

Редакционная

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Савин Л.А. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегии:

Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Запонец Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузичкин О.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузнец В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ли Шенбо, канд. техн. наук, доц. (Китай)

Мирсалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.

(Азербайджан)

Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, доц. (Россия)

Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.

(Беларусь)

Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный секретарь:

Тюхтя А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, г. Орел, ул. Московская, 34

+7(920)2806645, +7(906)6639898

http://oreluniver.ru

E-mail: tiostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по
надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС77-67029
от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу

«Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018

Содержание

Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

Коробко В.И., Черняев А.А., Шляхов С.В. Тюрин В.О. Взаимосвязь максимального прогиба и
основной частоты колебаний пластинок..... 3

Машиностроительные технологии и оборудование

Анисимов Р.В., Овсянникова И.В., Тарапанов А.С. Повышение точности обработки
периодических профилей при нейросетевом управлении..... 9

Аблаев А.Р., Аблаев Р.Р. Методика расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления
в трубной полости судовых охладителей..... 15

Лавриненко В.Ю., Куров А.В., Яковлева О.В. Исследование процесса удара при осадке
заготовок с помощью программы анализа движения motion analyze@bmstu..... 23

Корнеева Е.Н., Гордон В.А., Корнеев Ю.С. Задача профилирования регулирующего диска
пускозащитной муфты..... 29

Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Винокуров А.Ю. Исследование абразивной способности
искусственных и природных абразивов, обеспечивающих производительность
гидроабразивного резания..... 34

Канатников Н.В., Харламов Г.А., Пащенко А.С., Гуков А.А. Методика гибридного
прогностического моделирования лезвийной обработки зубчатых колес стандартного и
специального профиля..... 41

Машиноведение и мехатроника

Сытин А.В., Родичев А.Ю., Кузавка А.В. Особенности проектирования мехатронной
установки для испытания лепестковых газодинамических подшипников..... 50

Шеховцева Т.В., Шеховцева Е.В. Методика проектирования планетарно-
дифференциального редуктора..... 59

Ситникова М.А., Буковский А.И. Аппаратное обеспечение для роботизированной числовой
линии..... 70

Частухин А.В. Применение РТК для изготовления и восстановления изделий методом
лазерного селективного спекания..... 75

Сливинский Е.В., Радин С.Ю., Гридчина И.Н. Исследование пространственных колебаний
двухзвенного автопоезда..... 83

Крашмалева Г.Н. Калибровка инструмента промышленных роботов..... 93

Божанов А.А., Трубин А.С., Баранов Ю.Н. К определению некоторых параметров ленточных
конвейеров..... 98

Поляков Р.Н., Бондаренко М.Э. Разработка математической модели расчета главного
вектора реакции лепесткового газодинамического подшипника с активным управлением..... 103

Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Инженерный анализ и новые технологии в методе
конечных элементов..... 109

Приборы, биотехнические системы и технологии

Яцун С.Ф., Барыбин А.А., Лушиников Б.В., Политов Е.Н. Моделирование рыбоподобного
робота в среде Matlab/ Simulink/Simmechanics..... 121

Юльметова О.С. Формализация концептуальной модели процесса повышения точности
электростатического гироскопа..... 132

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Ефремова Е.С. Имитация воздушных сигналов при наземной отработке и контроле
функционирования комплексов бортового оборудования самолета..... 139

Кузнецов О.И., Солдаткин В.М. Метрологический анализ автоматизированной системы
контроля и предупреждения опасных режимов эксплуатации вертолета..... 147

Editorial Committee

Editor-in-chief

Radchenko S.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief Assistants:

Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Savin L.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Shorkin V.S. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.

Member of editorial board:

Bukhach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zapomel Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

Zubchaninov V.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kopylov Yu.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kuzichkin O.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kukhar V.D. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Lavrynenko V.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Li Shenbo. Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Azerbaijan)

Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzov V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Soldatkin V.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.I. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Belarus)

Stepanov Yu.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Executive secretary:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030 Orel, Moskovskaya ul., 34
+7(920)2806645, +7(906)6639898
http://oreluniver.ru
E-mail: tiostu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the
«Pressa Rossii» 29504

© Orel State University, 2018

Contents

Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

- Korobko A.V., Chernyaev A.A., Shlyakhov S.V., Tyurin V.O. The relationship of the maximum deflection and fundamental frequency of oscillations of the plates 3

Machine-building technologies and equipment

- Anisimov R.V., Ovsyanikova I.V., Tarapanov A.S. Increase of precision of processing of periodic profiles under the management of a neural network 9
- Ablaev A.R., Ablaev R.R. Method of calculation of heat emission and hydraulic resistance in pipe cavity of ship coolers 15
- Lavrinenko V.Yu., Kurov A.V., Yakovleva O.V. Research of impact process during upsetting of blanks by using of software motion analyze@bmstu 23
- Korneeva E.N., Gordon V.A., Korneev Yu.S. Problem of processing the adjustment disk of the start-up protection clutch 29
- Barsukov G.V., Kozhus O.G., Vinokurov A.Yu. Investigation of abrasive ability of artificial and natural abrasives providing the productivity of abrasive waterjet cutting 34
- Kanatnikov N.V., Harlamov G.A., Pashmentova A.S., Gukov A.A. Methodology of hybrid predictional modeling of blade processing of gear wheels of standard and special profile 41

Machine Science and Mechatronics

- Sytin A.V., Rodichev A.Yu., Kuzavka A.V. Peculiarities of design of a mechatronic test rig to study foil gas dynamic bearings 50
- Shehovtseva T.V., Shehovtseva E.V. The design metod of the planetary-differential drive 59
- Sitnikova M.A., Bukovsky A.I. Hardware support for the robotized numeric line 70
- Chastukhin A.V. Application of industrial robots for manufacturing and repairing by selective laser sintering method 75
- Slivinskiy E.V., Radin S.Y., Gridchina I.N. Research of spatial fluctuations two-unit road train 83
- Krakhmalev G.N. Calibrating the tool of industrial robots 93
- Bozhanov A.A., Trubin A.S., Baranov Yu.N. To determining some parameters belt conveyors 98
- Polyakov R.N., Bondarenko M.E. Development of the mathematical model of calculation of the main vector reaction of a lipestic gazodynamic bearing with active control 103
- Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrchev V.V. Engineering analysis and new technologies in the finite element method 109

Devices, biotechnical systems and technologies

- Yatsun S.F., Barybin A.A., Lushnikov B.V., Politov E.N. Simulation of fish-like robot in the Matlab / Simulink / Simmechanics 121
- Yulmetova O.S. Formalization of the concentual model for the process of increasing the accuracy of the electrostatic gyroscope 132

Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

- Efremova E.S. Simulating of air data signals during ground testing and controlling function of avionics onboard systems of airplane 139
- Kuznetsov O.I., Soldatkin V.M. Metrological analysis of the automated system of control and prevention of dangerous operation modes of the helicopter 147

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

УДК 624.012.45

В.И. КОРОБКО, А.А. ЧЕРНЯЕВ, С.В. ШЛЯХОВ, В.О. ТЮРИН

ВЗАИМОСВЯЗЬ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА И ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНОК

Аннотация. В статье исследуется вопрос о взаимосвязи максимального прогиба и основной частоты колебаний пластинок. Представляются графическая и аналитическая зависимости между вышеуказанными параметрами для пластинок с различными граничными условиями (шарнирное опирание по всему контуру и жесткое защемление). Выводится аппроксимирующая функция произведения максимального прогиба на квадрат основной частоты колебаний пластинок в зависимости от отношения внутреннего и внешнего конформных радиусов, позволяющая получить элементарные формулы для определения значений максимального прогиба по основной частоте колебаний и наоборот – основной частоте колебаний по значению максимального прогиба.

Ключевые слова: упругие пластинки в форме многоугольников, описанных вокруг окружности, жесткое защемление, шарнирное опирание, максимальный прогиб пластинок, основная частота колебаний, отношение конформных радиусов.

Введение.

Пластинки в форме треугольников, ромбов, правильных n -угольников (многоугольники, описанные вокруг окружности) находят широкое применение в качестве несущих элементов конструкций при строительстве зданий и сооружений (в настилах мостов, автомобильных развязок, продольная ось которых наклонна по отношению к препятствию и др.), в гидротехнических сооружениях, а также в специальном машиностроении (судо-, авиа- и ракетостроении). Проблема обеспечения эксплуатационной надежности несущих конструкций требует проведения различных расчетов, среди которых одним из основных является расчет жесткости конструкций под действием внешней нагрузки и определение их основной частоты колебаний в ненагруженном состоянии для проведения динамических расчетов. Точных решений задач поперечного изгиба и свободных колебаний пластинок в научной и справочной литературе приводится немного [1, 2], известны лишь решения для прямоугольных и круглых пластинок при простейших видах загрузки и опирания по контуру. В более сложных случаях используются приближенные методы, в основном численные. Однако решения задач теории пластинок с помощью численных методов обладают рядом недостатков, среди которых основным является сложность анализа полученных результатов и распространения этих результатов на семейство пластинок определенной формы с определенными граничными условиями. Поэтому в строительной механике по-прежнему придаётся большое значение разработке, развитию и совершенствованию простых аналитических приближённых методов решения задач теории пластинок.

Основная часть

Лишенными указанного недостатка являются геометрические методы, интенсивно развивающиеся в последние два десятилетия. С историей их развития, физической и геометрической сущностью можно познакомиться, например, в монографии [3]. Эти методы получил существенное развитие в работах ученых и аспирантов Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева [6–13]. Они широко используются в случаях, когда необходимо оперативно получить оценку искомой физической характеристики пластинки, или когда не требуется высокая точность расчёта, что особенно актуально на начальной стадии проектирования при выборе наиболее рациональных вариантов. Такие методы позволяют избежать решения сложных дифференциальных уравнений, не требуют мощных ЭВМ и позволяют, проводя только геометрические расчеты, находить интегральные физические характеристики пластинок.

Среди геометрических методов следует выделить два: изопериметрический метод (ИЗПМ) теоретические основы которого изложены в работе [4] и метод интерполяции по

коэффициенту формы (МИКФ), теоретические основы которого изложены в работе [3]. В первом из них строятся двусторонние изопериметрические неравенства, позволяющие с двух сторон оценить искомую интегральную физическую характеристику (ИФХ). Этот метод не обладает высокой точностью, поскольку во многих случаях дает довольно грубую оценку искомой ИФХ, однако он наглядно иллюстрирует место искомого решения среди множества форм пластинок [5]. Более совершенен метод интерполяции по коэффициенту формы, он позволяет для определенного вида пластинок, объединенных непрерывным или дискретным геометрическим преобразованием, строить приближенные аналитические зависимости, связывающие ИФХ с интегральной геометрической характеристикой пластинок – коэффициентом формы K_f . Как показано в монографиях [3, 4], эта геометрическая характеристика является геометрическим аналогом интегральных физических характеристик во многих двумерных задачах строительной механики, теории упругости и пластичности и широко используется при решении двумерных задач математической физики и теории упругости [3]. В связи с этим многие сложные двумерные задачи теории упругости сводятся к решению элементарной геометрической задачи – анализу поведения коэффициента формы при различных геометрических преобразованиях заданной области.

Имеется ещё одна разновидность МИКФ – это метод интерполяции по отношению конформных радиусов (внутреннего к внешнему \dot{r}/\bar{r}), предложенный В.И. Коробко и А.А. Хусточкиным [5] и существенно развитый А.А. Черняевым применительно к задачам поперечного изгиба и свободных колебаний пластинок. С помощью этого метода искомые ИФХ определяются с большей точностью [14].

При диагностике и контроле качества строительных конструкций используются их статические и динамические характеристики во взаимосвязи. Это убедительно показано в работах [16 – 19].

В работе [15] была получена взаимосвязь максимального прогиба и основной частоты колебаний пластинок:

$$w_0 \omega^2 = \frac{\iint q(x,y) dA}{\iint m(x,y) f(x,y) dA}, \quad (1)$$

где $q(x; y)$ – интенсивность равномерно распределенной нагрузки;

$m(x; y)$ – масса единицы площади пластинки;

$f(x; y)$ – единичная функция прогибов из выражения $w(x; y) = w_0 f(x; y)$, удовлетворяющая условию $1 \geq f(x; y) \geq 0$.

Сведем известные значения максимальных прогибов и основных частот колебаний пластин, приведенных в научной и справочной литературе [14] в таблицу 1.

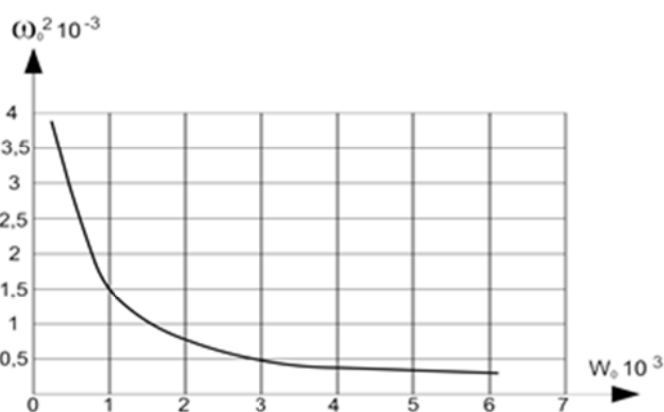


Рисунок 1 – Кривая $\omega^2 - w$

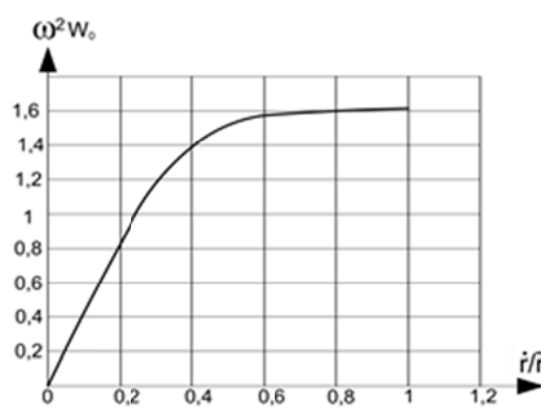


Рисунок 2 – Кривая $\omega^2 w_0 - \dot{r}/\bar{r}$

Если построить графические зависимости $\omega^2 - w_0$ для обоих случаев опирания пластинок по контуру, то все они вырождаются в одну кривую (рисунок 1). Отсюда следует, что на этой же кривой будут находиться все решения для пластинок с комбинированными

граничными условиями (любая комбинация жесткого защемления и шарнирного опирания по контуру), то есть для пластин одной и той же формы, но с разными граничными условиями произведение $\omega^2 w_0$ есть величина постоянная. Эта закономерность носит фундаментальный характер и позволяет по известным решениям для w_0 находить значения ω и наоборот.

Таблица 1 – Взаимосвязь максимального прогиба и основной частоты колебаний пластинок

Форма пластинок	Шарнирное опирание			Жесткое защемление		
	1000 w_0	ω	$\omega^2 \cdot 10^{-3}$	1000 w_0	ω	$\omega^2 \cdot 10^{-3}$
Пластинки в форме правильных фигур						
16–угольник	6,175	17,969	0,323	1,573	32,244	1,040
8–угольник	5,346	18,124	0,328	1,535	32,557	1,060
6–угольник	4,889	18,384	0,338	1,478	33,089	1,095
4–угольник	4,082	19,597	0,384	1,267	35,621	1,301
3–угольник	3,101	22,741	0,517	0,900	42,566	1,812
Пластинки в форме равнобедренных треугольников						
$\alpha=80^\circ$	1,617	31,068	0,965	0,428	58,781	3,787
$\alpha=70^\circ$	2,801	24,007	0,576	0,793	45,422	2,065
$\alpha=60^\circ$	3,101	22,741	0,517	0,900	43,026	1,812
$\alpha=50^\circ$	2,892	23,621	0,558	0,824	44,691	1,961
$\alpha=40^\circ$	2,337	26,151	0,684	0,647	49,478	2,526
$\alpha=30^\circ$	1,634	30,905	0,955	0,434	58,473	3,825
Пластинки в форме прямоугольных треугольников						
$\alpha=45^\circ$	2,647	24,678	0,609	0,743	46,691	2,205
$\alpha=40^\circ$	2,605	24,866	0,618	0,730	47,047	2,245
$\alpha=35^\circ$	2,475	25,477	0,649	0,689	48,184	2,375
$\alpha=30^\circ$	2,261	26,548	0,705	0,624	50,229	2,614
$\alpha=25^\circ$	1,964	28,334	0,803	0,534	53,608	3,029
$\alpha=20^\circ$	1,604	31,184	0,972	0,424	59,001	3,825
Пластинки в форме ромбов						
$\alpha=90^\circ$	4,082	19,597	0,384	1,267	37,078	1,252
$\alpha=80^\circ$	3,989	19,808	0,392	1,237	37,475	1,301
$\alpha=70^\circ$	3,734	20,465	0,419	1,147	38,720	1,406
$\alpha=60^\circ$	3,376	21,644	0,468	1,009	40,951	1,657
$\alpha=50^\circ$	2,921	23,498	0,552	0,834	44,459	1,961
$\alpha=40^\circ$	2,293	26,378	0,696	0,634	49,908	2,576
$\alpha=30^\circ$	1,600	31,219	0,975	0,423	59,067	3,836
<i>Примечание – В таблице не учитывались пластинки с очень острыми углами, так как такие пластинки редко используются в качестве элементов строительных конструкций.</i>						

Рассмотрим взаимосвязь произведения $\omega^2 w_0$ с отношением конформных радиусов i/\bar{r} . На основе данных таблицы 2 (колонки 2, 5, 6) построим график $\omega^2 w_0 - i/\bar{r}$ (рисунок 2) и соответствующую аппроксимирующую функцию:

$$\omega^2 w_0 = (0,0004(i/\bar{r})^3 - 0,0194(i/\bar{r})^2 + 0,276(i/\bar{r}) + 0,6113) \times q / m. \quad (2)$$

Эта кривая удовлетворяет известным решениям с погрешностью менее 4%. Из выражения (2) можно получить формулу для определения максимального прогиба пластинки через основную частоту колебаний и, наоборот, основной частоты колебаний – через максимальный прогиб.

Выводы.

1. В статье показана взаимосвязь максимального прогиба и основной частоты колебаний пластинок с различными граничными условиями, построена соответствующая графическая зависимость.

2. При построении графической зависимости $\omega^2 w_0 - i/\bar{r}$ кривые для пластинок одинаковой формы с шарнирным опиранием и жестким защемлением по контуру практически совпадают (отклонения этих зависимостей от кривой (2) не превышают 4%).

3. Формула (2) позволяет находить максимальный прогиб пластинки с произвольной комбинацией условий шарнирного опирания и жесткого защемления по контуру через основную частоту колебаний и, наоборот, основную частоту колебаний – через максимальный прогиб. Эта возможность будет весьма полезной при диагностике и контроле качества строительных конструкций в виде пластинок сложной формы и сложными граничными условиями.

Таблица 2 – Сопоставление кривых $\omega^2 w_0 - i/\bar{r}$ для пластинок с шарнирным опиранием и жестким защемлением по контуру

Форма пластинок	Отношение конформных радиусов i/\bar{r}	Шарнирное опирание			Жесткое защемление		
		1000 w_0	ω	$\omega^2 w_0 \cdot 10^{-3}$	1000 w_0	ω	$\omega^2 w_0 \cdot 10^{-3}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Пластинки в форме правильных фигур							
6–угольник	0,9762	4,889	18,384	1,652	1,478	33,089	1,618
4–угольник	0,9139	4,082	19,597	1,568	1,267	35,621	1,608
3–угольник	0,7748	3,101	22,741	1,604	0,900	42,566	1,631
Пластинки в форме равнобедренных треугольников							
$\alpha=80^\circ$	0,5308	1,617	31,068	1,561	0,428	58,781	1,621
$\alpha=70^\circ$	0,7270	2,801	24,007	1,614	0,793	45,422	1,637
$\alpha=60^\circ$	0,7748	3,101	22,741	1,604	0,900	43,026	1,631
$\alpha=50^\circ$	0,7411	2,892	23,621	1,614	0,824	44,691	1,636
$\alpha=40^\circ$	0,6556	2,337	26,151	1,598	0,647	49,478	1,634
Пластинки в форме прямоугольных треугольников							
$\alpha=45^\circ$	0,7034	2,647	24,678	1,612	0,743	46,691	1,639
$\alpha=40^\circ$	0,6970	2,605	24,866	1,611	0,730	47,047	1,639
$\alpha=35^\circ$	0,6771	2,475	25,477	1,605	0,689	48,184	1,637
$\alpha=30^\circ$	0,6436	2,261	26,548	1,594	0,624	50,229	1,631
$\alpha=25^\circ$	0,5941	1,964	28,334	1,577	0,534	53,608	1,617
$\alpha=20^\circ$	0,5284	1,604	31,184	1,560	0,424	59,001	1,622
Пластинки в форме ромбов							
$\alpha=90^\circ$	0,9139	4,082	19,597	1,568	1,267	37,078	1,608
$\alpha=80^\circ$	0,9036	3,989	19,808	1,565	1,237	37,475	1,609
$\alpha=70^\circ$	0,8724	3,734	20,465	1,564	1,147	38,720	1,612
$\alpha=60^\circ$	0,8199	3,376	21,644	1,582	1,009	40,951	1,622
$\alpha=50^\circ$	0,7457	2,921	23,498	1,613	0,834	44,459	1,636
$\alpha=40^\circ$	0,6487	2,293	26,378	1,595	0,634	49,908	1,633
$\alpha=30^\circ$	0,5277	1,600	31,219	1,559	0,423	59,067	1,623

Примечание – В таблице приведены результаты, полученные в работе [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: «Высшая школа», 1990. – 400 с.
2. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в трех томах / Под общей редакцией И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – Т. 1. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1968, – 832 с.
3. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формой области в двумерных задачах теории упругости / А.В. Коробко. – М.: изд-во АСВ, 1999. – 302 с.
4. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода / В.И. Коробко. – М.: изд-во АСВ, 1997. – 390 с.
5. Шляхов, С.В. Применение методики МИКФ для расчета треугольных и прямоугольных пластинок с использованием широко известных геометрических параметров / С.В. Шляхов, А.В. Коробко, А.А. Чернев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 4. – С. 19–29.
6. Муромский, А.С. Расчет треугольных пластинок с использованием аффинных преобразований / А.С. Муромский, А.В. Коробко // Труды 55-й Международной научно-технической конференции молодых ученых (докторантов, аспирантов и студентов) «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт Петербург, 2001).
7. Гефель, В.В. Взаимосвязь задач поперечного изгиба и свободных колебаний треугольных пластинок / Гефель, В.В., А.В. Коробко // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство». – 2006. – № 1–2. – С. 24–27.
8. Сенин, М.А. Взаимосвязь задач поперечного изгиба и свободных колебаний ромбических пластинок с помощью МИКФ / М.А. Сенин, А.В. Коробко // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – 2008. – № 3. – С. 6–7.

9. Сенин, М.А. Определение высших форм колебаний пластинок с помощью МИКФ / М.А. Сенин, А.В. Коробко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 6. – С. 31–32.
10. Фетисова, М.А. Определение максимального прогиба трапецевидных пластинок с комбинированными граничными условиями / М.А. Фетисова, Н.Г. Калашникова // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». – 2009. – № 1. – С. 65–67.
11. Савин, С.Ю. Расчет ортотропных пластин в виде правильных многоугольников с однородными граничными условиями / С.Ю. Савин, В.И. Коробко // Строительство и реконструкция. – 2011. – № 1. – С. 3–11.
12. Савин, С.Ю. Изгиб ортотропных пластинок в виде параллелограмма с однородными и комбинированными граничными условиями / Савин, С.Ю., В.И. Коробко, // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 2. – С. 18–23.
13. Коробко, А.В. Определение максимального прогиба ромбических пластинок с комбинированными граничными условиями с использованием отношения конформных радиусов / А.В. Коробко, А.А. Черняев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – №4. – С. 21–25.
14. Черняев, А.А. Развитие метода интерполяции по отношению конформных радиусов для решения задач поперечного изгиба пластинок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Черняев Андрей Александрович. – Орел, 2013. – 211 с.
15. Коробко, В.И. Контроль качества строительных конструкций: виброакустические технологии / В.И. Коробко, А.В. Коробко. – М.: «Издательство Ассоциации строительных вузов», 2003. – 287с.
16. Коробко, В.И. Статический метод оценки жесткости горизонтального шва двухслойных составных балок / В.И. Коробко, А.В. Бояркина, / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 4. – С. 40–43.
17. Коробко, В.И. Экспериментальные исследования стальных ферм с параллельными поясами на статические и динамические нагрузки / В.И. Коробко, А.В. Бояркина, Р.В. Алдушкин, / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 2. – С. 3–7.
18. Коробко, В.И. Экспериментальное определение эффективного числа нагелей при контроле составных деревянных балок / В.И. Коробко, А.В. Бояркина, / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2. – С. 140–143.
19. Коробко, В.И. Контроль жесткости железобетонных перемычек с использованием динамического критерия – коэффициента нелинейных искажений / В.И. Коробко, О.В. Калашникова, М.О. Калашников, / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 6. – С. 118–125.

Коробко Виктор Иванович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел.: +7 (4862) 73–43–49
E-mail: vikor10@mail.ru

Черняев Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»
Тел.: +7 (4862) 73–43–49
E-mail: chernyev87@yandex.ru

Шляхов Станислав Владимирович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел.: +7 (4862) 73–43–49
E-mail: shlyakhov.stas@mail.ru

Тюрин Валентин Олегович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
аспирант кафедры "Мехатроника, механика и робототехника"

A.V. KOROBKO, A.A. CHERNYAEV, S.V. SHLYAKHOV, V.O. TYURIN

THE RELATIONSHIP OF THE MAXIMUM DEFLECTION AND FUNDAMENTAL FREQUENCY OF OSCILLATIONS OF THE PLATES

Abstract. *This article examines the question of the relationship between the maximum deflection and fundamental frequency of oscillations of the plates. Appears to be graphical and analytical relationships between the above parameters for plates with different boundary conditions (hinge support throughout the system and hard pinching). Displays the approximating function of the maximum deflection to the square of the fundamental frequency of oscillation of the plates depending on the relations between the inner and outer conformal radius, allowing us to obtain the elementary formula for determining the values of the maximum deflection at the fundamental frequency of oscillation and vice versa – the main frequency of the fluctuations in the value of the maximum deflection.*

Keywords: *elastic plate in the shape of polygons circumscribed around a circle, hard pinched, a ball bearing, the maximum deflection of the plates, the main frequency of oscillation, the ratio of the conformal radius.*

BIBLIOGRAPHY

1. Alexandrov, A. V. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity / A. V. Aleksandrov, V. D. Potapov. – M.: «Highest school», 1990. – 400 s.
2. Strength, stability, vibrations: Handbook in three volumes / Under the General editorship of I. A. Birger and Ya. G. Panovko. – Vol. 1. – M.: Publishing house «mechanical engineering», 1968, – 832 s.
3. Korobko, V. A. Geometric modeling the shape of a region in two-dimensional problems of the elasticity theory / A. V. Korobko. – M.: Publishing house ACB, 1999. – 302 s.
4. Korobko, V. I. Isoperimetric method in structural mechanics: Theoretical foundations isoperimetric method / V. I. Korobko. – M.: publishing house ACB, 1997. – 390 s.
5. Shlyakhov, S. V. Application of the method to the MIKF for the calculation of the triangular and rectangular plates with the use of a widely known geometric parameters / S. V. Shlyakhov, A. V. Korobko, A. A. Chernev // Construction mechanics and calculation of structures. – 2016. – No. 4. – s. 19–29.
6. Muromsky, A. S. Calculation of triangular plates using affine transformations / A. Muromsky, A. V. Korobko // Proceedings of the 55th International scientific-technical conference of young scientists (doctoral students, post-graduates and students) «Actual problems of modern construction» (St. Petersburg, 2001).
7. Gefell, V. V. Relationship between the problems of transverse bending and free vibration of triangular plates / Gefell, V. V., A. V. Korobko // Izvestiya OrelGTU. Series «Construction». – 2006. – № 1–2. – s. 24–27.
8. Senin, M. A. The Relationship of task lateral bending and free vibration of rhombic plates with MIKF / M. A. Senin, A. V. Korobko // Izvestiya OrelGTU. Series «Construction. Transport». – 2008. – № 3. – s. 6–7.
9. Senin, M. A. Determination of higher mode shapes of plates with MIKF / M. A. Senin, A. V. Korobko // Construction mechanics and calculation of structures. – 2008. – No. 6. – S. 31–32.
10. Fetisov, M. A. Determination of the maximum deflection of trapezoidal plates with Combirelated boundary conditions / M. A. Fetisova, N. G. Kalashnikov // Izvestiya OrelGTU. Series «Construction. Transport». – 2009. – № 1. – s. 65–67.
11. Savin, S. Yu. Calculation of orthotropic plates in the form of regular polygons with homogeneous boundary conditions / Yu. P. Savin, V. I. Korobko // Construction and reconstruction. – 2011. – No. 1. – s. 3–11.
12. Savin, S. Yu. Bending of orthotropic plates in the form of a parallelogram with homogeneous and combined boundary conditions / Savin, S. Yu., I. V. Korobko, // Construction mechanics and calculation of structures. – 2012. – No. 2. – s. 18–23.
13. Korobko, A. V. Determination of maximal bending of rhombic plates with mixed boundary conditions by using the ratio of conformal radii / A. V. Korobko, A. A. Chernyaev // Structural mechanics of engineering constructions and buildings. – 2011. – No. 4. – s. 21–25.
14. Chernyaev, A. A. The Development of the interpolation method relative conformal radius for solving problems of transverse bending of plates: Dis. kand. tech. Sciences: 05.23.17 / Chernyaev Andrey. – Eagle, 2013. – 211 s.
15. Korobko, V. I. Quality Control of building structures: acoustic technologies / V. I. Korobko, A. V. Korobko. – M.: «Publishing house of Association of construction universities» 2003. – 287s.
16. Korobko, V. I. a method of evaluating Static stiffness horizontal seam, doublelayered composite beams / V. I. Korobko, A. V. Boyarkina, / Fundamental and applied problems of technics and technology. – 2008. – No. 4. – s. 40–43.
17. Korobko, V. I. Experimental study of steel trusses with parallel chords on the static and dynamic loads / V. I. Korobko, A. V. Boyarkina, R. V. Adushkin, / Fundamental and ladnyi problems of engineering and technology. – 2009. – No. 2. – s. 3–7.
18. Korobko, V. I. Experimental determination of the effective number of nails in the control of composite wood beams / V. I. Korobko, A. V. Boyarkina, / Fundamental and applied problems of technics and technology. – 2013. – No. 2. – s. 140–143.
19. Korobko, V. I. Control of stiffness of reinforced concrete bridges using dynamic criteria – total harmonic distortion / V. I. Korobko, O. V. Kalashnikova, M. O. Kalashnikov, / Fundamental and applied problems of technics and technology. – 2015. – No. 6. – s. 118–125.

