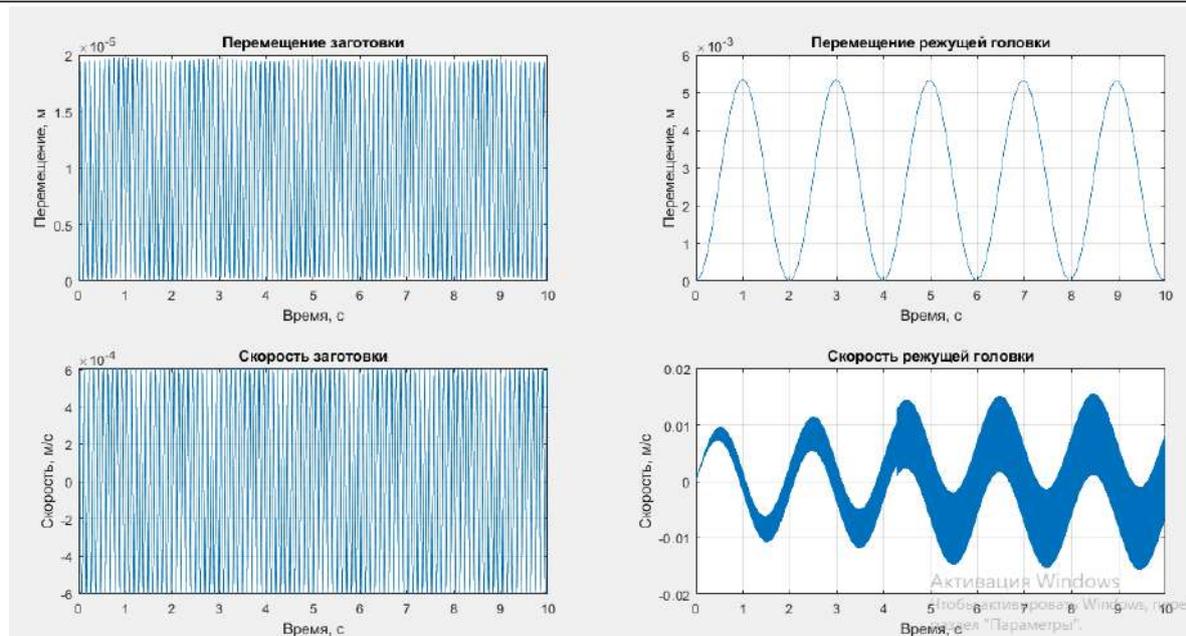


Рис. 12. Графики перемещения и скорости заготовки, режущей головки при оптимальных вариантах параметров при массе 500 кг

Fig. 12. Graphs of the movement and speed of the workpiece, the cutting head with optimal variants of parameters at a weight of 500 kg

Заключение

Таким образом, увеличение жесткости направляющей, установочной решетки и изменение конструкции режущей головки приведет к уменьшению колебания заготовки на установочной платформе и режущей головке. Именно оптимизация параметров данных элементов в конструкции гидроабразивной установки приведет к повышению точности и качества обработки.

Одним из важнейших параметров обработки при гидроабразивной резке является давление струи, от которого зависят многие другие параметры, например, средняя скорость струи. Исходя из основы гидродинамики, можно отметить, что чем выше давление струи, тем больше будет скорость струи, в результате чего создается кинетическая энергия и обрабатывается слой материала, но когда струя разре-

зает слой материала, кинетическая энергия потихоньку уменьшается, и в результате этого происходит отклонение и изменяется качество обработки.

Рассматривая процесс формирования поверхности заготовки и качество обработки в разных зонах резания при разных режимах обработки, можно отметить, что на качество поверхности заготовки при гидроабразивной резке влияет давление струи, скорость подачи струи и местоположение заготовки на установочной платформе. Увеличение скорости подачи струи в зависимости от зоны резания на установочной платформе приводит к улучшению качества обработки. Также можно отметить, что изменение этих параметров существенно влияет на ресурс режущей головки.

Список литературы

1. Моргунов Ю.А., Федотов А.А., Швычков Д.В. Применение гидроабразивной резки при обработке сложнопрофильных поверхностей деталей // Главный механик. 2010. № 7. С. 24–27.
2. Гидростатическая передача винт-гайка // helpiks.org : сайт. URL: <https://helpiks.org/5-97348.html> (дата обращения: 24.09.2020).
3. Гидроабразивная резка материалов // Технологии Точного Моделирования : сайт. URL: <https://ttm66.ru/news/istoriya-gidroabrazivnoj-rezki> (дата обращения: 24.04.2019).
4. Голиков В.А., Анфиногентов В.В. Расчетная схема определения геометрических и гидродинамических характеристик водяных струй моечных машинок танкеров // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. Одесса : ОНМА, 2011. Вып. 28. 162 с.
5. Старцев В.А. Физико-механическое обоснование параметров гидромониторной разработки россыпей направленным бурением скважин : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 119 с.
6. Барсуков Г.В. Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования состояний технологической системы : дис. ... д-ра техн. наук. Орел, 2006. 411 с.
7. Барсуков Г.В. Исследование погрешности формы при резании листовых материалов гидроабразивной струей //

Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. 2003. С. 449–455.