Korobko Victor Ivanovich

Orel State university, Orel
 Doctor of technical sciences, professor of the department
 «Building designs and materials»
 Ph.: +7 (4862) 43–58–94
 E-mail: vikor10@mail.ru

Chernyaev Andrey Aleksandrovich

Orel State university, Orel
 Candidate of technical sciences, associate professor of the
 department «Building highway»
 Ph.: +7 (4832) 64–59–15
 E-mail: chernyev87@yandex.ru

Shlyakhov Stanislav Vladimirovich

Orel State university, Orel
 graduate student of the department «Building designs and
 materials»
 Ph.: +7 (4862) 73–43–49
 E-mail: shlyakhov.stas@mail.ru

Tyurin Valentin Olegovich

FGBOU VO "Orel State University named after IS.
 Turgenev", the city of Orel
 postgraduate student of the department "Mechatronics,
 mechanics and robotics"

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.914

Р.В. АНИСИМОВ, И.В. ОВСЯНИКОВА, А.С. ТАРАПАНОВ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ ПРИ НЕЙРОСЕТЕВОМ УПРАВЛЕНИИ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования сил резания при обработке неэвольвентных периодических профилей. Представлен анализ возможностей нейросетевого управления цепями подач станков с ЧПУ для выравнивания нагрузки. Установлено, что нейросетевое управление, отвечающее за качество формообразования периодических профилей, позволяет повысить их точность.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, системы управления, периодические профили, качество изделий.

Введение.

На сегодняшний день необходима обобщенная концепция управления, включающая в себя более высокий уровень принятия решений и обучения в машиностроении.

Наиболее перспективным направлением в развитии управления технологическими процессами являются искусственные нейронные сети с их массовым параллелизмом и способностью к обучению, которые моделируют действие периодических нагрузок на технологическую систему [1 – 4].

В современном машиностроении широко используются изделия, содержащие сложные периодические неэвольвентные профили, которые применяются для передачи крутящего момента во множестве механизмов машин и аппаратов.

Основная часть.

Варианты формы профилей широко варьируются. Помимо традиционного эвольвентного (зубчатые колёса с эвольвентными зубьями, соединения с помощью эвольвентных шлицев) широко применяются треугольные, циклоидные, трапецеидальные и т.д. (рисунок 1).

Процесс механической обработки сложных периодических профилей отличается большим разнообразием методов обработки, высокими требованиями к качеству обработанной поверхности, к кинематической точности и погрешностям профиля на этапе предварительного формообразования.

В рамках применяемой модели – возможность управления формообразованием в соответствии с задаваемыми целями и ограничениями. К последним могут быть отнесены качественные показатели номинальной поверхности, режимы резания, параметры установки инструмента, время обработки и себестоимость [4, 5].

Анализ эксплуатационных возможностей оборудования по производительности и качеству нарезаемых колес связан, в первую очередь, с определением максимальной амплитуды сил резания и их изменением за период оборота инструмента.

Зная силы резания можно определить мощность станка для обработки заготовки, необходимую жесткость отдельных узлов, допустимую жесткость детали и применяемого приспособления. Важную роль играет определение сил резания для расчета конструктивных параметров инструментов червячного типа. При изучении процессов, происходящих при резании металлов, основной задачей является определение степени влияния различных факторов на изменение сил резания в процессе формообразования деталей с периодическими профилями. [4, 5, 6].

В качестве примера приведены изменения сил при резании червячной фрезой (модуль $m=3$ мм. Диаметр 112 мм, число зубьев фрезы $z_0=10$) зубчатого колеса передачи Новикова (число зубьев $z_1=30$) (рисунок 2).



Рисунок 1 – Изделия с периодическими профилями

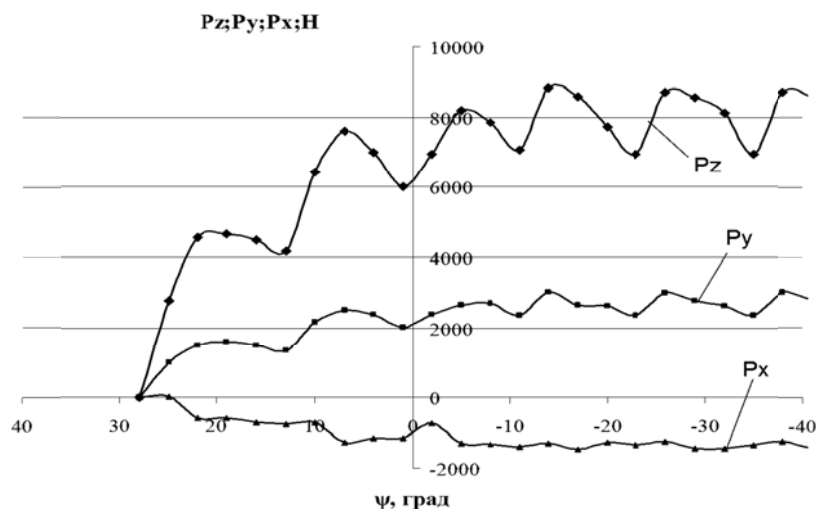


Рисунок 2 – Суммарное изменение составляющих силы резания:
 $n_0 = 98$ об/мин, $S_0 = 3$ мм/об, $z_0 = 10$, $m = 3$ мм, $z_1 = 30$

При зубодолблении колес с внутренними зубьями в работу вступает одновременно большое число зубьев, что ведёт к увеличению составляющих сил резания и соответственно к дополнительным деформациям технологической системы, что сказывается на точности обрабатываемого зубчатого колеса. На графиках (рисунок 3 и 4) представлено изменение составляющих сил резания с учетом зубьев, одновременно находящихся в работе для обработки колёс с внутренними циклоидальными и храповыми зубьями.

Несмотря на существенную разницу процессов, представленных на рисунках 3 и 4 (разные процессы – фрезерование и зубодолбление, существенно отличающие периодические профили – в основе которых – часть окружности, треугольная форма, циклоиды) всех их роднит общая закономерность – изменение сил с существенной амплитудой. Это создает задел для управления параметрами процессов резания, в первую очередь подачи, позволяющего значительно уменьшить амплитуду изменения сил резания и, тем самым, повысить качество выпускаемых деталей и производительность процессов.

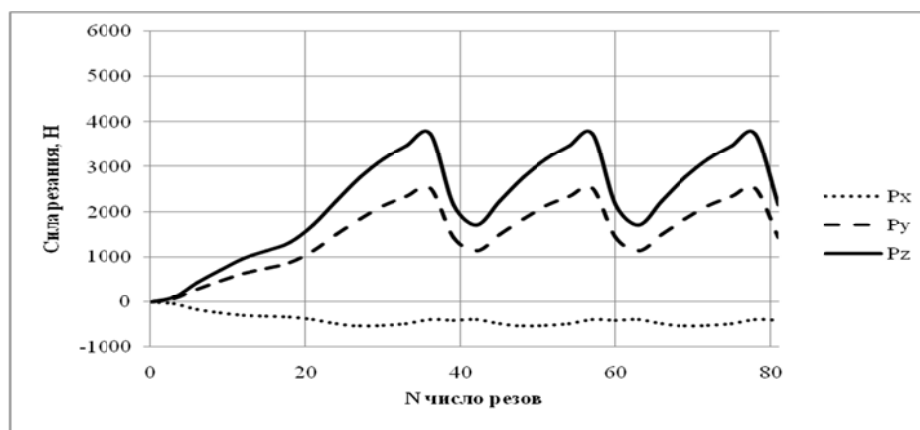


Рисунок 3 – Изменение сил резания при работе всех зубьев, находящихся в резании при обработке колеса с внутренними эвольвентными зубьями

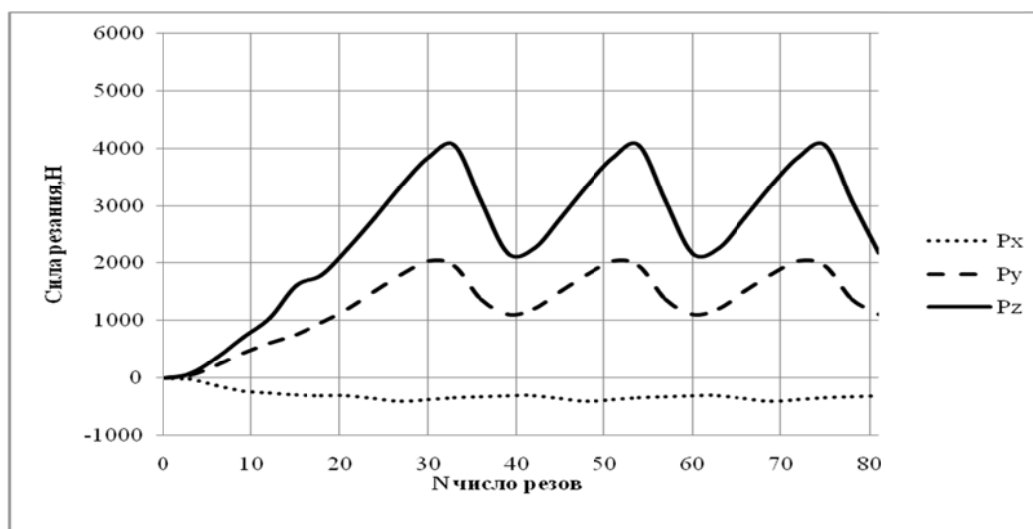


Рисунок 4 – Изменение сил резания при работе всех зубьев, находящихся в резании при обработке колеса с внутренними треугольными зубьями

Для этой цели наиболее целесообразно использовать нейросетевое управление [7, 8, 9]. Искусственные нейронные сети (ИНС), обладают способностью к обучению и могут быть использованы для обеспечения решения задач управления, которые ещё не решены. Нейронные сети обеспечивают хорошую отказоустойчивость. Преимущества наиболее заметны в технологической системе при использовании большого количества узлов и блоков. Вместе с тем аппаратная реализация нейронных сетей в настоящее время получила самое широкое развитие.

НС характеризуются топологией сети, то есть количеством соединений, особенностями характеристик, классифицируются по типу использования нелинейных элементов. [9 – 12].

Параллельная природа НС обеспечивает вычисления с высокими скоростями. Сети, содержащие нелинейные компоненты, используются для аппроксимации нелинейных отображений с любой желаемой степенью точности. Параметры НС подстраиваются в реальном времени с учетом входных/выходных данных, могут использоваться в качестве адаптивных, обучаемых или самообучающихся систем, обеспечивающих высокое качество функционирования систем автоматического управления (САУ) в условиях существенной неопределенности (недостаточности) информации об объекте управления (формообразовании сложных криволинейных поверхностей) и внешней среде.

Так, нейронная сеть может использоваться для получения нелинейной математической модели $y_0 = F(u)$ объекта (процесса) управления по входным/выходным данным, т.е. для решения задачи анализа и корректировки входных величин процессов фрезерования и зубодолбления. При этом сравниваются выход объекта $y_0(t)$ и выход нейронной сети $y(t)$ при одном и том же входном воздействии $u(t)$, а процедура обучения НС состоит в изменении весов ее связей таким образом, чтобы уменьшить рассогласование $\varepsilon(t) = y(t) - y_0(t)$ до приемлемой (достаточно малой) величины.

Применение нейросетевой технологии управления позволяет снять математические проблемы анализа и синтеза проектируемой системы. Это объясняется тем, что достигаемые свойства и качество процессов управления зависит от фундаментальных свойств многослойных нелинейных нейросетей, а не от аналитически рассчитанных оптимальных законов управления, обычно реализуемых в виде компьютерных программ. Многослойные нейронные сети обладают рядом достоинств, оправдывающих их применение в задачах управления фрезерованием и зубодолблением.

При анализе имеющихся зависимостей изменения сил резания при работе всех зубьев, находящихся при обработке колеса с периодическими профилями широкого диапазона конструкций было решено использовать НС обратного распространения.

Нейронные сети обратного распространения – это мощнейший инструмент поиска закономерностей, прогнозирования, качественного анализа. Нейронная сеть обратного распространения состоит из нескольких слоев нейронов, причем каждый нейрон слоя i связан с каждым нейроном слоя $i+1$, т. е. речь идет о полносвязной НС.

В общем случае задача обучения НС сводится к нахождению некой функциональной зависимости $Y=F(X)$, где X – входной, а Y – выходной векторы. В общем случае такая задача, при ограниченном наборе входных данных, имеет бесконечное множество решений. Для ограничения пространства поиска при обучении ставится задача минимизации целевой функции ошибки НС, которая приводит к выравниванию процесса – происходит равномерное нагружение технологической системы (станок–инструмент–приспособление–деталь) которая находится по методу наименьших квадратов:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p (y_j - d_j)^2,$$

где y_j – значение j -го выхода нейросети;
 d_j – целевое значение j -го выхода;
 p – число нейронов в выходном слое.

Основное отличие НС в том, что в них все входные и выходные параметры представлены в виде чисел с плавающей точкой обычно в диапазоне $[0...1]$. В то же время данные предметной области часто имеют другое кодирование. Данные о проблеме могут быть как количественными, так и качественными [9 – 11].

Многослойные сети могут быть сопоставлены с оболочкой представления знаний экспертных систем: знаний, например, о динамике нелинейного многосвязного объекта управления или об оптимальном алгоритме управления таким объектом “хранятся” внутри сети. Вопрос состоит в том, как извлечь эти знания, используя доступную измерительную

информацию в реальном масштабе времени. Это – задача структурного синтеза динамических систем с нейросетями, обучаемыми в темпе поступления данных измерения.

Заключение.

Развитие конструкций современных зубообрабатывающих станков идет в направлении повышения точности обработки за счет повышения качества исполнения и монтажа элементов кинематических цепей, определяющих точностные параметры обработки, а также шпинделей стола и инструмента на высокоточных подшипниках качения [5 – 7, 9].

Структурный синтез нейросетевых систем управления базируется на использовании конечного числа типовых динамических структур с многослойными нейронными сетями, дополняемых в каждом конкретном случае необходимыми каналами измерения и оценивания для вычисления переменных, используемых, в свою очередь, в алгоритмах обучения многослойных нейросетей.

Электросхема моделей с ЧПУ намного сложнее, чем обычных. Она представляет полностью цифровую систему, которая подходит для сложных задач обработки и демонстрирует высокий уровень динамики и точности. Используемое системное программное обеспечение дает возможность оптимальной адаптации к станку и к задаче обработки. На первый план выходит возможность управления точностью деления и биения профилей при формообразовании периодических профилей, позволяющего значительно сгладить волнообразное изменение нагрузки на технологическую систему. Модульный принцип позволяет оснастить целый ряд станков различного типа.

Эффективное выравнивание нагрузки при формировании периодических профилей дает возможность повысить равномерность нагрузки на технологическую систему и, в конечном счете, повысить точность обработки периодических профилей, а, следовательно, и качества зацеплений, связанное с уменьшением проблем эксплуатации и долговечностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. El-Lelthy and R. N. Newcomb, Guest Editors of Special Issue on Neural Networks, IEEE Trans. Circ. Syst., vol. 36. no. 5. May 1989.
2. Section on Neural Networks for Control Systems, IEEE Cow. Syst. Mag., vol. 9, no. 3, pp. 25–59, Apr. 1989.
3. Kohonen, T. Self-organization and associative memory. Series in Information Sciences, vol. 8. Berlin. Springer Verlag. 1984. – 82 с.
4. Хайкин, Саймон. Нейронные сети. Полный курс 2-е изд., испр.: Пер. с англ. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
5. Анисимов, Р. В. Экспериментальные исследования сил резания при обработке зубчатых колес с внутренними зубьями невольного профиля./Р.В. Анисимов, А.С. Тарапанов //«Наукоемкие технологии в машиностроении и авиационном строительстве: Материалы IV Международной научно-технической конференции. В 2-х частях»– Рыбинск: РГТУ имени П.А. Соловьева, 2012.– Ч. I– С.263–268
6. Овсяникова, И.В. Управление процессом формирования зубьев червячных и спиральных колёс на основе анализа виртуальных моделей (монография)/И.В. Овсяникова, И.Н. Сухарский, А.С. Тарапанов/ М., –ИД «Спектр», 2013. – 186 с.
7. Овсяникова, И.В. Управление параметрами процесса формирования сложных поверхностей // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» №2, –Госуниверситет–УНПК, Орёл, 2012. – С. 56–60.
8. Комаров В.А. Повышение эффективности технологических операций на основе совершенствования обработки резанием / В.А.Комаров – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. –164с.:
9. Бржозовский Б.М., Бровкова М.Б., Мартынов В.В. Определение параметров качества изделий при механообработке в реальном времени на основе нейросетевых алгоритмов //Нелинейная динамика и прикладная синергетика: Материалы Междунар. конф. – Комсомольск-на-Амуре, 2003. – С.62–65.
10. Барский, А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 179 с.
11. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления /Пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2009. – 832 с.

Анисимов Роман Викторович
ОГУ им. И.С. Тургенева, г.
Орел
Кандидат технических наук,
доцент
Тел. +7 910 269 14 48
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

Овсяникова Ирина Васильевна
ОГУЭТ, г. Орёл
Кандидат экономических наук,
доцент
Тел. +7 920 812 16 26
E-mail: ovsynikova2012@yandex.ru

Тарапанов Александр Сергеевич
ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел
Доктор технических наук,
профессор
Тел. +7 920 287 77 74
E-mail: tarapanov@rambler.ru

R.V. ANISIMOV, I.V. OVSYANIKOVA, A.S. TARAPANOV

INCREASE OF PRECISION OF PROCESSING OF PERIODIC PROFILES UNDER THE MANAGEMENT OF A NEURAL NETWORK

Abstract. *The article presents the results of the investigation of cutting forces in the processing of non-involute periodic profiles. The analysis of the possibilities of neural network control of CNC feeding chains for load balancing is presented. It is established that the neural network control, which is responsible for the quality of the shaping of periodic profiles, allows increasing their accuracy.*

Keywords: *artificial neural networks, control systems, periodic profiles, product quality.*

BIBLIOGRAPHY

1. N. El-Lelthy and R. N. Newcomb, Guest Editors of Special Issue on Neural Networks, IEEE Trans. Circ. Sys., vol. 36. no. 5. May 1989.
2. Special Section on Neural Networks for Control Systems, IEEE Cow. Syr. Mag., vol. 9, no. 3, pp. 25–59, Apr. 1989.
3. Kohonen T. Self-organization and associative memory. Series in Information Sciences, vol. 8. Berlin: Springer Verlag. 1984. – 82 s.
4. Hajkin Sajmon. Nejronnye seti. Polnyj kurs 2-e izd., ispr.: Per. s angl. – M.: OOO «I. D. Vilyams», 2006. – 1104 s.
5. Anisimov, R. V. Eksperimentalnye issledovaniya sil rezaniya pri obrabotke zubchatyh koles s vnutrennimi zubymi nezhvolvenogo profilya. /R.V. Anisimov, A.S. Tarapanov/ «Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii i aviadvigatelestroenii: Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. V 2-h chastyah»– Rybinsk: RGATU imeni P.A. Soloveva, 2012. – CH. I– S.263 – 268
6. Ovsyanikova, I.V., Suharskij, I.N., Tarapanov, A.S. Upravlenie processom formirovaniya zubev chervyachnyh i spiroidnyh kolyos na osnove analiza virtualnyh modelej (monografiya)/I.V. Ovsyanikova, I.N. Suharskij, A.S. Tarapanov/ M., ID «Spektr», 2013. – 186 s.
7. Ovsyanikova, I.V. Upravlenie parametrami processa formirovaniya slozhnyh poverhnostej // «Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii» №2, Gosuniversitet–UNPK, Oryol, 2012. – S. 56–60
8. Komarov V.A. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh operacij na osnove sovershenstvovaniya obrabotki rezaniem / V.A.Komarov – M.: Izdatelstvo MGTU im. N. E.H. Bauman, 2002. – 164s.
9. Brzhozovskij B.M., Brovkova M.B., Martynov V.V. Opredelenie parametrov kachestva izdelij pri mekhanooobrabotke v realnom vremeni na osnove nejrosetevykh algoritmov //Nelinejnaya dinamika i prikladnaya sinergetika: Materialy Mezhdunar. konf. – Komsomolsk-na-Amure, 2003. – S.62–65.
10. Barskij A.B. Nejronnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinyatie reshenij. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 179 s.
12. Dorf R., Bishop R. Sovremennye sistemy upravleniya /Per. s angl. B. I. Kopylova. – M.: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2009. – 832 s.

Anisimov Roman Viktorovich
OSU them. IS Turgenev, Orel
Ph.D., Associate Professor
Tel. +7 910 269 14 48
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

Ovsyanikova Irina Vasilievna
OGUET, Orel
Candidate of Economics, Associate
Professor
Tel. +7 920 812 16 26
E-mail: ovsynikova2012@yandex.ru

Tarapanov Alexander Sergeevich
OSU them. IS Turgenev, Orel
Doctor of Technical Sciences,
Professor
Tel. +7 920 287 77 74
E-mail: tarapanov@rambler.ru

УДК 629.12.03–714.001.24

А.Р. АБЛАЕВ, Р.Р. АБЛАЕВ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООТДАЧИ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТРУБНОМ ПОЛОСТИ СУДОВЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

Аннотация. Приводится алгоритм определения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления в трубном пространстве для судовых охладителей масла и воды в компьютерно-интегрированной системе

Ключевые слова: теплообменный аппарат, теплоотдача, гидравлическое сопротивление.

Введение

Расчет коэффициентов теплоотдачи α является обязательным элементом структур расчета коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате. Расчет α специфичен практически для каждого сочетания признаков: процесса теплообмена, формы теплопередающего элемента, типа теплопередающей поверхности, пространственного расположения аппарата. Каждый из этих признаков, в особенности второй и третий, имеет большое число состояний [1–3].

В технической литературе имеется множество данных по коэффициентам теплоотдачи, большей степенью разрозненных, не удовлетворяющих условиям совместимости [4–9].

Цель и задачи исследования

Систематизировать данные по теплогидродинамическому расчету трубного пространства судовых кожухотрубчатых охладителей масла и воды и представить алгоритмические модели для компьютерно-интегрированного способа расчета.

Основной раздел

Во многих судовых кожухотрубчатых охладителях масла и воды [10] вход жидкости в трубу совпадает с началом теплообменного участка. В таких случаях из-за небольшой длины труб течение не успевает стабилизироваться, т.е. процесс теплообмена протекает в начальном гидродинамическом участке при одновременном развитии скоростных и температурных полей.

Если при стабилизированном течении в круглой трубе $Nu_x = f(Re^{-1}x/d)$, то в гидродинамическом начальном участке

$$Nu_x = f(Re, Pr, x/d) \quad (1)$$

и теплоотдача выше, чем при стабилизированном течении, что объясняется более высокими значениями скорости вблизи стенки и наличием радиальных составляющих скорости.

Расчет для значений Pr от 0,1 до 1000 в круглой трубе вблизи от входа дает следующее уравнение для среднего теплообмена:

$$Nu = 0,664 \left(\frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-0,5} Pr^{0,33}. \quad (2)$$

Результаты расчета теплоотдачи в начальном гидродинамическом участке круглой трубы с точностью $\pm 5\%$ можно описать уравнением [1]

$$e = \frac{Nu}{Nu_{ст}} = 0,6 \left(\frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left(1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right), \quad (3)$$

где $Nu_{ст}$ – среднее число Нуссельта на участке от $x = 0$ до $x = l$ при стабилизированном течении.

Зависимость ((3) справедлива при значениях $Re^{-1} \cdot l/d < 0,1$. Она хорошо согласуется с экспериментальными данными, но не учитывает влияния изменения физических свойств жидкости с температурой.

Влияние переменности физических свойств учитывается введением аналогичного параметра, как и в случае стабилизированного течения.

Детальное исследование теплообмена в начальном участке трубы при $q_c = const$ приближенным методом теории пограничного слоя дано в [1]. Получено, что случае $\Delta < 1$ местное число Нуссельта равно

$$Nu_x = \frac{\alpha_x d}{\lambda} = \frac{1}{\frac{3}{8} \Delta - 4 \frac{1}{Pe} \frac{x}{d}}. \quad (4)$$

Для малых значений параметра $Re^{-1} \cdot x/d$, т.е. вблизи входа в трубу, где толщина пограничного слоя невелика, найдено выражение

$$Nu_x = 0,46 \left(\frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{-0,5} Pr^{0,33}. \quad (5)$$

Для всей области начального гидродинамического участка рекомендуется соотношение

$$e = \frac{Nu_x}{Nu_{ст}} = 0,35 \left(\frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{-1/6} \left(1 + 2,85 \frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{0,42}, \quad (6)$$

где $Nu_{ст}$ – число Нуссельта для случая стабилизированного течения при $q_c = const$.

Уравнение ((6) описывает результаты расчета в пределах $10^{-4} < Re^{-1} \cdot x/d \leq 0,064$ и $0,7 < Pr < 1000$ с точностью около 6%. При $Re^{-1} \cdot x/d > 0,064$ профиль скорости становится параболическим и $Nu_x = Nu_{\infty}$. Уравнение ((6) неплохо согласуется с опытными данными в случае постоянных физических свойств теплоносителя.

Для расчета теплообмена в случае переменных физических свойств (прежде всего вязкости) с изменением температуры предлагается зависимость

$$Nu_x = 1,31 e \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3} \left(1 + 2 \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right) \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^{-1/6}, \quad (7)$$

где e определяется по уравнению ((6).

Уравнение ((7) охватывает всю протяженность термического начального участка, включая и область начального гидродинамического участка, где происходит формирование профиля скорости.

Теплоотдача при ламинарном режиме.

При ламинарном течении перенос теплоты от одного слоя жидкости к другому в направлении нормали к стенке осуществляется путем теплопроводности. В то же время каждый слой имеет в общем случае различную скорость продольного движения. Поэтому наряду с поперечным переносом теплоты путем теплопроводности происходит также конвективный перенос теплоты в продольном направлении. Вследствие этого теплообмен при ламинарном режиме течения зависит от гидродинамической картины движения.

Рассмотрим развитие процесса теплообмена вдоль трубы. Пусть во входном сечении температура жидкости постоянна и по величине отличается от температуры стенки трубы. По мере движения потока между жидкостью и стенкой происходит процесс теплообмена и температура жидкости постепенно изменяется. Вначале вблизи от входного сечения изменение температуры происходит лишь в тонком слое около поверхности. Затем по мере удаления от входного сечения все большая часть потока вовлекается в процесс теплообмена. Таким образом, развитие процесса теплообмена внутри труб вначале происходит качественно. Около поверхности трубы образуется тепловой пограничный слой, толщина которого постепенно увеличивается в направлении движения потока. На некотором расстоянии от входа трубы $l_{н.т}$ тепловые пограничные слои смыкаются, и в процессе теплообмена участвует далее весь поток жидкости. Расстояние $l_{н.т}$ может быть приближенно оценено по зависимости $l_{н.т} \approx 0,05d Re Pr$.

Обычно на практике ламинарный режим встречается при течении достаточно вязких теплоносителей, таких как различные масла, применяемые в судостроении, для которых

значения Pr , для рабочих режимов находятся в пределах от 0,5 до 2500. В этих условиях длина теплового начального участка стабилизации $l_{н.т}$ оказывается достаточно большой.

Значительное влияние на интенсивность теплоотдачи может оказывать зависимость физических свойств жидкости (в первую очередь вязкости) от температуры. Изменение температуры по сечению трубы приводит к изменению вязкости, причем чем сильнее перепады температур, тем сильнее меняются вязкость и другие физические параметры (теплопроводность, теплоемкость) по сечению трубы. Изменение вязкости приводит к изменению профиля поля скорости, что в свою очередь отражается на интенсивности теплообмена. На практике обычно скорость и температура на входе в трубу имеют профили, близкие к равномерным. Для этих условий расчет среднего коэффициента теплоотдачи при ламинарном режиме течения жидкости в трубах при $l/d > 10$ и $Re_{ж} > 10$ может проводиться по формуле

$$Nu_{дж} = 1,4 \left(Re_{дж} \frac{d}{l} \right)^{0,4} Pr_{ж}^{0,33} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

Индексы «ж» и «с» означают, что физические свойства выбираются по средней температуре жидкости и стенки соответственно.

Множитель $\left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$ учитывает зависимость физических свойств (в основном вязкости) от температуры и влияние направления теплового потока. Соотношение ((8) справедливо для значений $0,06 < \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} < 10$.

Соотношение ((8) правомерно при значениях $Re_{дж} \frac{d}{l} Pr_{ж}^{5/6} > 15$.

При меньших значениях этой величины, т.е. для труб весьма большой длины:

$$l/d > 0,067 Re_{дж} Pr_{ж}^{5/6}, \quad (9)$$

величина $Nu_{дж}$ становится постоянной, что отвечает условиям стабилизации интенсивности теплоотдачи. При выполнении этих условий вместо соотношения ((8) для определения среднего коэффициента теплоотдачи может быть рекомендовано приближенное соотношение

$$Nu_{дж} \approx 4 \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (10)$$

Теплоотдача при турбулентном движении в круглых трубах при установившемся течении

При турбулентном режиме движения перенос теплоты внутри жидкости осуществляется в основном путем перемешивания. При этом процесс перемешивания протекает настолько интенсивно, что по сечению ядра потока температура жидкости практически постоянна. Резкое изменение температуры наблюдается лишь внутри тонкого слоя у поверхности.

В [1] проведен аналитический расчет стабилизированной теплоотдачи. Расчетами охвачен интервал чисел Re от 10^4 до $5 \cdot 10^6$ и Pr от 0 до 2000. Результаты, полученные при $Pr > 0,5$, обобщены зависимостью

$$Nu = \frac{\frac{1}{8} \xi Re Pr}{k_1 + 12,7 \sqrt{\frac{1}{8} \xi (Pr^{2/3} - 1)}}, \quad (11)$$

где $k_1 = 1 + 900 / Re$; $\xi = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2}$.

Среднее отклонение экспериментальных значений Nu от рассчитанных по ((11) составляет $\pm(4-5)\%$ в интервалах $4 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^6$ и $0,5 \leq Pr < 5 \cdot 10^5$.

На практике для расчета теплоотдачи часто пользуются формулой [2]

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l, \quad (12)$$

где ε_l – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы.

Формула ((12) получена на основе обобщения различных опытных данных в интервалах чисел Re от 10^4 до $5 \cdot 10^6$ и Pr от 0,6 до 2500. за определяющую температуру здесь принята средняя температура жидкости, а за определяющий размер – диаметр трубы.

Коэффициент $\varepsilon_l = 1$, если $l/d > 50$. При $l/d < 50$ необходимо учитывать влияние теплового начального участка.

На основании анализа расчетов коэффициентов теплоотдачи в трубной полости разработана алгоритмическая модель расчета для судовых охладителей, представленная на рисунке 1.

Расчет гидравлического сопротивления в трубной полости

Анализ режимов работы охладителей масла и воды показал, что режимная характеристика течения охлаждающей жидкости в трубной полости находится в пределах $Re > 2000$. Поэтому из анализа расчетных формул для определения коэффициентов сопротивления трения принято уравнение

$$\lambda = 0,0173 + 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot Re, \quad (13)$$

для режимов $2 \cdot 10^3 \leq Re \leq 4 \cdot 10^3$.

Для режимов $Re > 4 \cdot 10^3$ использована формула [11]

$$\lambda = \frac{1}{(1,82 \lg Re - 1,64)^2}. \quad (14)$$

Потеря давления на преодоление местных сопротивлений $\Delta P_{мес}$, которые встречаются по пути движения потока воды в аппарате, связаны с ударами, расширениями и сужениями потока при входе и выходе его в патрубках

$$\Delta P_{мес} = \left(\sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{\rho w^2}{2}, \quad (15)$$

где $\frac{\rho w^2}{2}$ – скоростной, динамический напор, Па;

$\sum_{i=1}^n \zeta_i$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений, зависящая исключительно от конструкции охладителя и его элементов. Значения коэффициентов местных сопротивлений приведены в таблице 1.

При входе потока в прямую трубу постоянного поперечного сечения (рисунок 2) явление определяется двумя параметрами: относительной толщиной δ_1/d_b стенки входной кромки трубы и относительным расстоянием b/d_b от обреза трубы до стенки, в которую она заделана.

Значения местных сопротивлений при входе охлаждающей жидкости в трубную полость приняты в соответствии с [11] рисунок 3 и аппроксимированы уравнениями вида $\zeta = a \cdot e^{-c \cdot \delta_1/d_b}$ (таблица 2).

Таблица 1 – Коэффициенты местных сопротивлений

Наименование	Значение
Вход и выход в патрубках	1,5
Поворот на 180° при переходе из одного пучка трубок в другой	2,5
Выход из трубной полости	1,0

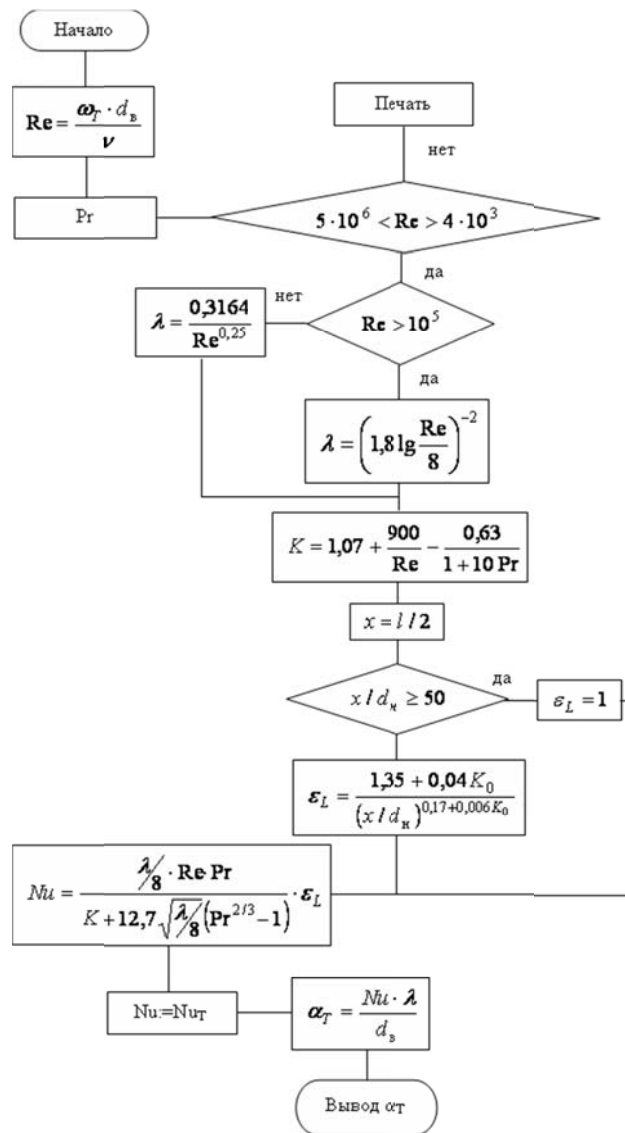


Рисунок 1 – Алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи в трубном пространстве

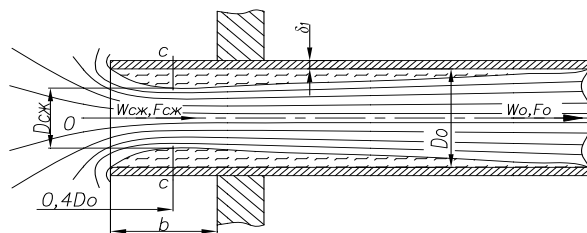


Рисунок 2 – Схема потока при входе в трубную полость

Таблица 2 – Уравнения для расчета местных сопротивлений при входе охлаждающей жидкости в трубную полость

b / d_B	0,002	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3
a	0,5415	0,5731	0,6129	0,6554	0,7219	0,7978	0,8809	0,9366
c	2,215	3,8856	5,3724	6,9608	9,3656	11,207	12,863	14,005

При конической развальцовке (рисунок 4), коэффициент местного сопротивления определяется из рисунка 5 и аппроксимирован уравнением

$$\zeta = -145085(R / d_B)^6 + 79983(R / d_B)^5 - 15787(R / d_B)^4 + 1208,4(R / d_B)^3 + 7,2839(R / d_B)^2 - 7,3924(R / d_B) + 0,5 \quad (16)$$

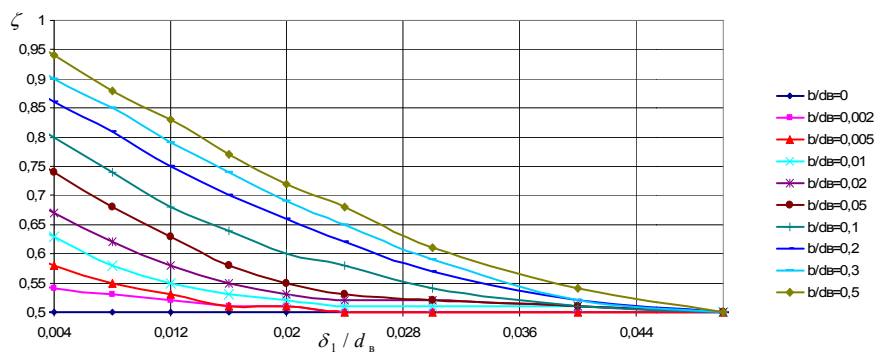


Рисунок 3 – Изменение коэффициента местного сопротивления при входе потока в трубную полость

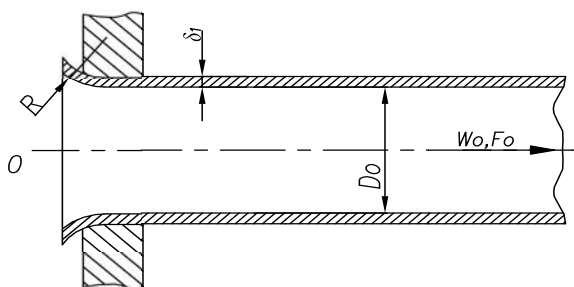


Рисунок 4 – Коническая развальцовка входного участка трубы

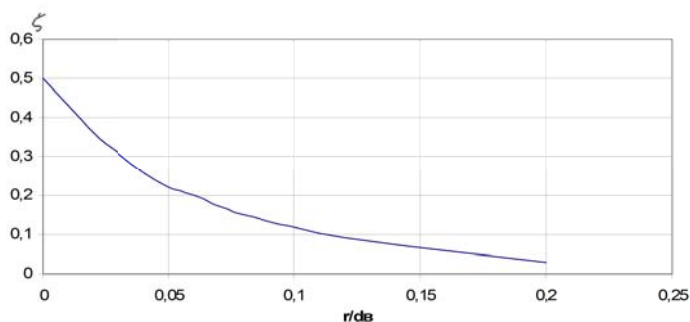


Рисунок 5 – Изменение коэффициента местного сопротивления при конической развальцовке входного участка трубы

Наиболее значительное уменьшение сопротивления имеет место в случае входа потока через плавный коллектор, очерченный по дуге кривой (рисунок 4). Так, например, для кругового коллектора с относительной величиной радиуса закругления $R/d_b=0,2$ коэффициент сопротивления ζ снижается до 0,04–0,05 вместо $\zeta=1,0$ при $R/d_b=\delta_1/d_b=0$ (острая кромка).

При автоматической сварке плотным швом с конической раззенковкой в трубной решетке с наружной стороны (рисунок 6), коэффициент местного сопротивления определяется графиком представленным на рисунке 7 и аппроксимирован уравнениями, которые сведены в таблице 3.

Сравнительно малое сопротивление создается также при входе потока через коллекторы с прямыми образующими, оформленные в виде усеченного конуса (рисунок 6). Коэффициент сопротивления таких коллекторов зависит как от угла сужения α , так и от относительной длины l/d_b сужающегося участка. Каждой длине конического коллектора соответствует свое оптимальное значение α , при котором коэффициент сопротивления ζ принимает минимальное значение.

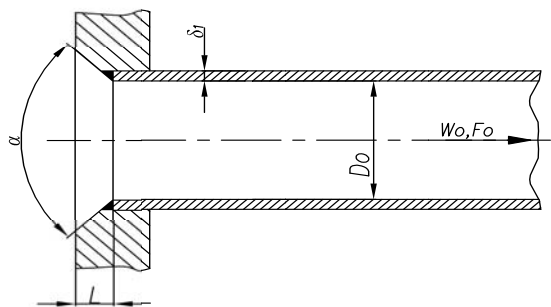


Рисунок 6 – Автоматическая сварка плотным швом с конической раззенковкой в трубной решетке с наружной стороны

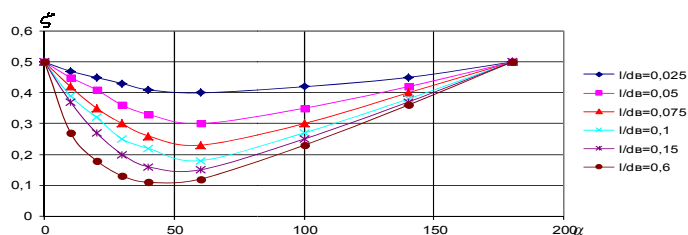


Рисунок 7 – Изменение коэффициента местного сопротивления при автоматической сварке с конической раззенковкой в трубной решетке

Таблица 3 – Уравнения для расчета местных сопротивлений при входе охлаждающей жидкости в трубную полость

l/d_B	ζ
0,025	$0,0032\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,0329\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,1374\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,2058\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,05	$-0,001\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,0256\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,2101\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,3792\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,075	$0,0056\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,0831\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,39\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,5789\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,1	$0,0126\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,1362\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,5321\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,7188\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,15	$0,0277\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 0,2444\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 0,7898\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 0,9283\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,5$
0,6	$-0,0403\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^5 + 0,362\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 - 1,2342\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 + 2,0269\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 - 1,4811\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) + 0,49$

Остальные местные сопротивления принимаются на основании многолетних испытаний судовых охладителей масла и воды [3].

Заключение

Для обеспечения высокого качества проектирования теплообменных аппаратов необходимо повысить точность теплогидродинамического расчета, чтобы он наиболее полно отражал конструктивные характеристики судовых охладителей масла и воды. Для этого был выполнен обзор и анализ уравнений для расчета коэффициента теплоотдачи и гидравлических сопротивлений по трубной полости с целью оценки возможности применения последних исследовательских достижений в алгоритмических модулях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов, Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах/ Б.С. Петухов. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.
2. Михеев, М.А. Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
3. Копачинский, П.А. Судовые охладители и подогреватели жидкостей/ П.А. Копачинский, В.П. Тараскин. – Л.: Судостроение, 1968. – 244 с.
4. Федоровский, К.Ю. Исследование теплопередачи в экологически безопасных системах охлаждения энергоустановок морских объектов / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская, В.А. Тимофеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — Орел, 2016. — № 34.— С. 105– 114.
5. Сырцов, Л. А. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена на основе теории подобия / Л. А. Сырцов, И. В. Наумчик, А. В. Хорошавин // Труды военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. — 2015. — № 649. — С. 198–204.
6. Медведев, В. В. Интенсификация теплообмена в трубном пространстве и повышение надежности судовых теплообменных аппаратов / В. В. Медведев, М. В. Лакиза // Судостроение. — 2015. — №5. — С. 40–42.
7. Луданов, К.И. Обобщенные методы теплового расчета кожухотрубных теплообменников–рекуператоров / К.И. Луданов // Альтернативная энергетика и экология. — 2013. — №15(137). — С. 17–28.
8. Чабаева, Е.А. Критерии эффективности теплообменников / Ю.А. Чабаева, А.П. Булеков, В.Б. Сажин, И.А. Попов, А.А. Беднякова // Успехи в химии и химической технологии. — 2012. — № 5(134). — С. 112–115.
9. Młynarczak, A. Box coolers as an alternative to existing cooling systems / A. Młynarczak // Scientific Journals Maritime University of Szczecin. — 2013. — nr. 36 (108) z. 2. — Pp. 131–136.
10. Охладители масла и воды кожухотрубные с прямыми трубками. Технические условия // ОСТ 5.4254–86. — М., 1987. — 51 с.
11. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ И.Е. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

Аблаев Алим Рустемович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергоустановок морских судов и сооружений»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 8978-810-05-64
E-mail: ARAblaev@sevsu.ru

Аблаев Ремзи Рустемович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Старший преподаватель кафедры «Экономика предприятий»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 8978-801-91-41
E-mail: ablaev.expert@mail.ru

A.R. ABLAEV, R.R. ABLAEV

METHOD OF CALCULATION OF HEAT EMISSION AND HYDRAULIC RESISTANCE IN PIPE CAVITY OF SHIP COOLERS

Abstract. *An algorithm over of determination of coefficient of heat emission and hydraulic resistance is brought in pipe space for the ship coolers of butter and water in the computer-computer-integrated system.*

Keywords: *heat-exchange vehicle, heat emission, hydraulic resistance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Petuhov, B.S. Teploobmen I soprotivlenie pri laminarnom techenii jidkosti v trubah. M.: Energia, 1967.
2. Miheev, M.A., Miheeva, I.M. Osnovi teploperedachi. M.: Energia, 1977.
3. Kopachinskiy, P.A., Taraskin, V.P. Sudovie ohladiteli I podogrevateli jidkostey. L.: Sudostroenie, 1968.
4. Fedorovsky, K. Yu., N. K. Fedorovskaya, and V. A. Timofeev. "Issledovanie teploperedachi v ekologicheski bezopasnykh sistemah ohlagdeniya energoustanovok morskikh ob'ektov." *Fundamental'nie i prikladnye problemi tekhniki i tekhnologii* 34 (2016): 105-114.
5. Syrtsov, L. A., I. V. Naumchik, and A. V. Khoroshavin. "Eksperimental' noe issledovanie konvektivnogo teploobmena na osnove teorii podobiya." *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo* 649 (2015): 198-204.
6. Medvedev, V. V., and M. V. Lakiza. "Intensificaciya teploobmena v trubnom prostranstve I povishenie nadejnosti sudovih teploobmennih apparatov." *Sudostroenie* 5 (2015): 40-42.
7. Ludanov, K. I. "Obobshennye metody teplovogo rascheta kojuhotrubnih teploobmennikov-rekuperatorov" *Alternativnaya energetika i ekologiya* 15 (2013): 17-28.
8. Chabaeva, E. A., A. P. Bulekov, V. B. Sazhin, I. A. Popov, and A. A. Bednyakova. "Criterii effektivnosti teploobmennikov" *Uspеhi v himii i himicheskoy tekhnologii* 5 (2012): 112-115.
9. Młynarczak, A. "Box coolers as an alternative to existing cooling systems." *Scientific Journals Maritime University of Szczecin* 36(108) z. 2 (2013): 131-136.
10. Ohladiteli masla i vodi kojuhotrubniye s pryamymi trubkami. *Tekhnicheskie usloviya OST 5.4254-86*. M., 1987.
11. Idelchik, I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. M.: Mashinostroenie, 1992.

Ablaev Alim Rustemovich

Ph.D., Associate Professor
Sevastopol State University
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33
Ph.: 8978-810-05-64
E-mail: ARAblaev@sevsu.ru

Ablaev Remzi Rustemovich

Senior Lecturer
Sevastopol State University
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33
Ph.: 8978-801-91-41
E-mail: ablaev.expert@mail.ru

УДК 621.7, 681.3

В.Ю. ЛАВРИНЕНКО, А.В. КУРОВ, О.В. ЯКОВЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРА ПРИ ОСАДКЕ ЗАГОТОВОК С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ MOTION ANALYZE®BMSTU

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований процесса ударного деформирования при осадке цилиндрических заготовок стандартной бабой и специальной бабой копра с наполнителем в виде стальных шариков. Проведенный анализ процесса осадки заготовок с помощью разработанной программы анализа движения Motion Analyze®BMSTU позволил установить, что при использовании бабы копра с наполнителем имеет место увеличение продолжительности удара (в 1,3 раза), увеличение относительной деформации заготовок (в 1,3 раза) и уменьшение силы деформирования (в 1,2 раза) по сравнению со стандартной бабой копра.

Ключевые слова: ударное деформирование, осадка, баба молота с наполнителем, анализ движения объектов.

Введение

Программное обеспечение для анализа движения объектов на видео или последовательности изображений является важным средством для обработки результатов научных и инженерных исследований. Оно позволяет автоматически отслеживать объект и получать его кинематические характеристики.

В настоящее время для анализа видео и изображений широко применяют зарубежное программное обеспечение ТЕМА Motion («Image Systems», Швеция), ProAnalyst Xcitex («Xcitex Inc.», США) и другие. Данное программное обеспечение предназначено для анализа движущихся объектов на видео или последовательности изображений и позволяет вводить изображения или видео в программу, проводить автоматическое отслеживание и анализ с последующим получением таблиц и двух- и трехмерных графиков. Программное обеспечение позволяет получить следующие данные об исследуемом объекте: перемещение, скорость, ускорение, форма, размеры и другие параметры. Недостатком данных систем анализа движения является их высокая стоимость и малая доступность для учебных целей и проведения научных исследований.

На кафедре «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана программы Motion Analyze®BMSTU, которая позволяет проводить анализ кинематики и динамики движущегося объекта при обработке видеофайла в различных форматах (avi, mp4, mpeg, asf, mkv, rm, wmv). Задача сопровождения объекта в данной программе решена с помощью детерминистского метода сопровождения особых точек и вычисления оптического потока согласно алгоритму Лукаса–Канаде. При этом положение особых точек на первом кадре пользователь задает вручную или происходит автоматический поиск особых точек с помощью углового детектора Ши–Томаси из библиотеки OpenCV.

Главное окно пользовательского интерфейса программы Motion Analyze®BMSTU (рисунок 1) содержит панель меню, панель быстрого доступа, навигационную панель, рабочее пространство для размещения видеозаписей и диаграмм. Через панель меню осуществляется загрузка видеофайлов, сохранение результатов работы программы, перемотка активной видеозаписи и слежение за точками, добавление и удаление точек слежения, добавление диаграмм, отражающих траекторию, скорость и ускорение точек, настройка скорости воспроизведения видеозаписи и масштабирование. Навигационная панель позволяет удалять, скрывать и отображать видеозаписи и диаграммы на рабочем пространстве, а также выбирать активную видеозапись. Программа Motion Analyze®BMSTU позволяет определять и сохранять в виде таблиц (формат txt) или графиков (формат jpg) зависимости перемещения, скорости и ускорения объекта от времени.

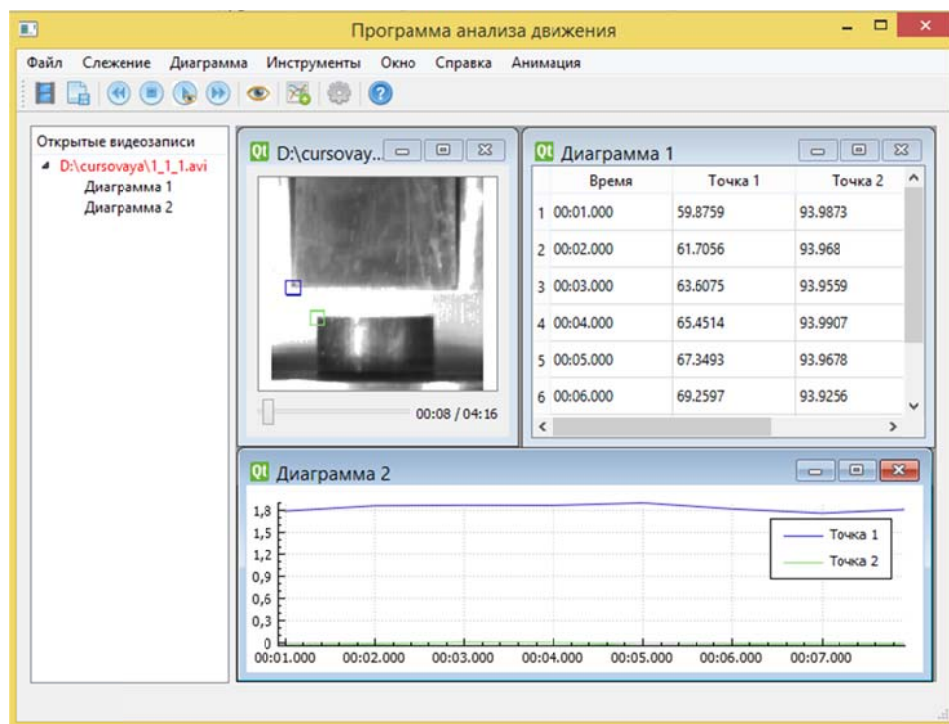


Рисунок 1 – Главное окно программы Motion Analyze®BMSTU

Особенностью программы является также возможность анализа процессов удара и определение силовых параметров процесса соударения различных объектов.

Исследовательская часть

С помощью разработанной программы анализа движения Motion Analyze®BMSTU было проведено исследование процесса удара при осадке цилиндрических свинцовых заготовок диаметром 26 мм и высотой 50 мм. Осадка заготовок проводилась на специальной экспериментальной установке, состоящей из вертикального копра и камеры скоростной видеосъемки FastVideo–250. Видеосъемка выполнялась с частотой 3000 кадров / с.

Для деформирования заготовок на копре были использованы: стандартная баба и специальная баба копра, выполненная пустотелой и заполненная металлическими шариками диаметром 12 мм [1].

Для обеспечения возможности сравнения результатов экспериментов по осадке со стандартной и специальной бабами их массы принимали одинаковыми и равными 22,4 кг. При этом отношения массы шариков к общей массе специальной бабы составляло 0,2 [2].