8. Шпилев В.В. Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов обработки и параметров струи рабочей жидкости : дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2012. 147 с.

9. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения : учебник для вузов / В.В. Кузьмин и др. М. : Высшая школа, 2008. 279 с.

10. Керамглас : офиц. сайт. URL: <https://www.garnet-abrasive.ru/> (дата обращения: 25.09.2020).

11. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 318 с.

12. Harris I. D. Abrasive Water Jet Cutting and its Applications at the Welding Institute // *Welding Institute Research Bulletin*. 1988. Vol. 19. P. 42–49.

13. Бреннер В.А., Пушкарев А.Е., Головин К.А. Исследование гидроабразивного разрушения горных пород // *Экология и безопасность жизнедеятельности*. Изв. Тул. гос. ун-та. 1997. Вып. 3. С. 94–97.

14. Гидрорезание судостроительных материалов / Р.А. Тихомиров, В.Ф. Бабнин, Е.Н. Петухов и др. Л. : Судостроение, 1987. 164 с.

15. Кишко А.А., Верченко А.В. Возможности уменьшения брака при гидроабразивной резке фасонных деталей // *Высокие технологии в машиностроении : материалы Всерос. науч.-техн. интернет-конф. / отв. редактор А.Ф. Денисенко*. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. С. 30–32.

16. Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Михеев А.В. Повышение качества гидроабразивного резания деталей из стекло-текстолита на основе предварительного диагностирования состояния обрабатываемого материала // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2014. № 5 (307). С. 65–71.

17. Разработка технологических рекомендаций по гидроабразивному резанию стеклотекстолита / Т.А. Журавлева, Г.В. Барсуков, О.А. Короткий и др. // *Радиопрмышленность*. 2014. № 4. С. 153–165.

References

1. Morgunov Yu.A., Fedotov A.A., Shvychkov D.V. Primeneniye gidroabrazivnoi rezki pri obrabotke slozhnoprofil'nykh poverkhnostei detalei [Application of waterjet cutting in the processing of complex-profile surfaces of parts]. MSTU "MAMI" Publ.

2. Org Kh. Gidrostatischeckaya peredacha vint-gaika [Hydrostatic screw-nut transmission] [Electronic media]. URL: <https://helpiks.org/5-97348.html> (Accessed: September 24, 2020).

3. Tekhnologii tochnogo modelirovaniya. Gidroabrazivnaya rezka. Istoriya gidroabrazivnoi rezki. [Technologies of precise modeling. Hydroabrasive cutting. History of hydroabrasive cutting] [Electronic media]. URL: <https://ttm66.ru/news/istoriya-gidroabrazivnoj-rezki> (Accessed April 24, 2019).

4. Golikov V.A., Anfinogentov V.V. Raschyotnaya skhema opredeleniya geometricheskikh i gidrodinamicheskikh kharakteristik vodyanykh strui moechnykh mashinok tankerov [Design scheme for determining the geometric and hydrodynamic characteristics of water jets of tanker washing machines]. *Sudovye energeticheskie ustanovki: nauchno-tekhnicheskii sbornik*. [Ship power plants: scientific and technical collection], Issue 28. Odessa: ONMA Publ., 2011. 162 p.

5. Startsev V.A. Fiziko-mekhanicheskoe obosnovanie parametrov gidromonitornoj razrabotki rossypei napravlenym bureniem skvazhin. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Physical and mechanical justification of parameters of hydromonitor development of placers by directional drilling of wells. The Ph.D. (Engineering) diss.]. Ekaterinburg, 2018. 119 p.

6. Barsukov G.V. Povysheniye effektivnosti gidroabrazivnogo rezaniya na osnove diskretnogo regulirovaniya sostoyanii tekhnologicheskoi sistemy. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Improving the efficiency of waterjet cutting on the basis of discrete control of the technological system states. D. Sc. (Engineering) diss.]. Orel, 2006, 411 p.

7. Barsukov G.V. Issledovanie pogreshnosti formy pri rezanii listovykh materialov gidroabrazivnoi struyoi «Tekhnologiya –2003» [Investigation of the shape error when cutting sheet materials with a hydroabrasive jet]. *Sb. tr. Mezhdunar. nauch.- tekhn. konf. «Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhnologii mashinostroeniya» [Proc. of the International sci. and tech. conf. "Fundamental and applied problems of mechanical engineering technology". "Technology –2003"]*, 2003. Pp. 449–455.

8. Shpilev V.V. Povysheniye effektivnosti protsessa gidroabrazivnoi rezki listovykh detalei putem optimizatsii rezhimov obrabotki i parametrov strui rabochei zhidkosti: dis. kand. tekhn. nauk: 05.02.08 [Improving the efficiency of the process of waterjet cutting of sheet parts by optimizing the processing modes and parameters of the working fluid jet: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.02.08]. Saratov, 2012. 147 p.