Стандартную и специальную бабы копра сбрасывали с высоты 2 м, которой соответствовала теоретическая энергия удара 437 Дж и теоретическая начальная скорость бабы при соударении 6,26 м/с.

Далее была проведена обработка файлов видео в формате avi, содержащих процесс осадки заготовки стандартной и специальной бабой копра, программой Motion Analyze®BMSTU.

Результаты исследований

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что высота заготовки при осадке стандартной бабой составила 21,2 мм (уменьшение высоты 4,8 мм, относительная деформация 18,5%), а при осадке специальной бабой с наполнителем – 19,9 мм (уменьшение высоты 6,1 мм, относительная деформация 23,4%) [2].

Для анализа процесса удара в программе Motion Analyze®BMSTU исходные файлы были загружены в данную программу. Далее были установлены кадры начала анализа, соответствующие моменту соударения бабы и заготовки, а также проведено задание масштаба измерения. Кроме этого, в автоматическом режиме были заданы точки слежения за перемещением бабы (рисунок 2).

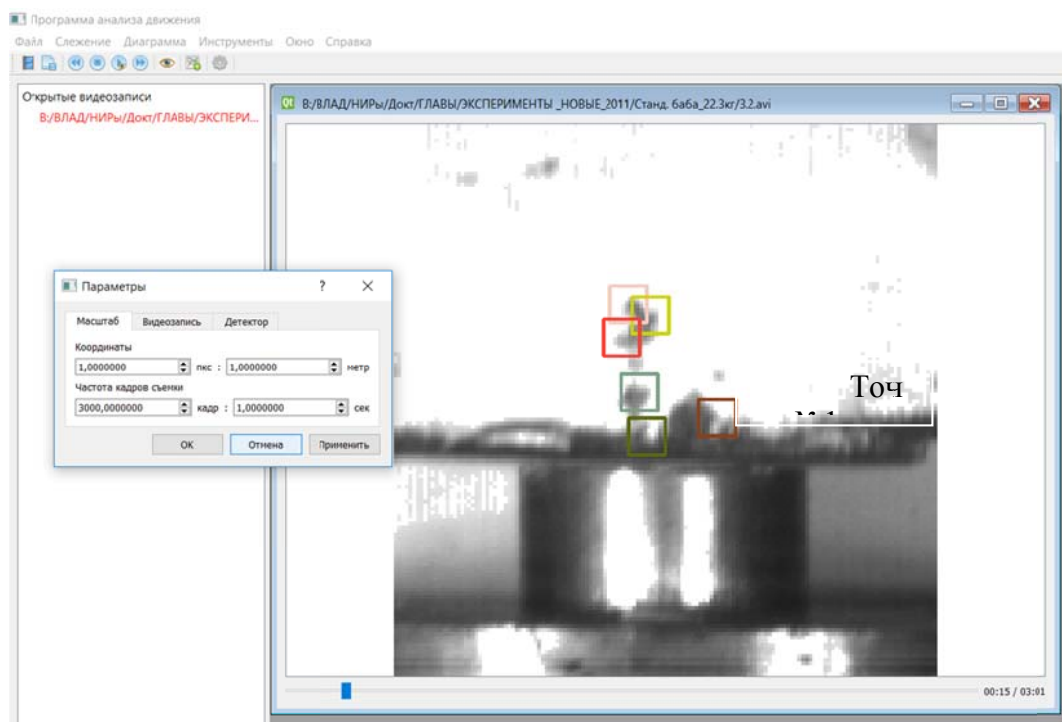


Рисунок 2 – Задание масштаба измерения и точек слежения за перемещением бабы копра в программе Motion Analyze®BMSTU

После этого в программе были получены графики зависимостей перемещения, скорости и ускорения стандартной и специальной бабы при осадке заготовки от времени для всех заданных точек слежения. Формат сохранения графиков – jpg. На рисунках 3 – 5 показаны данные зависимости для точки №1.

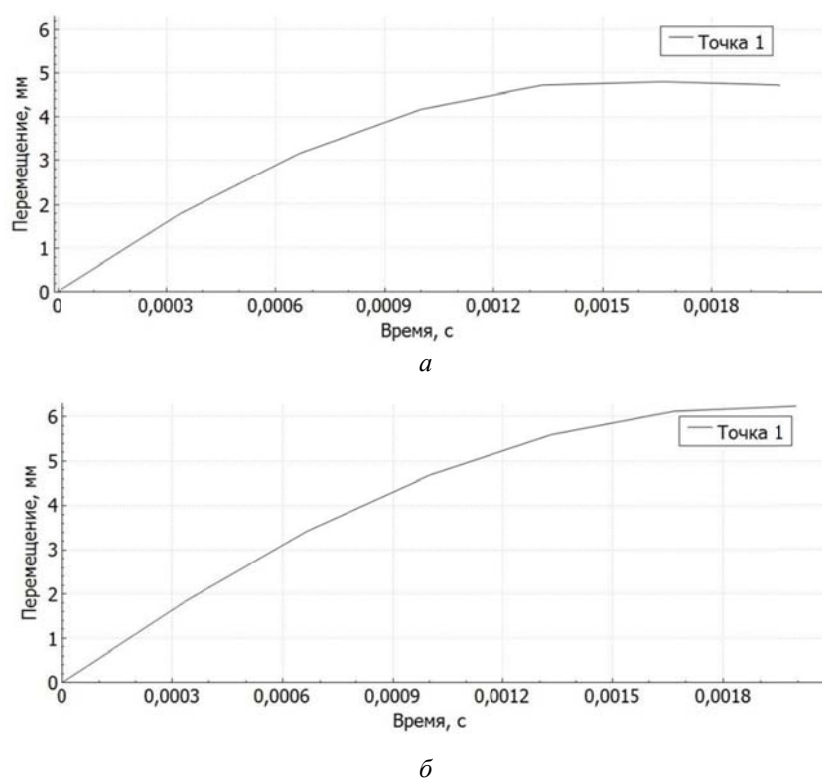
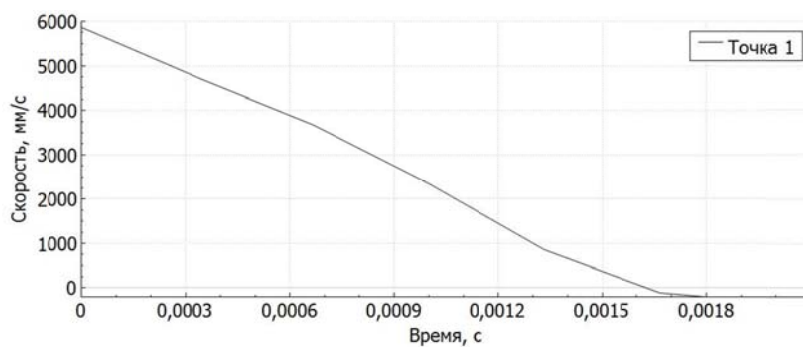
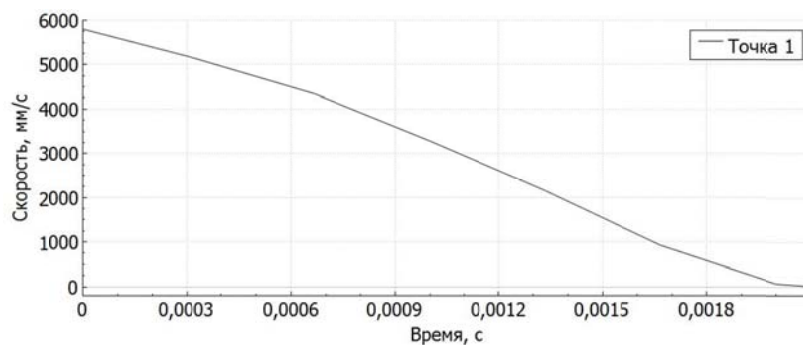


Рисунок 3 – Зависимость перемещения стандартной (а) и специальной (б) бабы копра при осадке заготовки от времени

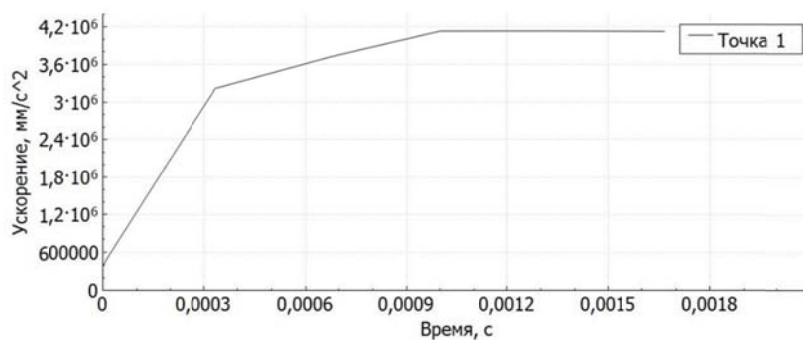


а

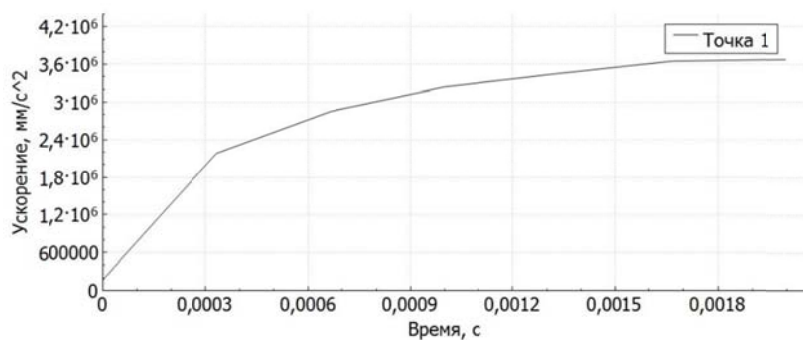


б

Рисунок 4 – Зависимость скорости стандартной (а) и специальной (б) бабы копра при осадке заготовки от времени



а



б

Рисунок 5 – Зависимость ускорения стандартной (а) и специальной (б) бабы копра при осадке заготовки от времени

В результате проведенного анализа полученных графиков можно отметить, что продолжительность нагрузочной фазы удара при применении стандартной бабы копра составила примерно 0,0016 с, а при применении специальной бабы копра – 0,0021 с (рисунок 3–5).

Наибольшее уменьшение высоты заготовки при осадке стандартной бабой составило 4,8 мм (относительная деформация 18,5%) (рисунок 3, а), а при осадке специальной бабой с наполнителем – 6,3 мм (относительная деформация 24%) (рисунок 3, б).

Можно отметить, что начальная фактическая скорость бабы копра при соударении составила 5,9 м/с (рисунок 4). Уменьшение скорости по сравнению с теоретической начальной скоростью бабы при соударении 6,26 м/с можно объяснить наличием трения в направляющих копра.

Также с помощью программы Motion Analyze®BMSTU были построены графики зависимости силы ударного деформирования от времени при осадке заготовок стандартной и специальной бабой копра (рисунок 6). При этом наибольшая сила деформирования стандартной бабой составила 95кН, специальной бабой – 80 кН.

Данные результаты хорошо согласуются с ранее полученными экспериментальными значениями относительной деформации и сил деформирования при осадке заготовок стандартной и специальной бабой копра [2, 3].

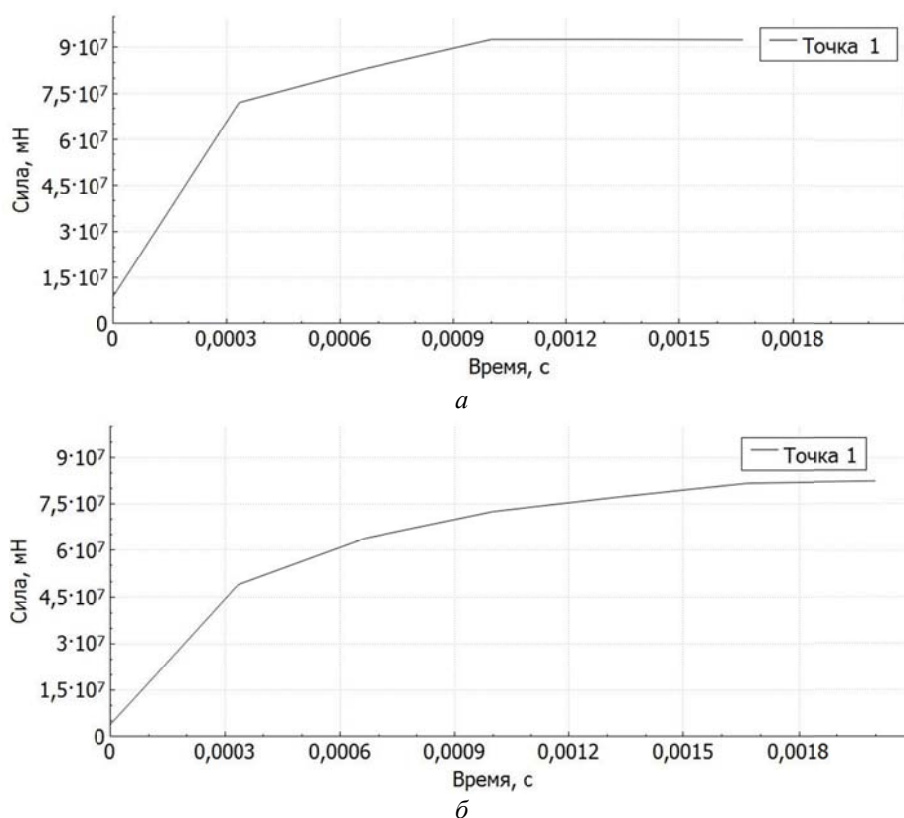


Рисунок 6 – Зависимость силы ударного деформирования при осадке заготовки стандартной (а) и специальной (б) бабой копра от времени

Выводы

1. Проведенные исследования процесса ударного деформирования при осадке заготовок с помощью разработанной программы анализа движения Motion Analyze®BMSTU позволили установить, что:

- продолжительность нагрузочной фазы удара увеличилась примерно в 1,3 раза при применении специальной бабы копра по сравнению с осадкой стандартной бабой;
- относительная деформация заготовок увеличилась примерно в 1,3 раза при применении специальной бабы копра по сравнению с осадкой стандартной бабой;

– сила деформирования снизилась примерно в 1,2 раза при применении специальной бабы копра по сравнению с осадкой стандартной бабой.

Данные результаты хорошо согласуются с ранее полученными значениями относительной деформации и сил деформирования при осадке заготовок стандартной и специальной бабой копра.

2. Высокая сходимость экспериментальных данных и результатов анализа процесса удара в программе анализа движения Motion Analyze®BMSTU позволяет рекомендовать программу для анализа движения объектов и определения их кинематических и динамических характеристик при проведении различных научных и прикладных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение РФ № 2438825. Баба молота / Феофанова А.Е., Демин В.А., Евсюков С.А., Лавриненко В.Ю., Семенов Е.И. опубл.10.01.2012. Бюл. № 1.
2. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Экспериментальные исследования процесса удара при осадке цилиндрических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 12–15.
3. Лавриненко, В.Ю. Определение сил деформирования и работы деформации при осадке на молотах // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 146–149.

Лавриненко Владислав Юрьевич
Московский государственный
технический университет им. Н.Э.
Баумана
Доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология
обработки материалов»
Тел.: +7 (499) 267–17–71
E-mail: vlavrinenko@bmstu.ru

Куров Андрей Владимирович
Московский государственный
технический университет им. Н.Э.
Баумана
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Программное
обеспечение ЭВМ и
информационные технологии»
Тел.: +7 (499) 263–60–94,
E-mail: avkur7@mail.ru

Яковлева Ольга Викторовна
Московский государственный
технический университет им. Н.Э.
Баумана
студент кафедры «Программное
обеспечение ЭВМ и
информационные технологии»
Тел.: +7 (499) 263–60–94,
E-mail: olg-199774@mail.ru

V.Yu. LAVRINENKO, A.V. KUROV, O.V. YAKOVLEVA

RESEARCH OF IMPACT PROCESS DURING UPSETTING OF BLANKS BY USING OF SOFTWARE MOTION ANALYZE®BMSTU

Abstract. Results of experimental research of upsetting of cylinder blanks on hammer with standard ram and ram with fillets are presented. The analyze of experimental data by using of developed software Motion Analyze®BMSTU allows to obtain the increasing of impact time (up to 1,3 times), increasing of deformation of blanks (up to 1,3 times) and decreasing of impact force (up to 1,2 times) by using of ram with fillets is obtained.

Keywords: impact deformation, upsetting, hammer with fillets, analyze of object motion.

BIBLIOGRAPHY

1. Patent na izobretenie RF № 2438825. Baba molota / Feofanova A.E., Demin V.A., Evsyukov S.A., Lavrinenko V.YU., Semenov E.I. opubl.10.01.2012. Byul. № 1.
2. Feofanova A.E., Lavrinenko V.YU. EHksperimentalnye issledovaniya processa udara pri osadke cilindricheskikh zagotovok // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii. 2012. № 2. S. 12–15.
3. Lavrinenko, V.YU. Opredelenie sil deformirovaniya i raboty deformacii pri osadke na molotah // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Vyp.1. Tula: Izd-vo TulGU, 2013. S. 146–149.

Lavrinenko Vladislav Yurievich
Bauman Moscow State Technical
University
Doctor of Tech. Science, Professor of
Department «Technology of material
working»
Tel.: +7 (499) 267–17–71
E-mail: vlavrinenko@bmstu.ru

Kurov Andrey Vladimirovich
Bauman Moscow State Technical
University
Candidate of Tech. Science, Assistant
of Professor of Department «Software
of PC and information technology»
Tel.: +7 (499) 263–60–94,
E-mail: avkur7@mail.ru

Yakovleva Olga Viktorovna
Bauman Moscow State Technical
University
Student of Department «Software of
PC and information technology»
Tel.: +7 (499) 263–60–94,
E-mail: olg-199774@mail.ru

УДК 621.82

Е.Н. КОРНЕЕВА, В.А. ГОРДОН, Ю.С. КОРНЕЕВ

ЗАДАЧА ПРОФИЛИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ДИСКА ПУСКОЗАЩИТНОЙ МУФТЫ

Аннотация: В работе рассмотрено профилирование рабочей поверхности регулирующего диска пускозащитной муфты, которое позволяет получить требуемый закон движения машины.

Ключевые слова: технологическая машина, муфта, функционал, профилирование.

Пускозащитные муфты [1] нашли широкое применение в машиностроении благодаря простоте и надежности работы, а правильный выбор профиля регулирующего диска позволяет получить требуемый закон движения рабочего органа технологической машины.

Форму рабочей поверхности регулирующего диска целесообразно выбирать из условий оптимального закона разгона машины, который должен задаваться из условия наименьших динамических нагрузок, а также заданного времени включения муфты.

Участок рабочей поверхности регулирующего диска, соответствующий неподвижному валу рабочей машины, не может быть выбран из соображений регулирования параметров разгона. На этом этапе важно обеспечить требуемое время безнагрузочного разгона электродвигателя, которое обычно определяют по угловой скорости двигателя. Целесообразно включать муфту (вращение ведомой части) на падающей ветви характеристики двигателя. В таком случае часть параметров должна находиться из условия, что кривая проходит через точки $(x=x_{вкл}; y=y_{вкл})$ и $(x=R_0; y=0)$. Остальные параметры профиля находятся так, чтобы действительный закон изменения угловой скорости ротора электродвигателя был близок к заданному. Оптимальные законы разгона приведены на рисунке 1.

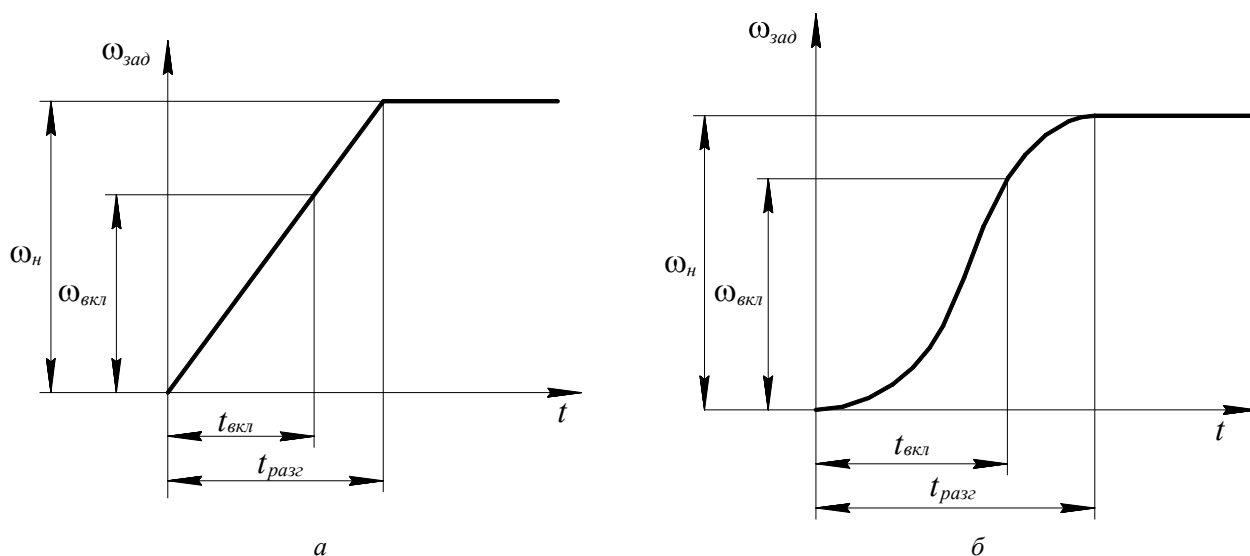


Рисунок 1 – Закон разгона ротора электродвигателя:

а) угловая скорость изменяется по прямой; б) угловая скорость изменяется по синусоидальному закону

Сначала рассмотрим случай, когда требуемая скорость меняется в общем случае по закону:

$$\omega_{зад} = \omega_{зад}(t).$$

Например, для случая 1,а: $\omega_{зад} = \frac{\omega_{вкл}}{t_{вкл}}t$. Для случая 1,б скорость выразим в виде:

$$\omega_{зад} = \omega_{вкл} \frac{1 - \cos \frac{\pi t}{t_p}}{1 - \cos \frac{\pi t_{вкл}}{t_p}}.$$

Профиль регулирующего диска необходимо выбрать таким образом, чтобы действительная скорость разгона ротора электродвигателя была близка к заданной. Для решения этой задачи воспользуемся теорией квадратичного приближения функции. Как известно из [2], для этого необходимо найти минимум следующего функционала:

$$\Phi = \int_0^{t_{\text{вкл}}} (\omega_{\text{зад}} - \omega_1)^2 dt. \quad (1)$$

При этом $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{зад}}(t)$, а угловая скорость ω_1 при безнагрузочном разгоне электродвигателя ($0 \leq t \leq t_1$) находится из уравнения:

$$(I_n + Ex^2) \frac{d\omega_1}{dt} = k_1 + k_2 \omega_1 - f'_A(F_{\min} + c_1 y)x - D, \quad (2)$$

где x и y – координаты теоретического профиля кривой.

Минимум функционала (1) можно найти путем составления и решения уравнений Эйлера для вариационной задачи [3]. Поскольку точного решения заданная вариационная задача не имеет, то воспользуемся приближенным решением по методу Ритца [3]. В этом случае значения функционала (1) надо рассматривать не на произвольных кривых данной задачи, а на некоторых линейных комбинациях заданной последовательности координатных функций, удовлетворяющей граничным условиям.

Пусть, например, для профилирования выбрана дуга окружности. Представим окружность в параметрическом виде (рисунок 2):

$$x = b + R \sin \psi; \quad y = a - R \cos \psi; \quad \begin{matrix} \psi_1 \rightarrow t_1; & \frac{\psi_1}{t_1} = \frac{\psi}{t}; & \psi = \frac{t}{t_1} \psi_1; \\ \psi \rightarrow t; & & \end{matrix}$$

где ψ_1 – наибольшее значение параметра ψ , соответствующее t_1 . Тогда

$$x = b + R \sin \frac{\psi_1 t}{t_1}; \quad (3)$$

$$y = a - R \cos \frac{\psi_1 t}{t_1}. \quad (4)$$

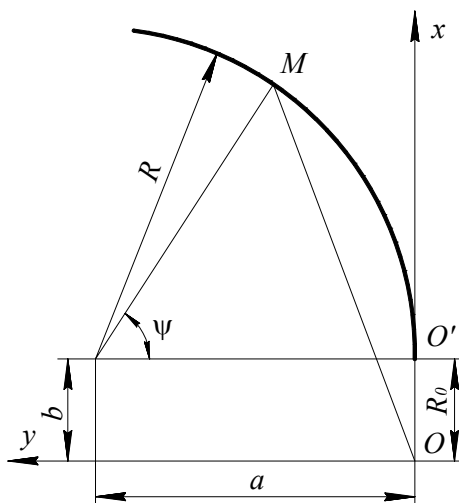


Рисунок 2 – Профилирование регулирующего диска

Рассмотрим профилирование регулирующего диска при безнагрузочном разгоне электродвигателя в пределах $0 \leq t \leq t_1$. Уравнения (3) и (4) должны удовлетворять граничным условиям, которые имеют вид: $x(0) = R_0$; $y(0) = 0$; $y(t_1) = y_1$; $R_0 = b + 0$; $b = R_0$; $0 = a - R$; $a = R$;

$$x = R_0 + R \sin \frac{\psi_1 t}{t_1}; \quad y = R - R \cos \frac{\psi_1 t}{t_1}.$$

Угол $\frac{\psi_1 t}{t_1}$ мал. Разложим синус и косинус в ряды и оставим первые члены:

$$\sin \frac{\Psi_1 t}{t_1} \approx \frac{\Psi_1 t}{t_1}; \quad \cos \frac{\Psi_1 t}{t_1} \approx 1 - 0,5 \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2;$$

$$x = R_0 + R \frac{\Psi_1 t}{t_1}; \quad y = R - R + 0,5 \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2 R = 0,5 R \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2.$$

Формула (2) примет вид:

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} = k_2 \omega_1 + k_1 - D - f'_A \left[F_{\min} + 0,5 c_1 R \left(\frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2 \right] \left(R_0 + R \frac{\Psi_1 t}{t_1} \right). \quad (5)$$

Это неоднородное линейное уравнение, решаемое следующим образом:

$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} - k_2 \omega_1 = 0; \quad \frac{I_n}{k_2} \frac{d\omega_1}{\omega_1} = dt; \quad \frac{I_n}{k_2} \int \frac{d\omega_1}{\omega_1} = \int dt; \quad \frac{I_n}{k_2} \ln \omega_1 = t + C,$$

поскольку $C = \text{const}$, можно взять любое постоянное число. Принимаем

$$C = \frac{I_n}{k_2} \ln C_3.$$

Тогда уравнение принимает вид: $\frac{I_n}{k_2} \ln \omega_1 = t + \frac{I_n}{k_2} \ln C_3$.

Для нахождения решения уравнения (5) используем метод вариации произвольной постоянной [3, 4]:

$$\frac{I_n}{k_2} \ln \frac{\omega_1}{C_3} = t; \quad \frac{\omega_1}{C_3} = e^{\frac{tk_2}{I_n}}; \quad \omega_1 = C_3 e^{\frac{tk_2}{I_n}}; \quad \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{dC_3}{dt} e^{\frac{tk_2}{I_n}} + \frac{k_2}{I_n} C_3 e^{\frac{tk_2}{I_n}}.$$

В окончательном виде решение принимает вид:

$$\omega_1 = \frac{1}{I_n} \left\{ f'_A F_{\min} R \frac{\Psi_1}{t_1} \frac{I_n}{k_2} t + 0,5 f'_A c_1 R R_0 \frac{\Psi_1^2}{t_1^2} \left(\frac{I_n}{k_2} t^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^2} t \right) + \right. \\ \left. + 0,5 f'_A c_1 R^2 \frac{\Psi_1^3}{t_1^3} \left(\frac{I_n}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right\}; \quad (6)$$

При $t = t_1$ шар перемещается по оси y на величину $y_1 = h$. Величина y_1 известна из предыдущего расчета:

$$y_1 = a - R \cos \frac{\Psi_1}{t_1} t_1 = R(1 - \cos \Psi_1), \quad \cos \Psi_1 = 1 - \frac{y_1}{R}; \quad \cos \Psi_1 \approx 1 - 0,5 \Psi_1^2; \quad 1 - \frac{y_1}{R} \approx 1 - 0,5 \Psi_1^2;$$

$$\Psi_1 = \sqrt{\frac{2y_1}{R}}; \quad \sin \frac{\Psi_1}{t_1} t \approx \frac{\Psi_1}{t_1} t.$$

$$\omega_1 = \frac{1}{I_n} \left\{ f'_A F_{\min} R \frac{\sqrt{\frac{2y_1}{R}}}{t_1} \frac{I_n}{k_2} t + 0,5 f'_A c_1 R R_0 \frac{\sqrt{\frac{2y_1}{R}}}{t_1^2} \left(\frac{I_n}{k_2} t^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^2} t \right) + \right. \\ \left. + 0,5 f'_A c_1 R^2 \frac{\sqrt{\frac{2y_1}{R}}}{t_1^3} \left(\frac{I_n}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right\} = \frac{1}{I_n} \left\{ f'_A F_{\min} \times \frac{\sqrt{2y_1 R}}{t_1} \frac{I_n}{k_2} t + \right. \\ \left. + f'_A c_1 R_0 \frac{y_1}{t_1^2} \left(\frac{I_n}{k_2} t^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^2} t \right) + f'_A c_1 \frac{y_1 \sqrt{2y_1 R}}{t_1^3} \left(\frac{I_n}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right\};$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_1}{dR} &= \frac{f'_A F_{\min} \sqrt{2y_1}}{t_1 k_2} \frac{1}{2} R^{-\frac{1}{2}} t + \frac{f'_A c_1 y_1 \sqrt{2y_1}}{t_1^3} \frac{1}{2} R^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) = \frac{f'_A \sqrt{2y_1}}{2t_1 \sqrt{R}} \left[\frac{F_{\min}}{k_2} t + \frac{c_1 y_1}{t_1^2} \left(\frac{1}{k_2} t^3 + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right]; \\ \Phi &= \int_0^{t_1} (\omega_{\text{зад}} - \omega_1)^2 dt; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial R} = 2 \int_0^{t_1} (\omega_{\text{зад}} - \omega_1) \frac{d\omega_1}{dR} dt = 0; \\ &\quad \int_0^{t_1} (\omega_{\text{зад}} - \omega_1) \frac{d\omega_1}{dR} dt = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

Раскрывая уравнение (7), получим выражение для искомого радиуса окружности:

$$R = \left(\frac{A_1 - A_4 - A_5}{A_2 + A_3 + A_6 + A_7} \right)^2, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_0^{t_1} \omega_{\text{зад}} \left[\frac{F_{\min}}{k_2} t + \frac{c_1 y_1}{t_1^2} \left(\frac{t^3}{k_2} + \frac{3I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6I_n^3}{k_2^3} t \right) \right] dt; \quad A_2 = \frac{2f'_A F_{\min}^2 \sqrt{y_1}}{3k_2 \sqrt{2}} t_1^3; \\ A_3 &= \frac{f'_A F_{\min} c_1 \sqrt{y_1^3}}{\sqrt{2} k_2 t_1}; \quad A_4 = \frac{f'_A F_{\min} c_1 R_0 y_1}{k_2} \left(\frac{t_1^3}{4k_2} + \frac{2I_n^2}{3k_2^2} t_1 \right); \\ A_5 &= \frac{f'_A c_1^2 R_0 y_1^2}{t_1} \left(\frac{t_1^3}{6k_2^2} + \frac{I_n^2}{k_2^3} t_1^2 + \frac{3I_n^2}{k_2^4} t_1 + \frac{4I_n^3}{k_2^5} \right); \quad A_6 = \frac{f'_A F_{\min} c_1 \sqrt{2y_1^3}}{k_2 t_1} \left(\frac{t_1^2}{4k_2} + \frac{I_n^2}{k_2^3} t_1 + \frac{3I_n^2}{k_2^4} \right); \\ A_7 &= \frac{f'_A c_1^2 \sqrt{2y_1^5}}{t_1^2} \left(\frac{t_1^4}{7k_2^2} + \frac{I_n^2}{k_2^3} t_1^3 + \frac{21I_n^2}{5k_2^4} t_1^2 + \frac{9I_n^3}{k_2^5} t_1 + \frac{12I_n^4}{k_2^6} \right). \end{aligned}$$

Величина A_1 определяется в зависимости от функции $\omega_{\text{зад}}$. Так, если $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{вкл}} t / t_{\text{вкл}}$,

, то

$$A_1 = \frac{\omega_{\text{вкл}}}{t_{\text{вкл}}} \left[\frac{F_{\min} t_1^3}{6k_2} + c_1 y_1 \left(\frac{t_1^3}{5k_2} + \frac{3I_n^2}{4k_2^2} t_1^2 + \frac{2I_n^2}{k_2^3} t_1 \right) \right].$$

При уточненном расчете следует величину R найти из следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} (I_n + Ex^2) \frac{d\omega_1}{dR} &= k_1 + k_2 \omega_1 - f'_A (F_{\min} + c_1 y) x - D; \\ \int_0^{t_1} (\omega_{\text{зад}} - \omega_1) \frac{d\omega_1}{dR} dt &= 0; \\ \cos \Psi_1 &= \frac{R - y_1}{R}; \\ \omega_{\text{зад}} &= \frac{\omega_{\text{вкл}}}{t_{\text{вкл}}} t, \text{ или } \omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{вкл}} \frac{1 - \cos \frac{\pi t}{t_p}}{1 - \cos \frac{\pi t_{\text{вкл}}}{t_p}}; \\ x &= R_0 + R \sin \frac{\Psi_1 t}{t_1}; \\ y &= R - R \cos \frac{\Psi_1 t}{t_1}. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Систему уравнений (9) можно решить только приближенно с использованием компьютерных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеева, Е.Н. Динамика безнагрузочного разгона механической пусковой муфты, применяемой в приводах транспортных машин // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт» / Е.Н. Корнеева, В.А. Гордон – Орел: ОрелГТУ 2008, № 1/17 (542). – С. 75–84.
2. Демидович, Б.П. Численные методы анализа/ Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368с.
3. Эльсгольц, Л.Э. Вариационное исчисление/Л.Э. Эльсгольц. – М.: КомКнига, 2006. – 205с.
4. Зельдович Я.Б. Элементы прикладной математики/ Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1967.

Корнеева Елена Николаевна
Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева, г.
Орел
Кандидат технических наук,
доцент
Тел.: 41–98–48

Гордон Владимир Александрович
Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева, г.
Орел
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Высшая
математика»
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41–98–48

Корнеев Юрий Степанович
Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева,
г. Орел
Кандидат технических наук,
доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе,
29
Тел.: 41–98–96

E.N. KORNEEVA, V.A. GORDON, Yu.S. KORNEEV

PROBLEM OF PROCESSING THE ADJUSTMENT DISK OF THE START-UP PROTECTIONAL CLUTCH

Abstract: *Is examined shaping the regulated disk of the start-up protectional clutch, which makes it possible to obtain the required law of the motion of the machine.*

Keywords: *Tecnological machine, clutch, functional, shaping.*

BIBLIOGRAPHY

1. Korneyeva, Ye.N. Dinamika beznagruzochnogo razgona mekhanicheskoy puskovoy mufty, primenyayemoy v privodakh transportnykh mashin // Izvestiya OrelGTU. Seriya «Stroitelstvo. Transport» / Ye.N. Korneyeva, V.A. Gordon – Orel: OrelGTU 2008, № 1/17 (542). – S. 75–84.
2. Demidovich, B.P. Chislennyye metody analiza/ B.P. Demidovich, I.A. Maron, E.Z. Shuvalova. – M.: Nauka, 1967. – 368s.
3. Elsgolts, L.E. Variatsionnoye ischisleniye/L.E. Elsgolts. – M.: KomKniga, 2006. – 205s.
4. Zeldovich YA.B. Elementy prikladnoy matematiki/ YA.B. Zeldovich, A.D. Myshkis. – M.: Nauka, 1967.

Korneeva Elena Nikolaevna
Orel state University. I. S. Turgenev,
Orel
Candidate of technical Sciences,
associate Professor
Tel: 41–98–48

Gordon Vladimir Alexandrovich
Orel state University. I. S. Turgenev,
Orel
Doctor of technical Sciences,
Professor, head of the Department
"Higher mathematics»
302020, Orel, Naugorskoe highway, 29
Tel: 41–98–48

Korneev Yuri Stepanovich
Orel state University. I. S. Turgenev,
Orel
Candidate of technical Sciences,
associate Professor
302020, Orel, Naugorskoe highway, 29
Tel: 41–98–96

УДК: 621.9

Г.В. БАРСУКОВ, О.Г. КОЖУС, А.Ю. ВИНОКУРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОЙ СПОСОБНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ АБРАЗИВОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

Аннотация. В работе проведено сравнение физико–механических свойств зерен отвалных шлаков цветного производства и гранатового песка по параметру твердость методом царапания. Для оценки разработали методику с использованием стандартизированного тестера для определения абразивного сопротивления PEI/300/B/2 производства «Ceramic Instruments s.r.l.». По полученным зависимостям проведено сравнение абразивной способности гранатового абразива с абразивным материалом из отвалных шлаков цветного производства.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, абразив, абразивная смесь, истирание, отвалные шлаки цветного производства, гранатовый песок

Введение

Технологические параметры гидроабразивного резания зависят от характеристик и свойств абразивного материала, его строения, прочности, содержания и характера примесей[1].

На операциях гидрорезки чаще всего используют минеральные абразивы, которые можно разделить на две большие группы искусственные и естественные (природные) [2].

Физико–механические свойства искусственных абразивов более стабильны, чем у естественных, поэтому применение последних ограничено. Естественные абразивы применяются в промышленности и изготавливаются из минералов и горных пород.

К искусственным абразивным материалам относятся: эльбор (кубический нитрид или его модификация), карбид бора, карбид кремния, электрокорунд (нормальный, белый, хромистый и титанистый), монокорунд.

Ряд естественных абразивных материалов составляют: гранат, кремнь, корунд (кристаллическая окись алюминия), алмаз.

Основной параметр абразивного материала – его твердость, количественно оцениваемая по микротвердости и по десятибалльной шкале Мооса (в 10 баллов). Твердость материала свыше 7 считается высокой, 5–7 – средней, меньше 5 – низкой.

Твердость материалов для гидроабразивной резки, их прочность и строение объединены общим понятием работоспособности – абразивной работоспособностью, которая определяется величиной суммарного съема материала вплоть до полной потери его работоспособности. Эта величина во многом зависит от изнашивания и физико–механических характеристик обрабатываемого материала.

Влияние абразива на гидроабразивное резание

При гидроабразивном резании большое значение имеют не только физико–механические свойства абразивного материала, но и форма абразивных зерен, а также состояние их режущих кромок [3]. Основными геометрическими параметрами, определяющими режущие способности абразивного зерна, являются форма зерен, число вершин (режущих кромок) зерна, углы при вершинах и радиусы скругления вершин. Известно, что форма зерна в значительной степени зависит от условий кристаллизации, роста кристаллов и их структуры. Многие кристаллы искусственного происхождения не имеют правильной геометрической формы. Даже природные абразивные материалы часто не являются кристаллами правильной формы. Кроме того, кристаллы таких распространенных абразивных материалов, как электрокорунд и карбид кремния, не имеют плоскостей спайности. Вследствие этого при их дроблении не обеспечивается получение однородной и определенной формы зерен. Абразивные зерна имеют, как правило, неправильную геометрическую форму. Часто они представляют собой сопряженные многогранники, у

которых выступающие заостренные части различаются как по форме, так и по величине. Заостренные части зерен являются режущими элементами, которые при движении оказывают скользящее действие на поверхность обрабатываемого более мягкого материала.

Встречаются зерна, форма которых подобна октаэдру, тригональному трапецоиду, ромбическому тетраэдру, трехгранной призме, шаровидным многогранникам. Некоторые из зерен бывают удлиненными, иглообразными, мечевидными, пластинчатыми. Зерна карбида кремния зеленого имеют гладкую поверхность граней, больше прямолинейных режущих кромок и более сложную и разнообразную их конфигурацию, зерна электрокорунда шероховатую поверхность и более простую конфигурацию. Зёрна игольчатые, пластинчатые быстро разрушаются, так как имеют недостаточную прочность. Зерна неправильной формы, обычно являющиеся соединениями двух и более зерен, также имеют малую прочность и быстро разрушаются при работе. Сегодня, самым часто используемым абразивным материалом для гидроабразивного резания является гранатовый песок, который имеет массу преимуществ по сравнению с другими (бесперебойная подача абразива в сопло установки гидроабразивной резки; большая плотность, высокая режущая способность и остроугольная форма гранул позволяют добиться оптимального баланса между скоростью резки и высоким качеством обрабатываемой поверхности и т.д.) [4].

Гранатовый песок – является твердым и тяжелым абразивом с удельным весом 4,1 – 4,3 г/см³., твердость 7,5 ед. по шкале Мооса. Твердость абразивного граната связана с кристаллическим строением и обеспечивает высокое сопротивление к разрушению. Благодаря этой способности гранатовый абразив является очень устойчивым к разрушению. Самым большим недостатком гранатового песка является его дороговизна [5–6].

Одним из путей повышения эффективности гидроабразивного резания является подбор абразива, позволяющего снизить себестоимость процесса [7]. Для таких целей все чаще стали использовать абразивные материалы цветной металлургии, например, шлаки медного производства, которые являются дешевыми по сравнению с гранатовым песком, [8]. Однако за счет относительно небольшой твердости таких материалов (6 ед. по шкале Мооса), можно выделить следующие недостатки: низкая производительность и невысокое качество резки.

Существуют методы, позволяющие улучшить физико–механические характеристики абразивных материалов из отвальных шлаков цветного производства, что в последствие обеспечит необходимые требования по скорости резки и точности обработки. К ним можно отнести: дробление в струйной мельнице, нагревание в электропечах до температуры 1100–1200 °С с последующим охлаждением до 20°С [9] и др.

Для того, чтобы применить какой–либо из методов, необходимо сделать оценку улучшения абразивной способности таких материалов, которая напрямую зависит от их твердости и определяется методом царапания, т.е. способностью одного тела царапаться другим более твердым телом.

Поэтому было проведено сравнение физико–механических свойств зерен отвальных шлаков цветного производства и гранатового песка по параметру твердость методом царапания.

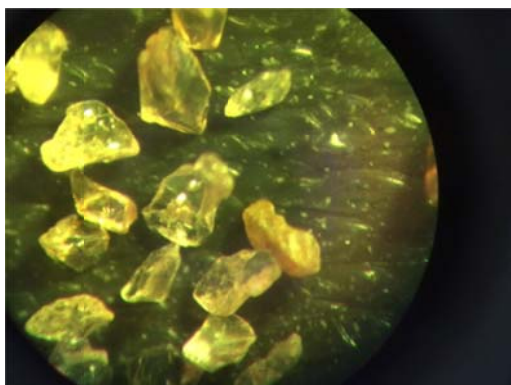
Эксперимент

Для оценки разработали методику с использованием стандартизированного тестера для определения абразивного сопротивления PEI/300/B/2 производства «Ceramic Instruments s.r.l.» (рисунок 2).

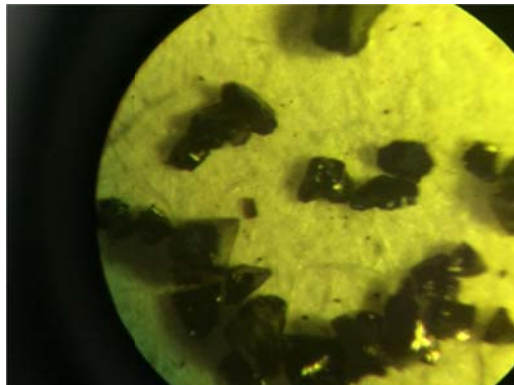
Фото образцов гранатового песка и абразивных материалов из отвальных шлаков цветного производства в объективе металлографического микроскопа АЛЬТАМИ МЕТ 1С представлены на рисунке 1.

Установка состоит из основной несущей плиты, приводимая в движение валом, обеспечивающим вращение плиты с заданной угловой скоростью (в соответствии с ГОСТ 27180–2001[10] – 300 1 об/мин) с заданным эксцентриситетом (в соответствии с ГОСТ

27180–2001[10] – 22,5 мм) и металлических накладок с резиновыми шайбами, прижимающие контрольные образцы к несущей плите. Резиновые шайбы ограничивают площадь стеклянного контрольного образца равную 54,0 см² и предназначены для заполнения абразивной смесью. Одновременно испытывали три образца.



а



б

Рисунок 1 – Фото образцов абразивных материалов в объективе металлографического микроскопа АЛЬТАМИ МЕТ 1С:

а – гранатовый песок; б – абразивный материал из отвальных шлаков цветного производства



Рисунок 2 – Абразиметр «Ceramic Instruments s.r.l.»

Методика испытаний аналогична методике определения износостойкости глазированных плиток, изложенной в ГОСТ 27180–2001 «Плитки керамические. Методы испытаний» [10], за исключением используемого абразива и образца, подвергаемого абразивному истиранию. Вместо применяемого по ГОСТ 27180–2001 корунда искусственного с зернами размером от 0,125 до 0,160 мм использовали абразивные материалы из отвальных шлаков цветного производства, а вместо керамической плитки – стекло листовое бесцветное ГОСТ Р 54170–2010, толщиной 3 мм.

Суть проведения эксперимента сводится к следующему. Стеклянные контрольные образцы с размерами сторон 100 ± 1 мм маркируем цифрами «1» и «2», где «1» – образец,

подверженный истиранию гранатовым песком, а «2» – образец подверженный истиранию абразивным материалом из отвалных шлаков цветного производства. Испытание включает в себя подвержение стеклянного материала абразивному воздействию смеси, содержащей металлические шарики разного диаметра, с добавлением, в первом случае – гранатового песка, а во втором случае – абразивных материалов из отвалных шлаков цветного производства и дистиллированной воды (метод PEI, Стандарт UNI EN ISO 10545–7 «Определение поверхностной износостойкости глазурированного материала»). Поверхностная износостойкость – это способность поверхности противостоять абразивным воздействиям». Различные стадии истирания достигаются путем программирования машины на большое число оборотов с фиксированной скоростью инструмента.

Поместим в шайбу абразивную смесь следующего состава:

№1 (с добавлением гранатового песка) Смесь стальных шариков массой 175 г, в том числе:

диаметром 1 мм	– 8,7 г (5%)
диаметром 2 мм	– 43,8 г (25%)
диаметром 3 мм	– 52,5 г (30%)
диаметром 5 мм	– 70,0 г (40%)
гранатовый песок	– 3,0 г
дистиллированная вода	– 20 см ³ .

№2 (с добавлением абразивного материала из отвалных шлаков цветного производства) Смесь стальных шариков массой 175 г, в том числе:

диаметром 1 мм	– 8,7 г (5%)
диаметром 2 мм	– 43,8 г (25%)
диаметром 3 мм	– 52,5 г (30%)
диаметром 5 мм	– 70,0 г (40%)
абразивный материал из зерен отвалных шлаков цветного производства	– 3,0 г
дистиллированная вода	– 20 см ³ .

В обоих случаях задаем одинаковое количество оборотов равное – 2500, после чего извлекаем стеклянные образцы, промываем их в проточной воде и высушиваем.

Вторая часть эксперимента заключается в определении оптической плотности истираемого стекла гранатовым песком и абразивным материалом из отвалных шлаков цветного производства по вышеописанной методике. Оптическая плотность – это мера непрозрачности слоя вещества для световых лучей, равна десятичному логарифму отношения потока излучения F_0 , падающего на слой, к ослабленному в результате поглощения и рассеяния потоку F , прошедшему через этот слой:

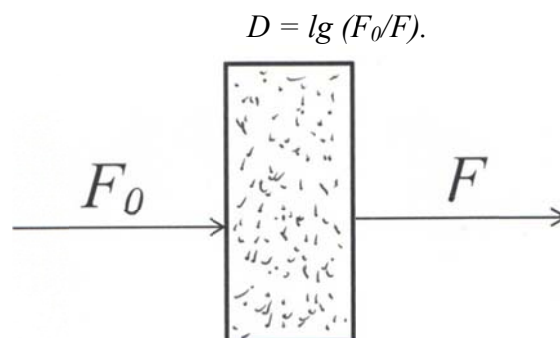


Рисунок 3 – Схема падающего и исходящего потока излучения

Для эксперимента используем устройство Спектрофотометр СФ–46, предназначенное для измерения коэффициентов пропускания жидких и твердых прозрачных веществ в

области спектра от 190 до 1100 нм (рисунок 4). В основу его работы положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец и потока, падающего на исследуемый образец (или прошедшего через контрольный образец).



Рисунок 4 – Спектрофотометр СФ-46

Из подверженных абразивному истиранию образцов вырезаем новые образцы с размерами сторон 40 ± 1 мм, вставляем их в спектрофотометр. Затем, установив длину волны $\lambda = 360$, определяем оптическую плотность каждого образца в диапазоне от 360 до 700 нм с шагом равным 5 нм.

Выводы

Экспериментальные данные представлены в виде графика зависимости измеренной оптической плотности от длины волны.

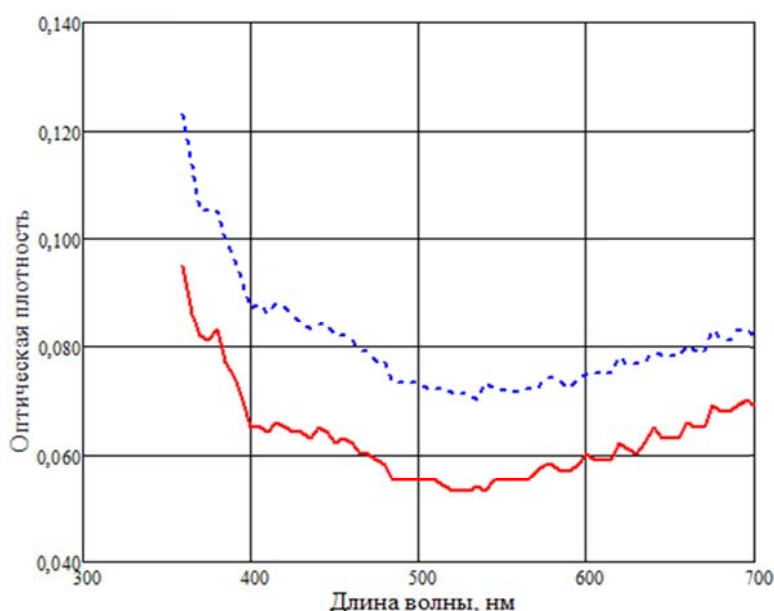


Рисунок 5 – ---- – кривая 1, оптическая плотность образца, подверженного истиранию гранатовым песком; ——— – кривая 2, оптическая плотность образца, подверженного истиранию абразивным материалом из отвалных шлаков цветного производства

Способность материалов пропускать свет количественно определяется величиной оптической плотности. Чем выше оптическая плотность, тем меньше излучения проходит через образец.

Таким образом, параметр твердость по методу царапания возможно определить по оптической плотности. Чем этот показатель выше, тем выше твердость абразива.

По полученным зависимостям оптической плотности от длины волны (рисунок 5) видно, что гранатовый песок обладает более лучшей абразивной способностью, определяемой по методу царапания в сравнении с абразивным материалом из отвалных шлаков цветного производства, примерно на 20%, что соответствует потере производительности гидроабразивной резки при использовании шлаков на 20%. Поэтому о режущей способности абразива можно судить по показателю твердости, определяемому методом царапания с использованием разработанной нами методики. Стабильность полученных результатов на каждом участке длины волны, говорит нам об адекватности разработанной методики определения параметра твердость методом царапания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // Известия высших учебных заведений «Машиностроение». – 2011. – № 4. – С. 46 – 54.
2. Барсуков, Г.В. Исследование режущей способности наномодифицированного абразива из отходов цветного производства для гидроабразивного резания материалов / Барсуков Г.В., Кожус О.Г. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – №. 2. – С. 79–86.
3. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Increasing Of Efficiency Of Environmentally Friendly Technology Of AWJ Of A Glass Fiber Plastic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 012001.
4. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Quality of Hydroabrasive Waterjet Cutting Machinability // Procedia Engineering. – 2017. – Т. 206. – С. 1034–1038.
5. Степанов, Ю. С. Разработка технологических приемов раскроя деталей из стеклотекстолита гидроабразивной струей / Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Кожус О.Г. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – №. 2. – С. 267–274.
6. Барсуков, Г.В. Разработка технологии модификации вторичных техногенных абразивных материалов для гидроабразивного резания / Г.В. Барсуков, А.А. Александров, К.Ю. Фроленков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 3–2. – 2013. – С. 82 – 90.
7. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 1. – С. 9 – 14.
8. http://www.uralgri.com/abrazivnie-poroshki/products/nikel_shlak/.
9. Перемышев В. В., Шумячер В. М. О влиянии физико-механических свойств абразивного материала на эксплуатационные показатели // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – 2001. – С. 66–67.
10. ГОСТ 27180–2001: Плитки керамические. Методы испытаний (введен в действие постановлением Госстроя РФ от 6 сентября 2001 г. N 108).

Барсуков Геннадий Валерьевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»
г. Орел
доктор технических наук, профессор кафедры
машиностроения
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (4862) 413295
E-mail: awj@list.ru

Кожус Ольга Геннадьевна

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»
г. Орел
вед. инж. Отдела организационного сопровождения НИР
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (4862) 413295
E-mail: okozhus@mail.ru

Винокуров Андрей Юрьевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел, доцент
кафедры промышленной химии
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (4862) 413295
E-mail: chemistry@ostu.ru

G.V. BARSUKOV, O.G. KOZHUS, A.Yu. VINOKUROV

INVESTIGATION OF ABRASIVE ABILITY OF ARTIFICIAL AND NATURAL ABRASIVES PROVIDING THE PRODUCTIVITY OF ABRASIVE WATERJET CUTTING

Abstract. *The paper compares the physico-mechanical properties of grains of dump slags of color production and garnet sand by the hardness parameter using the scratching method. For evaluation, a technique was developed using a standardized tester for determination of abrasion resistance PEI / 300 / B / 2 manufactured by Ceramic Instruments s.r.l. According to the obtained dependences, the abrasive ability of garnet abrasive with abrasive material from color-cured slag was compared.*

Keywords: *waterjet cutting, abrasive, abrasive compound, abrasion, dumping slag stained production, garnet sand*

BIBLIOGRAPHY

1. Galinovskiy, A.L. Minimizatsiya tekhnologicheskoy sebestoimosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetoм stoimostnykh i tekhnologicheskikh parametrov protsessa obrabotki / A.L. Galinovskiy, V.A. Tarasov, V.M. Yelfimov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy «Mashinostroyeniye». – 2011. – № 4. – S. 46 – 54.
2. Barsukov, G.V. Issledovaniye rezhushchey sposobnosti nanomodifitsirovannogo abraziva iz otkhodov tsvetnogo proizvodstva dlya gidroabrazivnogo rezaniya materialov /Barsukov G.V., Kozhus O.G. //Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2016. – №. 2. – S. 79–86.
3. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Increasing Of Efficiency Of Environmentally Friendly Technology Of AWJ Of A Glass Fiber Plastic //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – T. 50. – №. 1. – S. 012001.
4. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Quality of Hydroabrasive Waterjet Cutting Machinability //Procedia Engineering. – 2017. – T. 206. – S. 1034–1038.
5. Stepanov, YU. S. Razrabotka tekhnologicheskikh priyemov raskroya detaley iz steklo tekstolita gidroabrazivnoy struyey / Stepanov YU.S., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Kozhus O.G. //Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solovyeva. – 2017. – №. 2. – S. 267–274.
6. Barsukov, G.V. Razrabotka tekhnologii modifikatsii vtorichnykh tekhnogennykh abrazivnykh materialov dlya gidroabrazivnogo rezaniya / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov, K.YU. Frolenkov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – № 3–2. – 2013. – S. 82 – 90.
7. Barsukov, G.V. Opredeleniye proizvoditelnosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetoм kharakteristik abrazivnogo zerna / G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. – 2008. – № 1. – S. 9 – 14.
8. http://www.uralgrit.com/abrazivnie-poroshki/products/nikel_shlak/.
9. Peremyshchev V. V., Shumyacher V. M. O vliyaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv abrazivnogo materiala na ekspluatatsionnyye pokazateli //Protsessy abrazivnoy obrabotki, abrazivnyye instrumenty i materialy. – 2001. – S. 66–67.
10. GOST 27180–2001: Plitki keramicheskiye. Metody ispytaniy (vveden v deystviye postanovleniyem Gosstroya RF ot 6 sentyabrya 2001 g. N 108).