9. Kuzmin V.V. et al. Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov sborki i mekhanicheskoi obrabotki izdelii mashinostroeniya: uchebnik dlya vuzov [Mathematical modeling of technological processes of assembly and mechanical processing of mechanical engineering products: textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2008. 279 p.

10. Ofitsial'nyi sait kompanii OOO «Keramglas» [The official website of the company "Keramglas" OOO] [Electronic media]. URL: <https://www.garnet-abrasive.ru/> (Accessed September 25, 2020).

11. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Golovin K.A. [Progressive technologies of hydrojet cutting of materials]. Tula: TuSU Publishing House, 2009. 318 p.

12. Harris I.D. Abrasive Water Jet Cutting and its Applications at the Welding Institute. *Welding Institute Research Bulletin*, Vol. 19, February, 1988. Pp. 42–49.

13. Brenner V.A., Pushkarev A.E., Golovin K.A. Issledovanie gidroabrazivnogo razrusheniya gornykh porod [Investigation of hydroabrasive destruction of rocks. Ecology and life safety]. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta], Iss. 3. Tula, 1997. Pp. 94–97.

14. Tikhomirov R.A., Banin V.F., Petukhov E.N., Starikov I.D. et al. Gidrorezanie sudostroitel'nykh materialov [Hydraulic cutting of shipbuilding materials]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1987. 164 p.

15. Kishko A.A., Marchenko A.V. Vozmozhnosti umen'sheniya braka pri gidroabrazivnoi rezke fazonnykh detalei [Possibilities of reduction of defects in abrasive waterjet cutting of formed parts]. *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii [High technologies in mechanical engineering: materials of the all-Russian scientific and technical Internet conference]*. In Denisenko A. F. (exec. ed.) Samara: Samara State Technical University Publ., 2016. Pp. 30–32.

16. Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Mikheev A.V. Povyshenie kachestva gidroabrazivnogo rezaniya detalei iz steklotekstolita na osnove predvaritel'nogo diagnostirovaniya sostoyaniya obrabatyvaemogo materiala [Improving the quality of waterjet cutting of parts made of glass fiber based on preliminary diagnostics of the state of the processed material] // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology]*, 2014. No. 5 (307). Pp. 65–71.

17. Zhuravleva T.A., Barsukov G.V., Korotkii O.A., Sidorov V.B. Razrabotka tekhnologicheskikh rekomendatsii po gidroabrazivnomu rezaniyu steklotekstolita [Development of technological recommendations for hydroabrasive cutting of glass fiber] // *Radiopromyshlennost' [Radio industry (Russia)]*, 2014. No. 4. Pp. 153–165.

Информация об авторах

Нозирзода Шодмон Салохидин – аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, e-mail: shoni_1997@mail.ru

Information about the authors

Shodmon S. Nozirzoda – Ph.D. student of the Subdepartment of Industrial Technologies, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: shoni_1997@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

УДК 621.83.06

Экспериментальная оценка тепловых и шумовых характеристик редуктора со сферической роликовой передачей

Е. С. Лустенкова✉

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь

✉ fittsova@gmail.com

Резюме

Передачи с промежуточными телами качения являются инновационной разработкой в области механических приводных систем. Они позволяют реализовывать широкий диапазон передаточных отношений при малых габаритах и массе. Передачи имеют компоновочные преимущества благодаря соосности валов и осевой симметрии основных деталей. Исследуемая сферическая роликовая передача содержит ведущий вал с наклонным участком (кривошипом), на который устанавливается сателлит. В процессе работы передачи сателлит совершает сферическое движение. Один ряд роликов, установленных на сателлите, обкатывается по неподвижной беговой дорожке, образованной сферическими кулачками, закрепленными в корпусе, второй ряд взаимодействует с беговой дорожкой ведомого сферического кулачка, вынуждая его и ведомый вал вращаться с уменьшенной скоростью. В статье приведена кинематическая схема сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом, рассмотрен принцип ее работы. Представлена конструкция экспериментального образца редуктора с передаточным отношением 44, рассмотрена конструкция лабораторного стенда, описаны аппаратные средства и методика испытаний. Приведены результаты экспериментальных исследований тепловых и шумовых характеристик редуктора в зависимости от кинематических и силовых факторов. Данные испытания позволили обнаружить, что термически наиболее нагруженным узлом передачи является ведущий вал с установленным на нем сателлитом, что требует дальнейшего совершенствования его конструкции. Выявлено, что при определенной частоте вращения сферические роликовые передачи по уровню шума сопоставимы с серийно изготавливаемыми зубчатыми мотор-редукторами.

Ключевые слова

сферическая роликовая передача, редуктор, тело качения, тепловая характеристика, шумовая характеристика, сателлит

Для цитирования

Лустенкова Е. С. Экспериментальная оценка тепловых и шумовых характеристик редуктора со сферической роликовой передачей / Е. С. Лустенкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 43–50. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.02.2021, поступила после рецензирования: 20.02.2021, принята к публикации: 25.02.2021

Experimental estimation of thermal and noise characteristics of a speed reducer with a spherical roller transmission