Barsukov Gennady Valeryevich

Orel State University, Orel
Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department of Mechanical Engineering
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: + 7 (4862) 413295
E-mail: awj@list.ru

Kozhus Olga Gennadiyevna

Orel State University, Orel
Leading Engineer of the Department of Organizational
Support of Research
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: + 7 (4862) 413295
E-mail: awj@list.ru
okozhus@mail.ru

Vinokurov Andrey Yurievich

Orel State University, Orel
Associate Professor of the Department of Industrial
Chemistry
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
Ph.: + 7 (4862) 413295
E-mail: chemistry@ostu.ru

УДК: 621.91.01

Н.В. КАНАТНИКОВ, Г.А. ХАРЛАМОВ, А.С. ПАШМЕНТОВА, А.А. ГУКОВ

МЕТОДИКА ГИБРИДНОГО ПРОГНОСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС СТАНДАРТНОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация. Данная работа направлена на решение проблемы виртуального проектирования новых технологических процессов и прогнозирования результатов обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. В статье представлена методика гибридного моделирования процесса обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. Полученные результаты позволяют на этапе конструкторско-технологической подготовки производства провести проектирование, моделирование, а также испытания в виртуальной среде, отражающей реальные условия. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10316).

Ключевые слова: резание металлов, зубчатые колеса, гибридное моделирование, прогностическое моделирование, метод конечных элементов, конструкторско-технологическая подготовка производства.

Введение

В настоящее время на машиностроительных предприятиях в России и мире происходит переход к цифровым и интеллектуальным производственным технологиям. «Умное» производство успешно развивается применительно к процессам обработки лезвийным инструментом. Однако темпы внедрения интеллектуальных технологий в производственную практику не удовлетворяют задачам форсированного экономического развития страны. Цифровые технологии внедряются в наиболее распространенные и хорошо изученные технологические процессы (точение, фрезерование) [7]. Однако в конструкциях современных машин и механизмов широко применяются детали, рабочие поверхности которых требуют более сложной механической обработки (зубчатые колеса стандартного и специального профиля и другие детали, имеющие сложные периодические поверхности). Такими деталями комплектуются различного рода моментопередающие механизмы, используемые в автомобилях, морских судах, строительных и горных машинах, сельскохозяйственной технике, авиации и других отраслях.

Для внедрения новых достижений в области станкостроения, новых конструкций режущего инструмента, новых конструкционных и инструментальных материалов при обработке зубчатых колес требуется проведение адекватного количества сложных и дорогостоящих лабораторных и производственных исследований [4]. В настоящее время замена натурных экспериментов виртуальными невозможна, так как существующие подходы к моделированию резания не адаптированы для исследования зубообработки ввиду следующих особенностей процесса [12]:

- конструкция инструмента (режущая часть имеет сложный, а в ряде случаев специальный профиль);
- кинематика процесса резания (происходит непрерывное изменение геометрических параметров срезаемого слоя металла и углов резания);
- стружка (формируется вершинной и боковыми режущими кромками, сходя по передней поверхности резца, фрагменты стружки накладываются друг на друга, вызывая в инструменте дополнительные нагрузки).

Проблемой создания передовых технологий цифрового проектирования и моделирования производственных процессов занимается множество научных групп во всем мире. В настоящее время разработки направлены на исследование сухого и скоростного резания, а также резания специальных конструкционных материалов. Отдельное внимание уделяется исследованию процессов обработки зубчатых колес [11, 10, 3, 8, 2, 9, 5]. В настоящее время достигнуты значительные результаты в прогнозировании фундаментальных физических переменных, характеризующих процесс резания (силы резания, температурные поля, нагрузки и др.), однако нельзя игнорировать тот факт, что конечной целью

моделирования механической обработки являются необходимые производству данные о результатах процесса (точности и качества изделия, стойкости инструмента). Без подходов, позволяющих осуществить переход от прогнозирования физических переменных к прогнозированию практических результатов обработки, невозможно заменить дорогостоящие экспериментальные испытания виртуальными.

Разработанные методы прогнозирования основаны на использовании эмпирического, аналитического, численного и гибридного моделирования. Для предсказания практических результатов обработки широкие перспективы открывает использование подхода гибридного моделирования, соединяющих в себе положительные качества экспериментальных и теоретических методов исследований [1]. Однако такой подход до настоящего времени полностью не реализован. Это связано с тем, что долгое время, как в России, так и за рубежом преимущественно развивалось аналитическое моделирование процессов механической обработки, ввиду недостатка вычислительных мощностей и программных средств, численному моделированию уделялось значительно меньшее внимание.

Исследование направлено на решение проблемы виртуального проектирования новых технологических процессов и прогнозирования результатов обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. Для решения данной проблемы была разработана методика гибридного моделирования процесса обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. Полученные результаты позволяют на этапе конструкторско-технологической подготовки производства провести проектирование, моделирование, а также испытания в виртуальной среде, отражающей реальные условия. На основании результатов численного эксперимента могут быть рассчитаны оптимальные конструкторско-технологические параметры процесса обработки (режимы резания, углы заточки передней и задней поверхности инструмента), необходимые для достижения качественных требований, предъявляемых к изделию.

Методика гибридного прогностического моделирования

Входные данные для моделирования:

- профиль обрабатываемого зубчатого колеса,
- геометрические параметры режущего инструмента,
- режимы обработки,
- поведение материала во время деформации и условия контакта между заготовкой и инструментом, кинематика процесса резания.

При моделировании приняты следующие допущения:

- заготовка неподвижна,
- все необходимые для формообразования движения совершает инструмент,
- инструмент абсолютно однородный и абсолютно твердый,
- поверхность инструмента имеет однородную структуру,
- обрабатываемый материал имеет геометрически и физически нелинейную структуру,
- деформирование заготовки описывается по методу Джонсона–Кука с использованием критерия пластичности Мизеса.

Прогностическое моделирование реализовано в три этапа (рисунок 1).

I. Аналитическое моделирование процесса обработки зубчатого колеса.

На данном этапе моделирования производится расчет геометрических параметров срезаемой стружки и кинематического изменения переднего и заднего углов резания. На рисунке 2 приведена расчетная схема для определения геометрии поперечного сечения стружки и геометрии инструмента. Для реализации будет использован подход, предложенный А. С. Тарапановым и Г. А. Харламовым, основанный на методах векторного и математического анализа [13]. Исходный профиль обрабатываемого зубчатого колеса задается уравнениями алгебраических кривых. Использование такого задания позволяет найти практически неограниченное количество точек линии контакта инструментальной и

номинальной поверхностей. Реализация аналитического моделирования процесса обработки зубчатого колеса осуществлена на языке программирования Python.

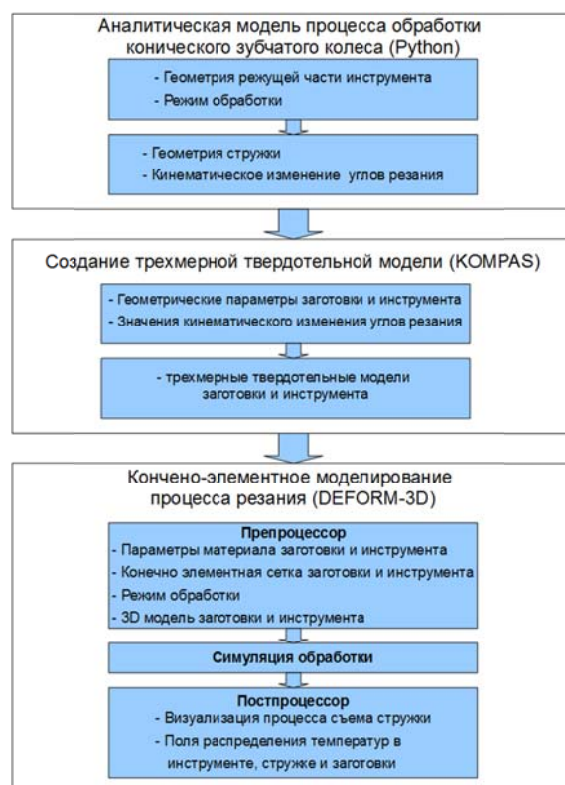


Рисунок 1 – Последовательность реализации прогностической модели

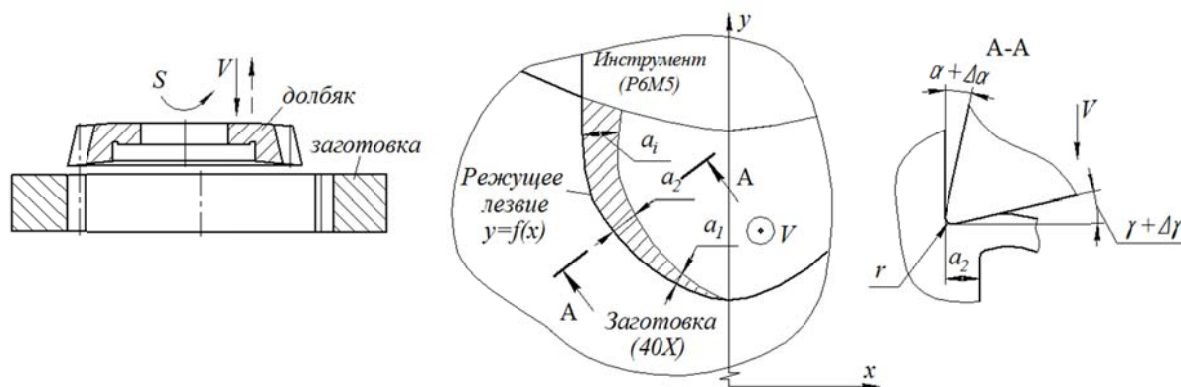


Рисунок 2 – Схема для определения параметров моделируемого процесса

II. Трехмерное моделирование режущего инструмента и заготовки.

Входными данными для численного моделирования процесса обработки зубчатого колеса являются трехмерные модели инструмента и заготовки. Моделирование производится с учетом данных о геометрических параметрах снимаемой стружки и кинематическом изменении переднего и заднего углов резания.

В качестве модели режущего инструмента используется объект, имеющий геометрию, аналогичную геометрии режущих лезвий резца для обработки зубчатого колеса. С целью сокращения времени вычислений модель лишена конструктивных элементов, не оказывающих влияния на процесс резания. Модель заготовки – это элемент конического зубчатого колеса, который представляет собой обрабатываемую боковую сторону зуба и впадину зуба (рисунок 3, 4).

Модели создаются в среде Kompas и хранятся с использованием формата данных *.STL.

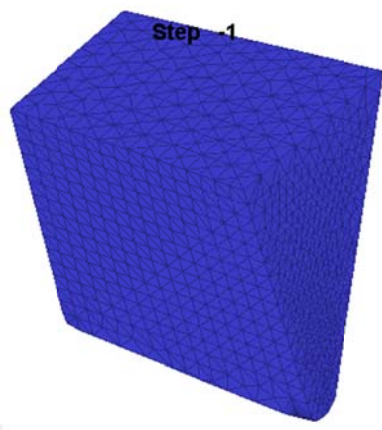


Рисунок 3 – Модель режущего инструмента

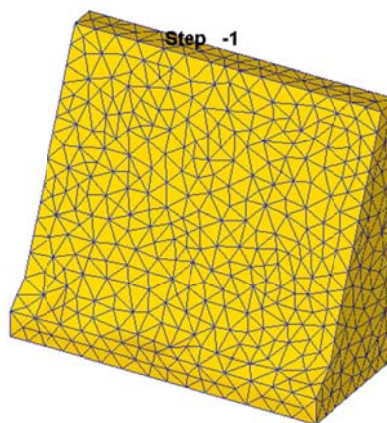


Рисунок 4 – Модель заготовки

III. Испытания в виртуальной среде.

Модели инструмента и заготовки экспортируются в среду численного моделирования DEFORM 3D. Применяемое для трехмерного моделирования деформации программное обеспечение основано на применении неявного метода Лагранжа, т.е. сетка конечных элементов формирует заготовку и последовательно деформируется с ней. При этом неструктурированная тетраэдральная сетка конечных элементов моделируется с использованием специальной системы автоматической генерации сетки. Данный метод подходит для моделирования переходных и дискретных процессов обработки (разрыв сетки при резании). Для генерации геометрии используются тетраэдральные блоки. Точность окончательной геометрии зависит от размеров тетраэдральных блоков, так как для моделирования резания используется сетка с большим количеством элементов ($>20\,000$), новая геометрия допустимо близка к исходной геометрии.

Заготовка моделируется как вязко–пластичное тело, напряжение течения для нее является функцией от деформации, скорости деформации и температуры. Деформации инструмента при резании незначительны по сравнению с деформациями обрабатываемой заготовки, поэтому режущий инструмент моделируется идеально жестким.

Модели инструмента и заготовки позиционируются таким образом, чтобы при резании режущие кромки снимали стружку заданной геометрии (рисунок 5).

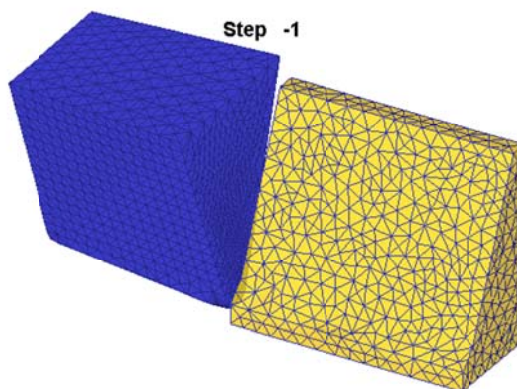


Рисунок 5 – Собранный модель

В постпроцессоре программы происходит моделирование резания методом конечных элементов путем генерации сетки для инструмента и заготовки. С целью увеличения точности расчетов в зонах, где заготовка подвергается повышенной локальной нагрузке, используется меньшая, непрерывно перестраивающаяся в процессе моделирования сетка. С целью увеличения производительности вычислений, моделирование обработки с помощью «мелкой» сетки используется только в зонах деформации и для стружки для остальной части заготовки используется крупная сетка.

Для описания процесса деформирования материала заготовки, используется модель Джонсона и Кука. Данная модель позволяет обеспечить достаточно точное описание поведения материала в условиях больших деформаций в сочетании с высокими температурами [6].

Результаты виртуальных испытаний позволяют рассчитать фундаментальные физические переменные (силы резания, температуры), характеризующие процесс обработки, а затем произвести прогноз практических результатов обработки (износ инструмента, точность и шероховатость обрабатываемой поверхности).

Расчет физических переменных, характеризующих процесс резания.

В качестве примера использования предложенной методики, рассмотрим процесс обработки конического зубчатого колеса резцовой головкой.

Геометрия стружки была получена при помощи аналитического моделирования процесса резания. Схема представлена на рисунок 6. Рассмотренные условия типичны для обработки сложных поверхностей деталей машин, например, конического зубчатого колеса, в середине реза.

Исходные данные для рассматриваемого случая моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Параметр процесса резания	Значение
1	2
Толщина стружки, снимаемой боковой режущей кромкой b_1 , мм	0,2
Толщина стружки, снимаемой вершинной режущей кромкой b_2 , мм	0,07
Длина боковой режущей кромки a_1 , мм	2,9
Длина вершинной режущей кромки a_2 , мм	0,4
Профильный угол резца α , град	20
Радиус закругления вершины резца r_0 , мм	0,2
Радиус закругления режущих кромок r , мм	0,01
Задний угол резания боковой режущей кромки α_6 , град	5
Кинематическое изменение заднего угла боковой режущей кромки $\Delta\alpha_6$, град	0,025
Передний угол резания боковой режущей кромки γ_6 , град	6
Кинематическое изменение переднего угла боковой режущей кромки $\Delta\gamma_6$, град	0,015
Задний угол резания вершинной режущей кромки α_6 , град	8
Кинематическое изменение заднего угла вершинной режущей кромки $\Delta\alpha_6$, град	0,02
Передний угол резания вершинной режущей кромки γ_6 , град	6
Кинематическое изменение переднего угла вершинной режущей кромки $\Delta\gamma_6$, град	0,012
Скорость резания V , м/мин;	100
Материал инструмента	Карбид вольфрама
Материал заготовки	16MnCr5

Свойства материала заготовки, необходимые для описания деформации по методу Джонсона–Кука, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры материала заготовки

Параметр	ε	A	B	C	n	m
Ед. изм.	1/c	МПа	МПа	–	–	–
Значение	1	560	400	0,022	0,2	1,0

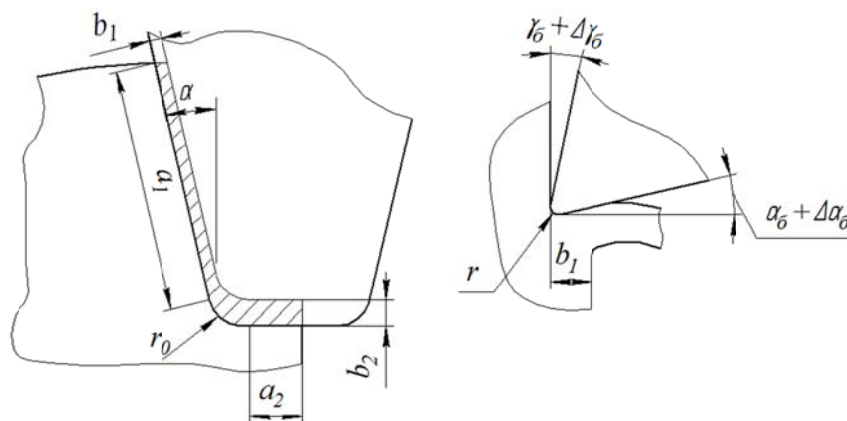


Рисунок 6 – Расчетная схема процесса

График изменения максимальной температуры резания представлен на рисунке 7. На рисунке 8 представлен график изменения значения теплового потока в процессе резания.

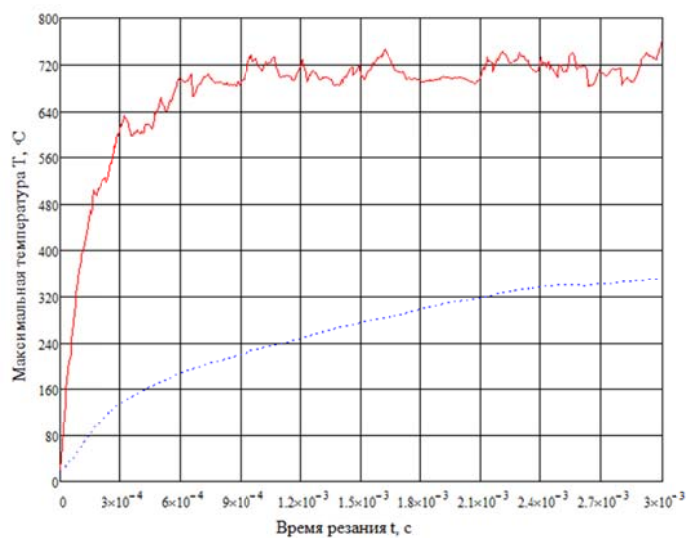


Рисунок 7 – Изменение максимальной температуры
— температура в заготовке; -- температура в инструменте

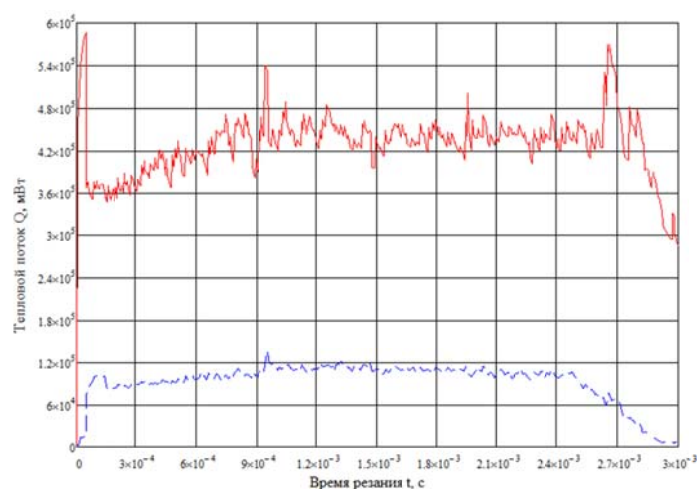


Рисунок 8 – Тепловой поток в инструменте:
— тепловой поток в заготовке; -- тепловой поток в инструменте

Сила резания, действующая на каждом зубе инструмента при обработке профиля, разложена на осевые составляющие: F_x , F_y , F_z (рисунок 9).

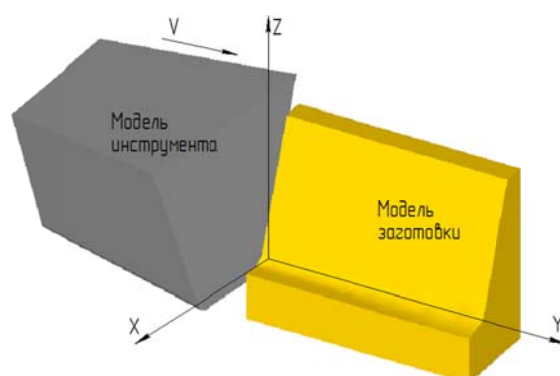


Рисунок 9 – Направления осевых составляющих силы резания при моделировании

В процессе врезания инструмента в резание последовательно вступает боковая режущая кромка, затем радиусная и вершинная. Геометрия срезаемой стружки и, следовательно, сила резания постоянно изменяется в процессе обработки от нуля до определенного максимального значения.

На рисунке 10 показаны изменения осевых составляющих силы резания при моделировании фрезерования конического зубчатого колеса. Осовая составляющая силы резания F_y имеет наибольшее значение и достигает 1600 Н на одном резе.

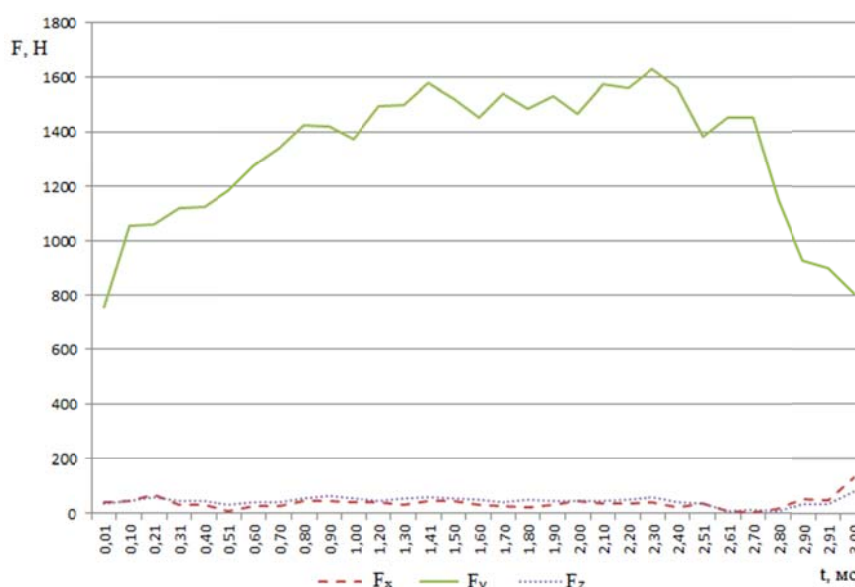


Рисунок 10 – График изменения осевых составляющих силы резания в процессе одного реза

Выводы

В работе представлена методика виртуального исследования механической обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля, основанная на гибридной прогностической модели процесса обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. Последовательно получаемые данные о геометрии срезаемой стружки, кинематическом изменении переднего и заднего углов резания, дополненные компьютерным моделированием и виртуальными исследованиями с использованием численных методов позволяют рассчитать фундаментальные физические переменные (силы резания, температуры), характеризующие процесс обработки, и в конечном итоге, произвести прогноз практических результатов обработки (износ инструмента, точность и шероховатость обрабатываемой поверхности).

Следующим шагом научно–исследовательской работы будет проверка адекватности гибридной прогностической модели процесса обработки зубчатых колес, путем проведения экспериментальных исследований и анализа полученных данных. Целью экспериментального исследования будет являться подтверждение расчетных значений фундаментальных физических переменных, характеризующих процесс резания (силы резания; температуры), а также величин, характеризующих результат обработки (точность обрабатываемого зубчатого колеса; шероховатости зубчатого профиля; износ инструмента).

Коллектив авторов выражает благодарность Российскому научному фонду за оказанную финансовую поддержку при выполнении проекта «Разработка методов и алгоритмов гибридного прогностического моделирования и оптимизации лезвийной обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля» соглашение № 17–79–10316.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arrazola, P. J. Recent advances in modelling of metal machining processes / P. J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, I. S. Jawahir // CIRP Annals–Manufacturing Technology. – 2013. – V. 62. – №. 2. – P. 695–718.
2. Attanasio, A. 3D finite element analysis of tool wear in machining / A. Attanasio, E. Ceretti, S. Rizzuti, D. Umbrello, F. Micari // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – V. 57. –P. 61–64.
3. Bouzakis, K. D. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models / K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, A. Antoniadis, N. Vidakis //Journal of manufacturing science and engineering. – 2002. – V. 124. – №. 1. – P. 42–51.
4. Bouzakis, K. D. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods / K. D. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, O. Friderikos //CIRP Annals. – 2008. – V. 57. – №. 2. – P. 676–696.
5. Bouzakis, K. D. FEM–supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of spur and helical gears / K. D. Bouzakis, O. Friderikos, I. Tsiafis // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2008. – V. 1. – №. 1. – P. 18–26.
6. Johnson, G. R., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures/ G. R. Johnson, W. H. Cook //Engineering fracture mechanics. – 1985. – V. 21. – №. 1. – P. 31–48.
7. Kadir, A. A. Virtual machine tools and virtual machining – A technological review / A. A. Kadir, X. Xu, E. Hämmerle// Robotics and computer–integrated manufacturing. – 2011. – V. 27. – №. 3. – P. 494–508.
8. Klocke, F. Influence of gear design on tool load in bevel gear cutting / F. Klocke, M. Brumm, S. Herzhoff // Procedia CIRP. – 2012. – V. 1. – P. 66–71.
9. Tsay, C. B. Spur gear generation by shaper cutters / C. B. Tsay, W. Y. Liu, Y. C. Chen //Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – V. 104. – №. 3. – P. 271–279.
10. Гречишников, В. А. Современные методы решения задач формообразования сложного режущего инструмента/ В. А. Гречишников, П. В. Домнин, В. А. Косарев, Ю. Е. Петухов, В. Б. Романов, Б. Е. Седов // СТИН. – 2013. – №. 12. – С. 6–11.
11. Маликов, А. А. Динамические характеристики шевингования–прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями / А. А. Маликов, А. В. Сидоркин, А. С. Ямников //Технология машиностроения. – 2012. – №. 2. – С. 19–23.
12. Полохин, О.В. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа / О. В. Полохин, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. – М.: Машиностроение. – 2007.
13. Харламов, Г. А., Тарапанов А. С. Теория проектирования процессов лезвийной обработки. / Г. А. Харламов, А. С. Тарапанов. – М.: Машиностроение. – 2003.

Канатников Никита Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Конструкторско–технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (4862) 419895
E–mail: NKanatnikov@yandex.ru

Пашментова Анна Сергеевна

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
аспирант кафедры «Конструкторско–технологическое
обеспечение машиностроительных производств»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
тел.: + 7 (4862) 419895
e–mail: adjourn@yandex.ru

Харламов Геннадий Андреевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Конструкторско–технологическое
обеспечение машиностроительных производств»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (4862) 419895
E–mail: awj@list.ru

Гуков Артем Андреевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
магистр кафедры «Программная инженерия»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
тел.: + 7 (4862) 419895
e–mail: a.gukov123@gmail.com

N.V. KANATNIKOV, G.A. HARLAMOV, A.S. PASHMENTOVA, A.A. GUKOV

METHODOLOGY OF HYBRID PREDICTIONAL MODELING OF BLADE PROCESSING OF GEAR WHEELS OF STANDARD AND SPECIAL PROFILE

Abstract. *This work is aimed at solving the problem of virtual design of new technological processes and predicting the results of processing gears of standard and special profiles. The article presents a technique for hybrid simulation processing gears of standard and special profiles. The obtained results allow to design, simulate, and also test in a virtual environment reflecting real conditions at the stage of design and technological preparation of production. The research was supported by RSF (project No. 14-12-34567).*

Keywords: *cutting, gears, hybrid modeling, predictional modeling, finite element method, design and technological preparation of production*

BIBLIOGRAPHY

1. Arrazola, P. J. Recent advances in modelling of metal machining processes / P. J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, I. S. Jawahir // CIRP Annals–Manufacturing Technology. – 2013. – V. 62. – №. 2. – P. 695–718.
2. Attanasio, A. 3D finite element analysis of tool wear in machining / A. Attanasio, E. Ceretti, S. Rizzuti, D. Umbrello, F. Micari // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – V. 57. – P. 61–64.
3. Bouzakis, K. D. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models / K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, A. Antoniadis, N. Vidakis // Journal of manufacturing science and engineering. – 2002. – V. 124. – №. 1. – P. 42–51.
4. Bouzakis, K. D. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods / K. D. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, O. Friderikos // CIRP Annals. – 2008. – V. 57. – №. 2. – P. 676–696.
5. Bouzakis, K. D. FEM-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of spur and helical gears / K. D. Bouzakis, O. Friderikos, I. Tsiafis // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2008. – V. 1. – №. 1. – P. 18–26.
6. Johnson, G. R., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Engineering fracture mechanics. – 1985. – V. 21. – №. 1. – P. 31–48.
7. Kadir, A. A. Virtual machine tools and virtual machining – A technological review / A. A. Kadir, X. Xu, E. Hämmerle // Robotics and computer-integrated manufacturing. – 2011. – V. 27. – №. 3. – P. 494–508.
8. Klocke, F. Influence of gear design on tool load in bevel gear cutting / F. Klocke, M. Brumm, S. Herzhoff // Procedia CIRP. – 2012. – V. 1. – P. 66–71.
9. Tsay, C. B. Spur gear generation by shaper cutters / C. B. Tsay, W. Y. Liu, Y. C. Chen // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – V. 104. – №. 3. – P. 271–279.
10. Grechishnikov, V. A. Sovremennyye metody resheniya zadach formoobrazovaniya slozhnogo rezhushchego instrumenta / V. A. Grechishnikov, P. V. Domnin, V. A. Kosarev, YU. Ye. Petukhov, V. B. Romanov, B. Ye. Sedov // STIN. – 2013. – №. 12. – S. 6–11.
11. Malikov, A. A. Dinamicheskiye kharakteristiki shevingovaniya–prikatyvaniya tsilindricheskikh koles s krugovymi zubyami / A. A. Malikov, A. V. Sidorkin, A. S. Yamnikov // Tekhnologiya mashinostroyeniya. – 2012. – №. 2. – S. 19–23.
12. Polokhin, O.V. Narezaniye zubchatykh profiley instrumentami chervyachnogo tipa / O. V. Polokhin, A. S. Tarapanov, G. A. Kharlamov. – M.: Mashinostroyeniye. – 2007.
13. Kharlamov, G. A., Tarapanov A. S. Teoriya proyektirovaniya protsessov lezviynoy obrabotki. / G. A. Kharlamov, A. S. Tarapanov. – M.: Mashinostroyeniye. – 2003.

Kanatnikov Nikita Vladimirovich

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
Cand. of Tech. Sc., associate professor
of the department «Design–technological maintenance
of mechanical engineering productions»,
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: NKanatnikov@yandex.ru

Harlamov Gennadiy Andreevich

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
Doc. of Tech. Sc., professor
of the department «Design–technological maintenance of
mechanical engineering productions»,
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: awj@list.ru

Pashmentova Anna Sergeevna

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
PhD student of the department
«Design–technological maintenance of mechanical
engineering productions»
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: adjourn@yandex.ru

Gukov Artem Andreevich

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
Master student of the department «Software engineering»
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: a.gukov123@gmail.com

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА

УДК 621.8, 621.822.1, 62–251

А.В. СЫТИН, А.Ю. РОДИЧЕВ, А.В. КУЗАВКА

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЛЕПЕСТКОВЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

Аннотация. В статье рассматривается мехатронная установка для исследования лепестковых газодинамических подшипников, которая представляет собой мехатронную систему, состоящую из: лепесткового газодинамического подшипника, регистрирующей части, электромагнитных актуаторов и электронной системы управления. Разработка мехатронной экспериментальной установки включает в себя построение структурно-функциональной схемы, компоновку регистрирующих и управляющих систем. В разрабатываемой конструкции реализовано активное управление, которое необходимо для отслеживания траектории движения, непосредственно связанной с критическими прогибами опорной поверхности, а также своевременного воздействия на управляемый объект. Управляемым объектом является полый ротор, вращающийся в лепестковых газодинамических подшипниках. Электромагнитный блок представляет магнитный подвес, который служит стабилизатором положения ротора во время пуска и останова экспериментального стенда, а также позволяет моделировать нагружение ротора в соответствующих направлениях. Установка комплектуется универсальной и гибкой измерительной системой, построенной на базе комплектующих National Instruments и программного продукта Labview.

Ключевые слова: мехатронная система, магнитный подвес, ротор, упругий элемент, подшипниковый узел, установка, втулка, крепление, технология, датчик, магнит.

Введение.

Увеличение частоты вращения ротора позволяет избежать значительного увеличения массогабаритных характеристик турбоагрегата, при повышении производительности, что особенно важно для нестационарных установок. Вместе с тем, повышение частоты вращения валов в подшипниках скольжения ограничивается большими потерями на трение и ростом температуры, которые сильно возрастают с ростом окружной скорости. Быстроходные подшипники скольжения приходится снабжать громоздкими охлаждающими устройствами. Поэтому эффективным путем повышения предельной частоты вращения является использование смазочных материалов с малой вязкостью. Очевидно, что наибольшие скорости могут быть достигнуты с помощью газовой, преимущественно воздушной смазки. Поскольку газовые подшипники могут обеспечить машинам высокий срок службы, и сокращение массы и габаритов, становится очевидной перспективностью их применения [1, 2]. Известно, что предельная быстроходность подшипников качения существенно снижает возможность их применения в высокоскоростных турбомашинах с рабочими частотами вращения $30 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3$ об/мин и более.

Смазочный слой в лепестковых газодинамических подшипниках (ЛГДП) образуется между валом и одним или несколькими гибкими тонкими лепестками толщиной 0,1...0,5 мм, имеющих на поверхности, обращенной к валу антифрикционное покрытие. Между этими лепестками и корпусом подшипника устанавливаются дополнительные тонкостенные элементы, предназначенные для создания необходимых характеристик жесткости и демпфирования. Силы трения, возникающие при работе в зонах контакта между лепестками, между лепестками и корпусом, а также силы упругой деформации лепестков рассеивают энергию колебаний ротора и улучшают динамические характеристики машины, позволяют достигать высоких частот вращения. Податливость лепестка позволяет обеспечить чрезвычайно малые зазоры между цапфой и опорной поверхности на большой площади и получить несущую способность, достаточную для многих высокооборотных турбомашин различного назначения [3, 4].

Традиционные лепестковые подшипники принципиально не могут быть использованы для решения ряда сложных технических задач. Происходит это в тех случаях, когда,

потенциально невозможно сохранить герметичность, например, в условиях глубокого вакуума, или требуется обеспечить устойчивую работу при сверхвысоких частотах вращения ротора. Одним из эффективных способов обеспечения устойчивого движения ротора является активное управление реакцией опор. Впервые этот принцип был реализован в электромагнитных подшипниках, которые следует рассматривать как мехатронную систему с автоматическим измерением величины и направления реакции опоры. Это связано с объективными достоинствами активных магнитных подшипников (АМП), быстрым развитием силовой электроники и информационных технологий. По сути дела АМП представляют собой мехатронные устройства, в которых стабилизация положения ротора осуществляется действием электромагнитов, ток в которых регулируется системой автоматического управления по сигналам датчиков радиальных или осевых перемещений ротора [5, 6].

Основная часть.

Для разработки функциональной схемы мехатронной установки для испытания лепестковых газодинамических подшипников необходимо провести комплексный анализ структурной схемы проектируемого устройства. На рисунке 1 представлена структурная схема экспериментальной установки.

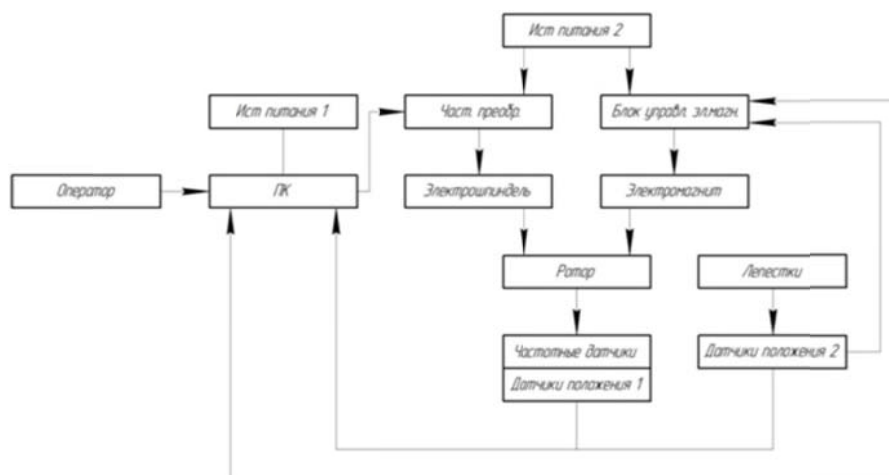


Рисунок 1 – Структурная схема

Оператор управляя ПК задает первоначальные параметры. ПК вырабатывает управляющий сигнал и передает его на вход частотного преобразователя. В частотном преобразователе входное напряжение 220В / 380В (при частоте 50 Гц) трансформируется в импульсное выходное, частота которого составляет от 0 до 400 Гц. Электромеханический в свою очередь плавно раскручивает вал до значения заданного оператором. Датчик положения 1, и частотные датчики снимают показания и передают их на АЦП, датчики положения 2 снимают показания с лепестков ЛГДП и отправляют на блок управления электромагнитом. Блок управления электромагнитом получает сигнал с датчика положения 2, вычисляя по полученным данным текущие значения измеряемых величин и выдает соответствующие значение на выходное устройство и отправляет на реле постоянного тока которое в свою очередь воздействует на электромагнит.

Применение активного управления в ЛГДП позволяет расширить их область применения, поскольку делает возможность быстрого реагирования на непредвиденные ситуации [7]. С минимальным, на данный момент, запаздыванием производится оценка траектории движения и непосредственное электромагнитное воздействие на ротор. В общем виде ЛГДП с активным управлением представляет собой мехатронную систему, состоящую из: лепесткового газодинамического подшипника, регистрирующей части (датчики перемещения), электромагнитных актуаторов и электронной системы управления (рисунок 2). Принцип работы такой опоры заключается в следующем: отклонение ротора от положения равновесия фиксируется датчиками перемещения 1 и 2. Сигнал с датчиков поступает в электронную систему управления, где по заданному алгоритму происходит его

обработка. После получения результата величины отклонения, усилитель, питаемый от внешнего источника энергии, увеличивает или уменьшает сигнал до необходимого уровня и подает его на электромагниты 3, которые воздействуя на ротор корректируют его траекторию движения.

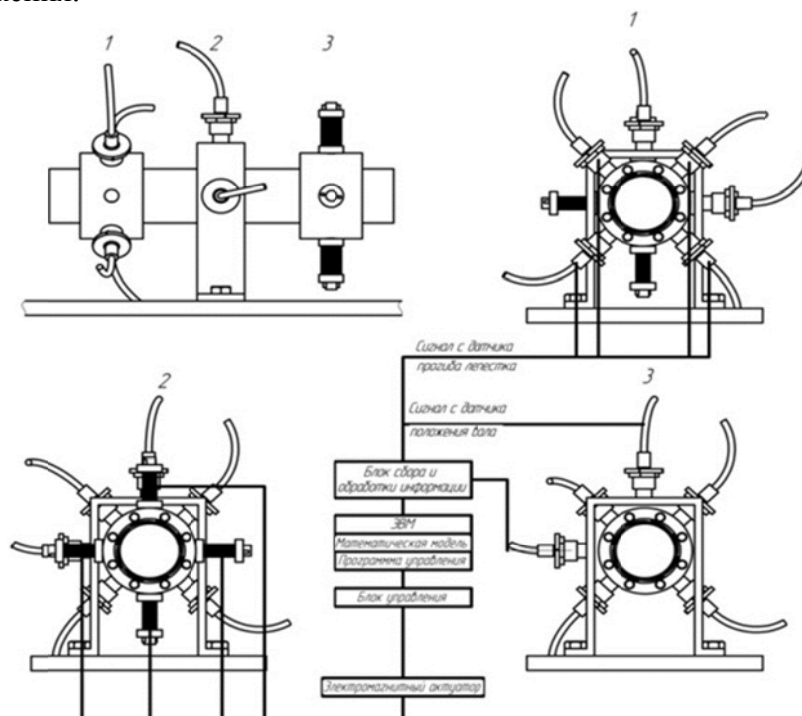


Рисунок 2 – Схема активного управления в ЛГДП

На основании данной концепции была разработана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3. Основанием установки служит станина, имеющая ряд отверстий для позиционирования сборочных единиц. На станине установлен электрошпиндель типа ТМРЕЗ 12/2 с цанговым зажимом, передающий крутящий момент через муфту на ротор экспериментальной установки. Кроме этого установка имеет два подшипниковых узла в каждом из которых расположены по одному лепестковому подшипнику, которые имеют отверстия под установку датчиков, для определения прогиба лепестка. На расположенной рядом стойке закреплены сенсорные узлы, позволяющие отслеживать положение ротора в реальном времени. Между двумя подшипниковыми узлами расположен магнитный подвес служащий стабилизатором положения ротора во время пуска и останова экспериментального стенда.

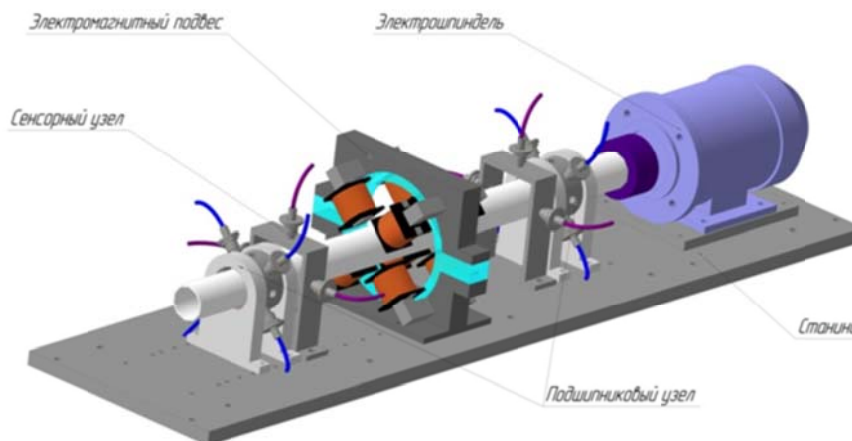


Рисунок 3 – Экспериментальный стенд

Подшипниковый узел представляет собой две металлические опоры с элементами фиксации и посадочным местом для установки лепесткового ГДП, которые обеспечивают его надежное крепление (рисунок 4).

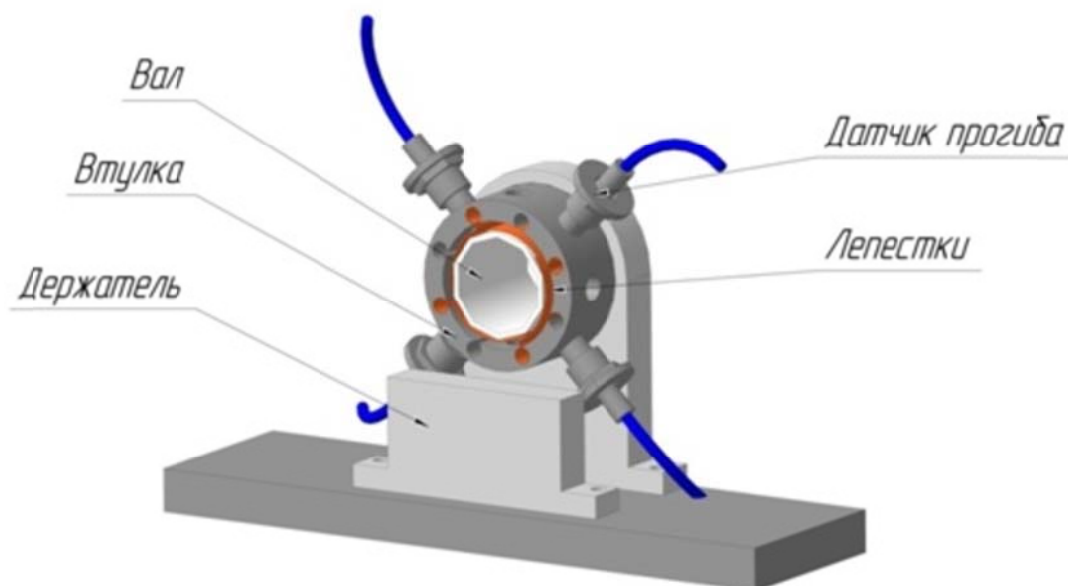


Рисунок 4 – Подшипниковый узел с лепестковым газодинамическим подшипником

В центре экспериментальной установки находится электромагнитная система нагружения. На рисунке 5 представлен эскиз магнитного подвеса. Монтаж основных деталей подвеса осуществляется на станине. Опоры имеют пазы для крепления сердечников на которые в свою очередь крепятся катушки электромагнитов ПМЕ–211.

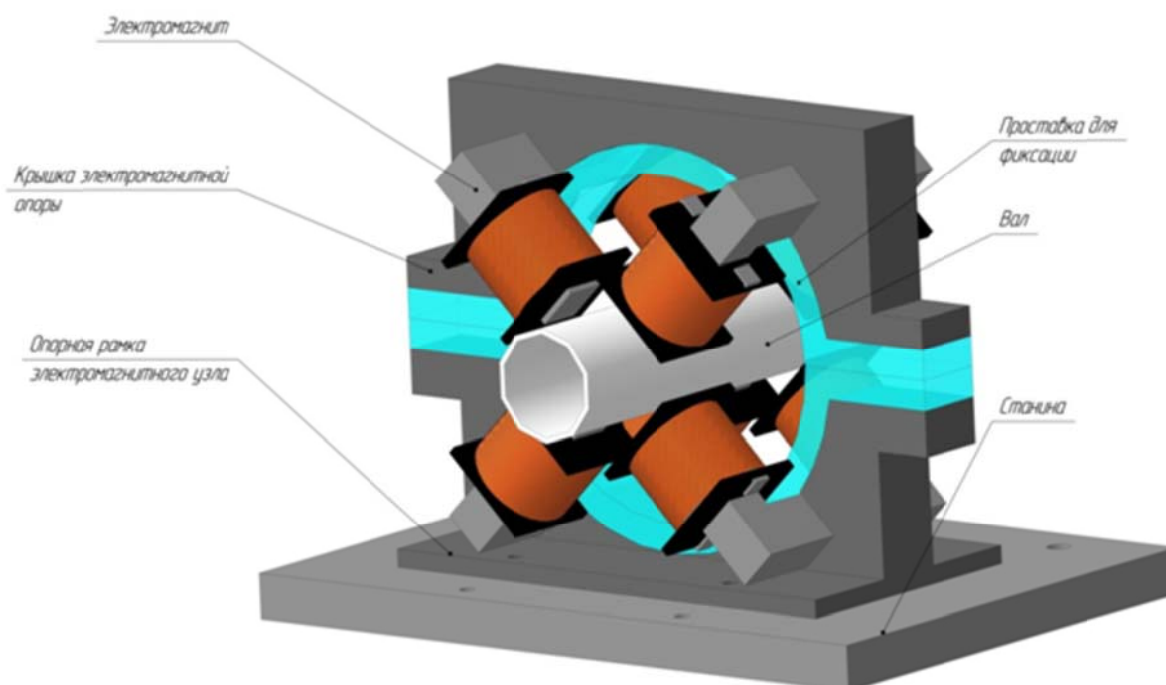


Рисунок 5 – Система электромагнитного нагружения

Ротор установленный на лепестковые газодинамические подшипники с активным магнитным подвесом представляет собой сложную систему с большим количеством различных управляющих параметров. Диапазоны изменения каждого из них теоретически неограниченны. По этой причине проведение полномасштабных экспериментальных

исследований, наиболее полно отражающих реальное состояние роторной системы, представляется возможным с применением современных информационно измерительных комплексов на базе высокопроизводительных компьютерных платформ [8].

Скорость протекания процессов и необходимая частота опроса делает невозможным использование контактных методов съема информации с быстро движущихся объектов, оказывая воздействие на динамику их движения. Традиционные методы измерений не всегда применимы для изучения вышеупомянутых процессов, в результате чего возникает необходимость в специализированном оборудовании для постановки натурных и модельных экспериментов и проведении диагностических работ. Реализовать измерительную систему со всеми вышеперечисленными свойствами представляется возможным с применением измерительных платформ различных производителей. Наиболее универсальной и гибкой измерительной системой является комплекс, построенный на базе комплектующих National Instruments и программного продукта Labview. Данная система опирается на современные компьютерные технологии в комбинации с гибким программным обеспечением и модульным высокопроизводительным оборудованием, интегрируемым в ЭВМ. Программное обеспечение Labview является средой графического программирования для сбора, обработки и представления экспериментальных данных, а также непосредственного управления различным оборудованием экспериментального стенда. Данный язык является мощным инструментом программирования, пригодным для решения практически любых задач математического моделирования и управления производственными процессами [9, 10].

Одной из важных и неотъемлемых частей спроектированной установки является лепестковый газодинамический подшипник. Лепестковые газодинамические подшипники (рисунок 6) имеют относительно простую конструкцию и принцип работы. Несущую поверхность подшипника образуют тонкие упругие металлические пластины. На поверхность пластин наносится антифрикционное покрытие с низким коэффициентом трения, которое «смазывает» подшипник при пуске, пока вал не может вращаться достаточно быстро, чтобы между ним и подшипником образовался воздушный клин. По мере увеличения частоты вращения ротора газовый слой полностью разделяет рабочие поверхности ротора и подшипника. Рост скорости сопровождается увеличением несущей способности подшипника.

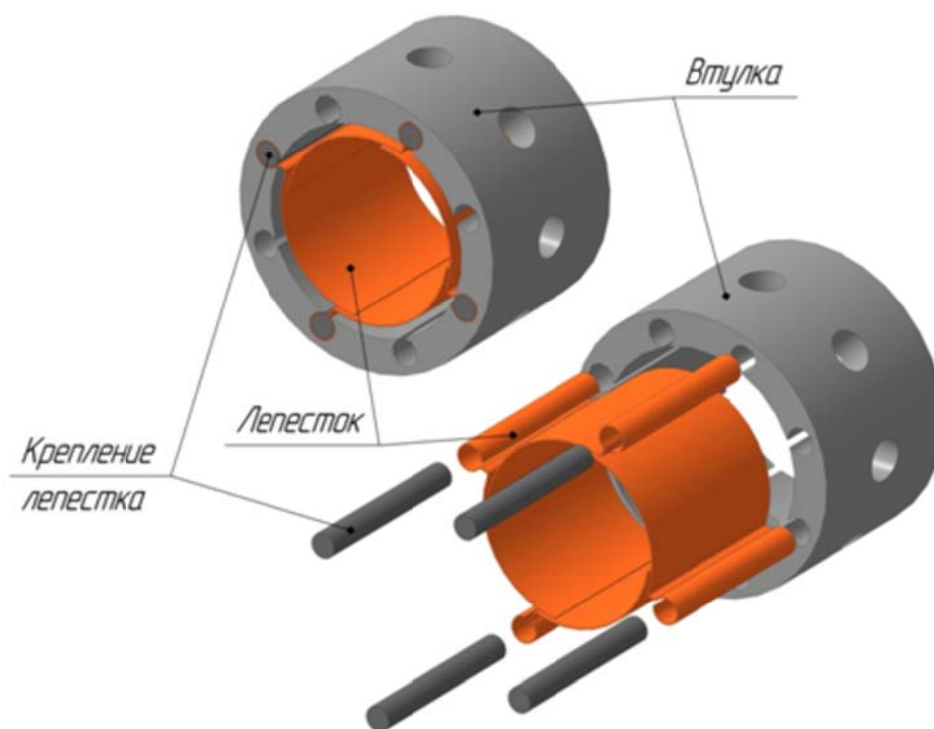


Рисунок 6 – Лепестковый газодинамический подшипник

Основой лепесткового газодинамического подшипника является стальная втулка, в пазах которой закреплены упругие рабочие элементы (лепестки). Втулка изготовлена из стали марки 20Х ГОСТ 4543–71. К внутренней поверхности предъявляются повышенные требования по точности взаимного расположения к торцевым поверхностям, и качеству поверхности ($Ra\ 1,6$ для внутренней поверхности). Втулка представляет собой цилиндрическую поверхности диаметром $\varnothing 60$ мм (рисунок 7, а). На этом диаметре имеются 8 отверстий с резьбой М10х1, которые позволяют закрепить датчики прогиба лепестка в осевом направлении, втулка так же имеет 8 отверстий радиусом 6, что позволяет крепить лепестки газодинамического подшипника.

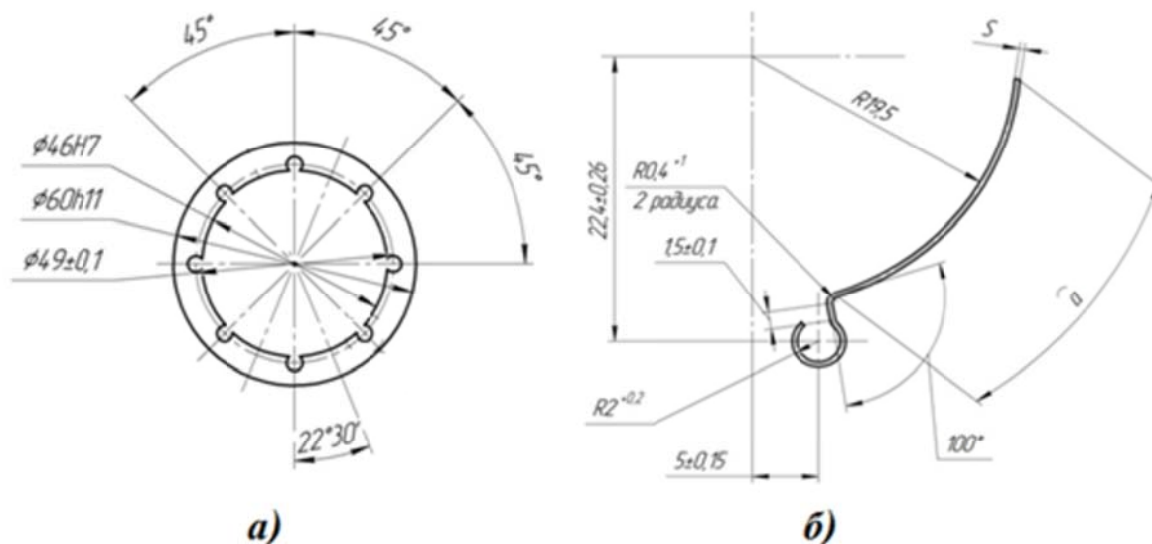


Рисунок 7 – Элементы конструкции лепесткового подшипника:
а) – втулка, б) – упругий элемент (лепесток)

Технология изготовления лепестка является сложной задачей, требующей постоянного принятия новых и корректировки старых технологических процессов [11]. Изготовление упругого элемента (лепестка) (рисунок 8) заключается в следующем: из специального материала нарезают заготовки (рисунок 8, а). Из заготовок вырезают рабочие элементы, формируют рабочий профиль лепестка (рисунок 8, б, в), после этого следует термообработка и очищение заготовки от стружки и примесей, далее происходит нанесение на поверхности лепестка покрытия и окончательная обработка. Одной из важных операций при изготовлении лепестка является его деформация [12]. Гибку лепестков проводят как ручным способом (используя матрицы), так и автоматизированным с помощью оборудования.

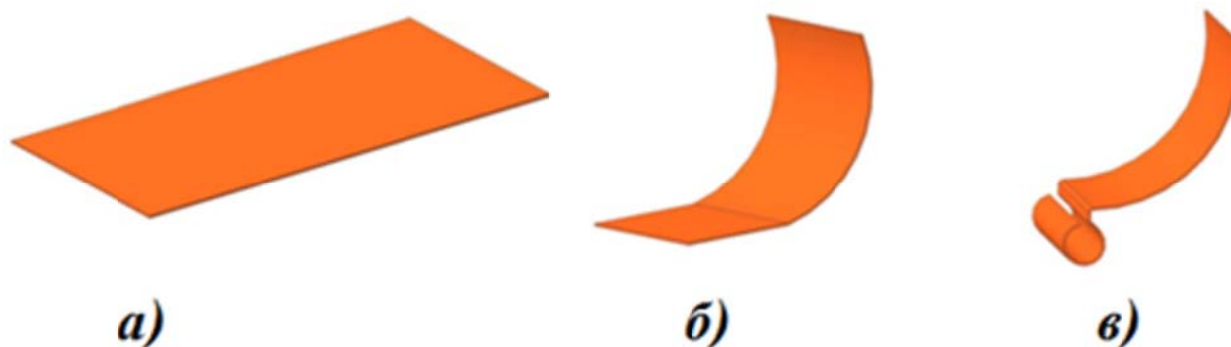


Рисунок 8 – Схема технологического процесса изготовления лепестка

На рисунке 9 представлен технологический процесс деформации лепестка по необходимым геометрическим параметрам.

Лепестковые газодинамические подшипники в процессе изготовления предполагают химико–термическую обработку и нанесение специальных покрытий. Технологически решение этой проблемы заключается в нанесении ультратонких смазочных пленок. В зависимости от толщины покрытия пленки применяют не только для создания устройств микроэлектроники, но и в целях защиты от коррозии, повышения износостойкости и улучшения режущих свойств инструмента. Существует множество методов нанесения тонких покрытий:

- метод титрованного раствора;
- метод Блоджет — Ленгмюра;
- метод окунания;
- метод адсорбции паров;
- метод ионного распыления.



Рисунок 9 – Технологический процесс деформации лепестка:

а – заготовка, б – приспособление (матрица), в – установка лепестка в матрицу, г – обжатие лепестка, д – проверка радиуса кривизны, е – готовый лепесток

Главным условием работы лепестковых газодинамических подшипников является прогиб опорной поверхности в пределах упругой деформации [13]. Дальнейшее превышение прогиба, из–за недостаточной жесткости опорной поверхности, приводит к нарушению работоспособности подшипника и всего роторно–опорного узла [14]. Активное управление необходимо для отслеживания траектории движения, непосредственно связанной с критическими прогибами опорной поверхности, а также своевременного воздействия на управляемый объект. Таким образом, задача активного управления сводится к следующему условию [15]:

$$\left(\vec{M}_{iq} + \sum_{j=1}^n \vec{M}_{ij} X_j \right) < [\vec{M}_{np}]_{i=1,2...m} \quad (1)$$

где \vec{M}_{iq} – составляющая значения контролируемого параметра в i -ой точке, возникающая под действием внешнего воздействия q ,

X_j – управляющее воздействие,

\vec{M}_{ij} – составляющая значения контролируемого параметра в i -ой точке, возникающая под действием единичного управляющего воздействия $X_j=1$,

$[\vec{M}_{np}]_j$ – предельно–допустимые значения \vec{M}_{iq} в контрольных точках,

m – число контрольных точек,

n – число управляющих воздействий (актуаторов).

Заключение.

Применение системы активного управления требует введения в математическую модели дополнительных компонентов, учитывающих работу системы управления. Поскольку решение уравнений в процессе моделирования ЛГДП предполагает решение дифференциальных уравнений итеративными методами, учет активного управления будет выражаться в изменении начальных условий для каждой из итераций в соответствии с данными, полученными на выходе математической модели системы управления. Повышение уровня управляемости конструкций, основанное на синтезе механики, электроники и информационных технологий, следует рассматривать как объективную закономерность развития техники. Результатом такого развития являются технические устройства нового класса, представляющие собой деформируемые системы с переменными управляемыми параметрами.

Представленные исследования выполнены в рамках проекта 9.2952.2017/ПЧ проектной части государственного задания «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общинженерной подготовки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермилов, Ю.И. Экспериментальное определение предельной несущей способности осевых лепестковых газодинамических подшипников малоразмерных высокоскоростных турбомашин / Ю.И. Ермилов, Ю.А. Равикович // вестник МАИ. – 2008. – №3, т. 15. – С. 74–82.
2. Ермилов, Ю.И. Теоретическое и экспериментальное определение предельной несущей способности осевых лепестковых газодинамических подшипников: дис. канд. техн. наук: 05.07.05 / Ермилов Юрий Иванович. – Орёл, 2005. – 157 с.
3. Пешти, Ю.В. Газовая смазка / Ю.В. Пешти. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 382 с.
4. Хешмет, Х. Анализ газового ленточного радиального подшипника / Х. Хешмет, Дж. Уоловит, О. Пинкус // Проблемы трения и смазки. – 1983. – Т. 105. – № 4. – С. 124–132.
5. Habermann, H. An active magnetic bearing system / H. Habermann, G. Liard // Precision Engineering. – 1980. – Vol. 2, Issue 3. PP. – 139–140.
6. Bleuler, H. New concepts for cost-effective magnetic bearing control / H. Bleuler, D. Vischer, G. Schweitzer, A. Traxler, D. Zlatnik // Automatica. – 1994. – Vol. 30, Issue 5. – PP. 871–876.
7. An, W. Model-Based Control of Active Tilting-Pad Bearings / W. An, C. Zhijun, M.S. Queiroz // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2008. – PP.112–122.
8. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
9. Шутин, Д.В. Моделирование активных радиальных гидростатодинамических опор / Д.В. Шутин, Л.А. Савин // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2012. – № 1. – С. 54–60.
10. Deckler, D.C. Simulation and Control of an Active Tilting-Pad Journal Bearing / D.C. Deckler, R.J. Veillette, M.J. Braun, F.K. Choy // STLE Tribology Trans. – 2000. – №47. – PP. 440–458.
11. Сытин, А.В. Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников дис. канд. техн. наук: 01.02.06 / Сытин Антон Валерьевич. – Орёл, 2008. – 201 с.
12. Звонарев, П.Н. Разработка метода расчета радиальных упругогазодинамических подшипников с предварительно напряженными лепестками для малых турбомашин низкотемпературных установок дис. канд. техн. наук: 05.04.03 / Звонарев Павел Николаевич. – Москва, 2005. – 201 с.
13. Александров, В.М. Введение в механику контактных взаимодействий / В.М. Александров, М.И. Чебаков. – Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2007. – 114 с.
14. Александров, В.М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками / В.М. Александров, С.М. Мхитарян. – М.: Наука, 1983. – 488 с.
15. Сытин, А.В. Применение мехатронных модулей в роторных системах с подшипниками скольжения / А.В. Сытин, А.Ю. Бабин, А.В. Кузавка // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологи. – 2017. – № 3 (323). – С. 93–101.

Сытин Антон Валерьевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Мехатроника,
механика и робототехника»
Тел.: 89192046050
E-mail: sytin@mail.ru

Кузавка Александр Валерьевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Аспирант
Тел.: 89192666806
E-mail: kuzavka.net@mail.ru

Родичев Алексей Юрьевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Мехатроника,
механика и робототехника»
Тел.: 89051673322
E-mail: rodfox@yandex.ru

PECULIARITIES OF DESIGN OF A MECHATRONIC TEST RIG TO STUDY FOIL GAS DYNAMIC BEARINGS

Abstract. *The paper considers a mechatronic test rig for the study of foil gas dynamic bearings, which is a mechatronic system consisting of: a foil gas dynamic bearing, a sensor system, electromagnetic actuators and an electronic control system. The development of a mechatronic test rig includes the formulation of a structural-functional scheme, the layout of sensor and control systems. In the developed design, active control is implemented, which is necessary to track the trajectory of motion, directly related to critical deflections of the bearing surface, as well as to timely influence the controlled object. The controlled object is a hollow rotor, rotating in foil gas dynamic bearings. The electromagnetic unit represents a magnetic suspension that acts as a stabilizer of the rotor position during the start-up and shutdown of the test rig, and can also model the loading of the rotor in the appropriate directions. The test rig also features a universal and flexible measuring system based on National Instruments components and the LabVIEW software.*

Keywords: *mechatronic system, magnetic suspension, rotor, elastic element, bearing node, test rig, sleeve, fastening, technology, sensor, magnet.*

BIBLIOGRAPHY

1. Ermilov, YU.I. EHksperimentalnoe opredelenie predelnoj nesushchej sposobnosti osevyh lepestkovyh gazodinamicheskikh podshipnikov malorazmernyh vysokoskorostnyh turbomashin / YU.I. Ermilov, YU.A. Ravikovich // *vestnik MAI*. – 2008. – №3, t. 15. – С. 74–82.
2. Ermilov, YU.I. Teoreticheskoe i ehksperimentalnoe opredelenie predelnoj nesushchej sposobnosti osevyh lepestkovyh gazodinamicheskikh podshipnikov: dis. kand. tekhn. nauk: 05.07.05 / Ermilov YUrij Ivanovich. – Oryol, 2005. – 157 s.
3. Peshti, YU.V. Gazovaya smazka / YU.V. Peshti. – M.: MGTU im. N.EH. Bauman, 1993. – 382 s.
4. Heshmet, H. Analiz gazovogo lentochного radialnogo podshipnika / H. Heshmet, Dzh. Uolovit, O. Pinkus // *Problemy treniya i smazki*. – 1983. – T.105. – №4. – S. 124–132.
5. Habermann, H. An active magnetic bearing system / H. Habermann, G. Liard // *Precision Engineering*. – 1980. – Vol. 2, Issue 3. PP. – 139–140.
6. Bleuler, H. New concepts for cost-effective magnetic bearing control / H. Bleuler, D. Vischer, G. Schweitzer, A. Traxler, D. Zlatnik // *Automatica*. – 1994. – Vol. 30, Issue 5. – PP. 871–876.
7. An, W. Model-Based Control of Active Tilting-Pad Bearings / W. An, C. Zhijun, M.S. Queiroz // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2008. – PP.112–122.
8. Savin, L.A. Modelirovanie rotornyh sistem s oporami zhidkostnogo treniya: monografiya / L.A. Savin, O.V. Solomin. – M.: Mashinostroenie-1, 2006. – 444 s.
9. SHutin, D.V. Modelirovanie aktivnyh radialnyh gidrostatodinamicheskikh opor / D.V. SHutin, L.A. Savin // *Izvestiya YUZGU. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. – 2012. – № 1. – S. 54–60.
10. Deckler, D.C. Simulation and Control of an Active Tilting-Pad Journal Bearing / D.C. Deckler, R.J. Veillette, M.J. Braun, F.K. Choy // *STLE Tribology Trans.* – 2000. – №47. – PP. 440–458.
11. Sytin, A.V. Reshenie kompleksnoj zadachi rascheta harakteristik radialnyh lepestkovyh gazodinamicheskikh podshipnikov: dis. kand. tekhn. nauk: 01.02.06 / Sytin Anton Valerievich. – Oryol, 2008. – 201 s.
12. Zvonarev, P.N. Razrabotka metoda rascheta radialnyh uprugogazodinamicheskikh podshipnikov s predvaritelno napryazhennymi lepestkami dlya malyh turbomashin nizkotemperaturnyh ustanovok: dis. kand. tekhn. nauk: 05.04.03 / Zvonarev Pavel Nikolaevich. – Moskva, 2005. – 201 s.
13. Aleksandrov, V.M. Vvedenie v mekhaniku kontaktnyh vzaimodejstvij / V.M. Aleksandrov, M.I. CHEbakov. – Rostov-na-Donu: Izd-vo OOO «CVVR», 2007. – 114 s.
14. Aleksandrov, V.M. Kontaktnye zadachi dlya tel s tonkimi pokrytiyami i proslojkami / V.M. Aleksandrov, S.M. Mhitaryan. – M.: Nauka, 1983. – 488 s.
15. Sytin, A.V. Primenenie mekhatronnyh modulej v rotornyh sistemah s podshipnikami skolzheniya / A.V. Sytin, A.YU. Babin, A.V. Kuzavka // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2017. – № 3 (323). – S. 93–101.

Sytin Anton Valerievich
FGBOU VO «OGU named after
I.S.Turgenev», Orel
Candidate of technical Sciences,
associate Professor of «Mechatronics,
mechanics and robotics»
Tel.: 89192046050
E-mail: sytin@mail.ru

Kuzavka Aleksandr Valerievich
FGBOU VO «OGU named after
I.S.Turgenev», g. Orel
PhD student
Тел.: 89192666806
E-mail: kuzavka.net@mail.ru

Rodichev Aleksey Yurievich
FGBOU VO «OGU named after
I.S.Turgenev», Orel
Candidate of technical Sciences,
associate Professor of «Mechatronics,
mechanics and robotics»
Tel.: 89051673322
E-mail: rodfox@yandex.ru

УДК 629.7.036.3

Т.В. ШЕХОВЦЕВА, Е.В. ШЕХОВЦЕВА

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНЕТАРНО–ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕДУКТОРА

Аннотация. Основная цель работы – это разработка метода проектирования редуктора для малоразмерного авиационного турбовинтового двигателя (ТВД), где входной вал соосен с выходными валами и габариты редуктора составляют не более $\varnothing 180 \times 180$ мм при частоте вращения входного вала 35000 об/мин.

Разработана оригинальная методика проектирования планетарно–дифференциального редуктора, которая позволяет выполнять оптимизацию на различных стадиях. Спроектировано на базе разработанной методики несколько редукторов, конструкция которых запатентована. В результате использования двухпарного зацепления, что делает коэффициент перекрытия более двух, увеличивается несущая способность зубчатых передач редуктора. Использование уравнительного механизма обеспечивает любое сочетание крутящего момента и частоты вращения на выходных валах. В спроектированном редукторе обеспечена разгружающая осевая нагрузка на подшипниках, что позволило уменьшить габариты редуктора.

Ключевые слова: методика проектирования, планетарно–дифференциальный редуктор, зубчатая передача

Введение

Развитие авиационной техники имеет стойкую тенденцию к уменьшению габаритов двигателя и его массы с повышением надежности работоспособности основных узлов. В этом смысле редуктора, в том числе и зубчатые колеса, исключением не являются. Современные зубчатые передачи двигателей подвержены высоким силовым, температурным и вибрационным нагрузкам. В конструктивном и технологическом отношении они являются одними из сложных деталей двигателя. Обеспечение качества их изготовления, надежности и ресурса, является актуальной задачей при создании и производстве конкурентоспособных ГТД. Повышение надежности с обеспечением минимальных габаритно–массовых характеристик – один из основных технико–экономических показателей качества зубчатых передач редукторов малоразмерных ТВД. В настоящее время повышается необходимость в создании методики проектирования редуктора ТВД с оптимизацией геометрии зуба с учетом сокращения цикла его создания. Это связано с востребованностью малоразмерных двигателей и переоснащением производства современным технологическим оборудованием.

Уменьшение габаритов редукторов ТВД и соосность выходных и входного валов требует применять компактные конструктивные решения без снижения требований к прочностным характеристикам зубчатых колес. Этот факт привел к широкому применению дифференциальных и планетарных передач. Но многообразие конструктивных решений и ограниченность по времени требует автоматизации процесса проектирования. Известен способ проектирования и разработки зубчатой передачи, включающий этап ввода исходных данных для разработки, затем этап определения габаритных параметров передачи, так же этап фильтрации по габаритным размерам, на котором выбирают зубчатые передачи, у которых габаритные размеры находятся в диапазонах значений, указанных на этапе ввода исходных данных, затем проводят оценку по прочностным характеристикам и выбирают габаритные окончательные размеры зубчатой передачи на окончательном этапе [1].

Недостатками данного способа являются узкая область применения данного способа, связанная с возможностью применения только для отдельно взятых зубчатых передач, а не для редуктора в целом и не для планетарных передач. Выполняется только этап прочностной оценки, что негативно сказывается на габаритных размерах зубчатой передачи, потому что фильтрация выполняется только по ширине зубчатого венца. Следовательно, данный способ является недостаточным для оптимального выбора зубчатой передачи, например, коэффициент перекрытия (модификация) зубчатого венца повышает прочность при меньших длинных размерах венца.

Известен способ автоматизированного проектирования редукторов в программном пакете «КОМПАС 3D» [2], включающий этап ввода исходных данных, затем этап определения геометрических характеристик, этап оценки по прочностным показателям передачи, этап рабочей компоновки, и окончательный этап, на котором создают модель

разрабатываемого редуктора с выбором технологических и конструкторских параметров (например, материал зубчатых колес, выбор подшипников).

Недостатком данного способа является то, что в способе имеется только этап рабочей компоновки без наличия эскизной компоновки, что увеличивает время проектирования редуктора, связанное с выбором его оптимальной конструкции, а так же требуется высокая квалификация персонала для анализа проектируемых конструкций. Еще одним недостатком является ограниченная область применения способа, позволяющая выполнять разработку только простых одноступенчатых редукторов, имеющих один входной вал и один выходной вал, а так же для передач только внешнего зацепления.

Известен способ изготовления редуктора [3], включающий этап ввода исходных данных, этап разработки планетарной передачи с обеспечением условий соседства, соосности и сборки, и этап фильтрации по передаточному числу, на котором выбирают конструкцию редуктора, итоговое передаточное число которого удовлетворяет исходным данным.

Недостатками данного способа являются отсутствие прочностной оценки при разработке конструкции и отсутствие условий выбора оптимального варианта конструкции редуктора, в результате чего окончательный вариант конструкции редуктора выбирается исходя из квалификации инженера. Еще одним недостатком является ограниченная область применения, так как способ, возможно, применять только для редукторов с одной планетарной передачей.

Наиболее близким является способ изготовления редуктора [4], включающий этап ввода исходных данных для разработки, после которого следует этап составления максимального количества вариантов конструкции, так же этап фильтрации, этап оценки и выбора и окончательный этап получения конструкторского решения.

Недостатками способа являются то, что визуализация проектируемого редуктора осуществляется только на окончательном этапе с последующим этапом фильтрации, которому предшествует большой объем проектных работ по разработке всех вариантов возможной конструкции редуктора. Фильтрация выполняется только по диапазону параметров, заданных в исходных данных, то есть несколько вариантов (минимум два) доходят до последнего этапа проектирования, и только после этого по конструктивным параметрам выбирается один вариант. Следовательно, данный способ обладает высокой трудоемкостью.

Таким образом, возникает актуальная задача разработки методики проектирования редукторов любого типа, где будут учтены возможные сочетания различных типов передач и зацеплений, так же снижение трудоемкости проектирования, связанное с наглядностью этапов и с наличием нескольких этапов фильтрации, позволяющих в результате выбрать оптимальную конструкцию редуктора, удовлетворяющую требованиям исходных данных.

Целью работы является создание методики оптимальной и наглядной разработки конструкции редуктора малоразмерного ТВД с повышением несущей способности зубчатых колес за счет геометрии зацепления при уменьшении частоты вращения от входного вала к выходным около пяти раз.

Новизна работы заключается в разработке оригинальной методики проектирования редукторов [5] со снижением трудоемкости на проектирование редуктора благодаря наличию наглядных этапов (этапы эскизной и рабочей компоновки), а также этапов основной и дополнительной фильтрации (по геометрическим показателям) для оперативной оптимизации конструкции и этапа оценки и выбора по показателям (конструктивные, технологические, прочностные, эксплуатационные).

Практическая значимость и достоверность применения данной работы наглядно представлена в разработанных и наиболее перспективных редукторах [6–9] с оценкой несущей прочности зубчатых передач и их габаритов.

Алгоритм проектирования редуктора

Разработана методика проектирования редуктора [5], содержащая этап ввода исходных данных для разработки, после которого следует этап составления максимального количества вариантов конструкции, так же этап фильтрации, этап оценки и выбора и окончательный этап получения конструкторского решения. На рисунке 1 представлен общий

вид алгоритма проектирования редуктора. Он позволяет в зависимости от сочетания типов ступеней и зацепления формировать максимально применимую базу различных редукторов.

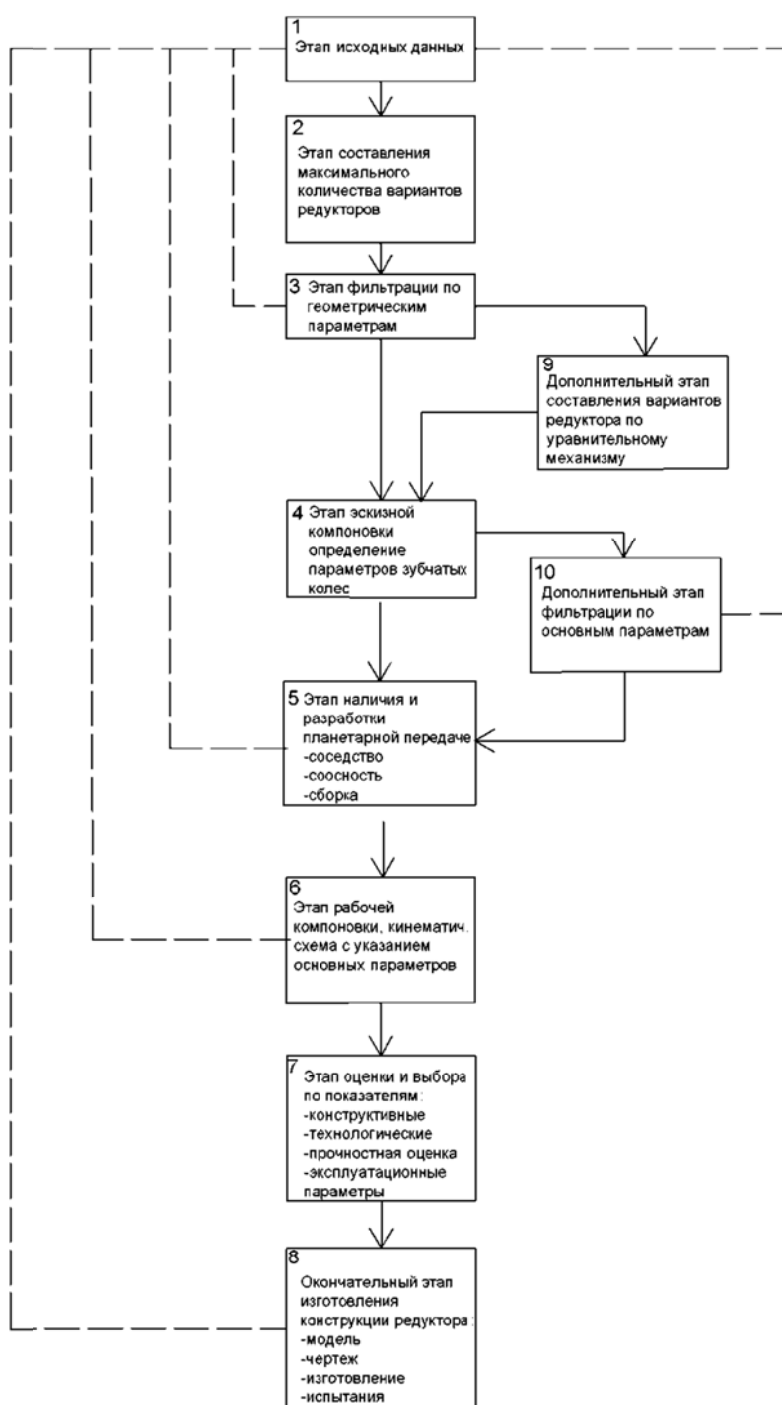


Рисунок 1 – Укрупненная схема проектирования редуктора

Затем на этапе фильтрации по геометрическим параметрам выбирают ряд редукторов, для которых возможно построить структурную схему. Далее следует этап эскизной компоновки, на котором составляют эскиз кинематической схемы нескольких редукторов с учетом топологических связей и определением основных параметров зубчатых колес. Определяется наличие и разработка планетарной передачи с обеспечением условий соседства, соосности и ее сборки. Затем переходят на этап рабочей компоновки, после этого осуществляют этап оценки и выбора окончательной конструкции редуктора, в котором осуществляют оценку каждого редуктора из группы редукторов по конструктивным, технологическим, прочностным и эксплуатационным параметрам и выбирают в зависимости от значения этих параметров рекомендуемую конструкцию редуктора и на окончательном этапе получения конструкторского решения выполняют модель рекомендованной

конструкции редуктора, затем конструкторский чертеж, на основе которого изготавливают готовый редуктор с двумя выходными валами, затем проводят испытания изготовленного редуктора для подтверждения заявленных исходных данных.

После этапа фильтрации по геометрическим параметрам дополнительно проводят этап составления вариантов редуктора с уравнительным механизмом в зависимости от сочетания типа зацепления и типа передачи.

После этапа эскизной компоновки дополнительно вводят этап фильтрации группы выбранных редукторов по основным параметрам, на котором из группы выбранных редукторов выбирают для последующей разработки редуктора, у которых значения основных параметров находятся в диапазонах значений, указанных на этапе ввода исходных данных.

На рисунке 2 представлен подробный алгоритм проектирования редуктора, в котором заложена возможность оптимизации на трех основных этапах – проверка геометрической совместимости (этап 3), определение передаточного отношения (этап 10) и разработка планетарного механизма (этап 5).

Предложенный метод изготовления редуктора позволяет изготовить редуктор оптимальной конструкции, удовлетворяющий требованиям заказчика. Способ позволяет изготовить конструкцию любого редуктора (от простого до планетарного и/или дифференциального редуктора) благодаря тому, что учтены возможности сочетания передач с различными вариантами зацепления и механизмов. Применение данной методики способствует снижению трудоемкости на проектирование изготовление редуктора благодаря наличию наглядных этапов (этапы эскизной и рабочей компоновки), а также этапов фильтрации (по геометрическим показателям) и этапа оценки и выбора по показателям (конструктивные, технологические, прочностные, эксплуатационные).

Данный алгоритм был опробован на практике при проектировании редуктора для малоразмерного турбовинтового двигателя с одним входным валом (ротор) и двумя выходными валами (нагружающие элементы). Поэтапная разработка представлена на базе подробного алгоритма по рисунку 2.

Этап 1: Исходные данные:

- Частота вращения входного вала 35000 об/мин;
- Частота вращения выходных валов 6860...7000 об/мин;
- Максимальная передаваемая мощность редуктором 1000 кВт;
- Коэффициент полезного действия (КПД) не ниже 0,99;
- Ресурс не менее 30 часов;
- Габаритные размеры не более Ø170 мм и длина не более 170 мм;
- Масса редуктора не более 6 кг;
- Валы соосны;
- Направление вращения выходных валов – противоположное;
- Распределение крутящего момента по выходным валам 50%–50%;

Частота вращения выходных валов – одинаковая.

Этап 2: Максимальное возможное количество вариантов редукторов данного типа тридцать шесть, учитывая все существующие конструкции [10–13], причем редуктор имеет быстроходную и тихоходную ступени.

Этап 3: Из этих тридцати шести вариантов редукторов проверку по геометрической совместимости прошли шестнадцать схем (рисунок 2).

Этап 9: Для такого типа редукторов необходим уравнительный механизм. По конструктивным особенностям его могут иметь только десять вариантов редукторов. Причем вариантов уравнительных механизмов может быть тридцать шесть, для разработки такого редуктора подходят пятнадцать вариантов.

Этап 4: Строят эскизную компоновку десяти редукторов с уравнительным механизмом и определяют основные параметры зубчатых зацеплений (число зубьев, модуль, ширина зубчатого венца, угол профиля). Получается девять схем редукторов, пример одной из схем показан на рисунке 2.

Этап 10: не требуется.

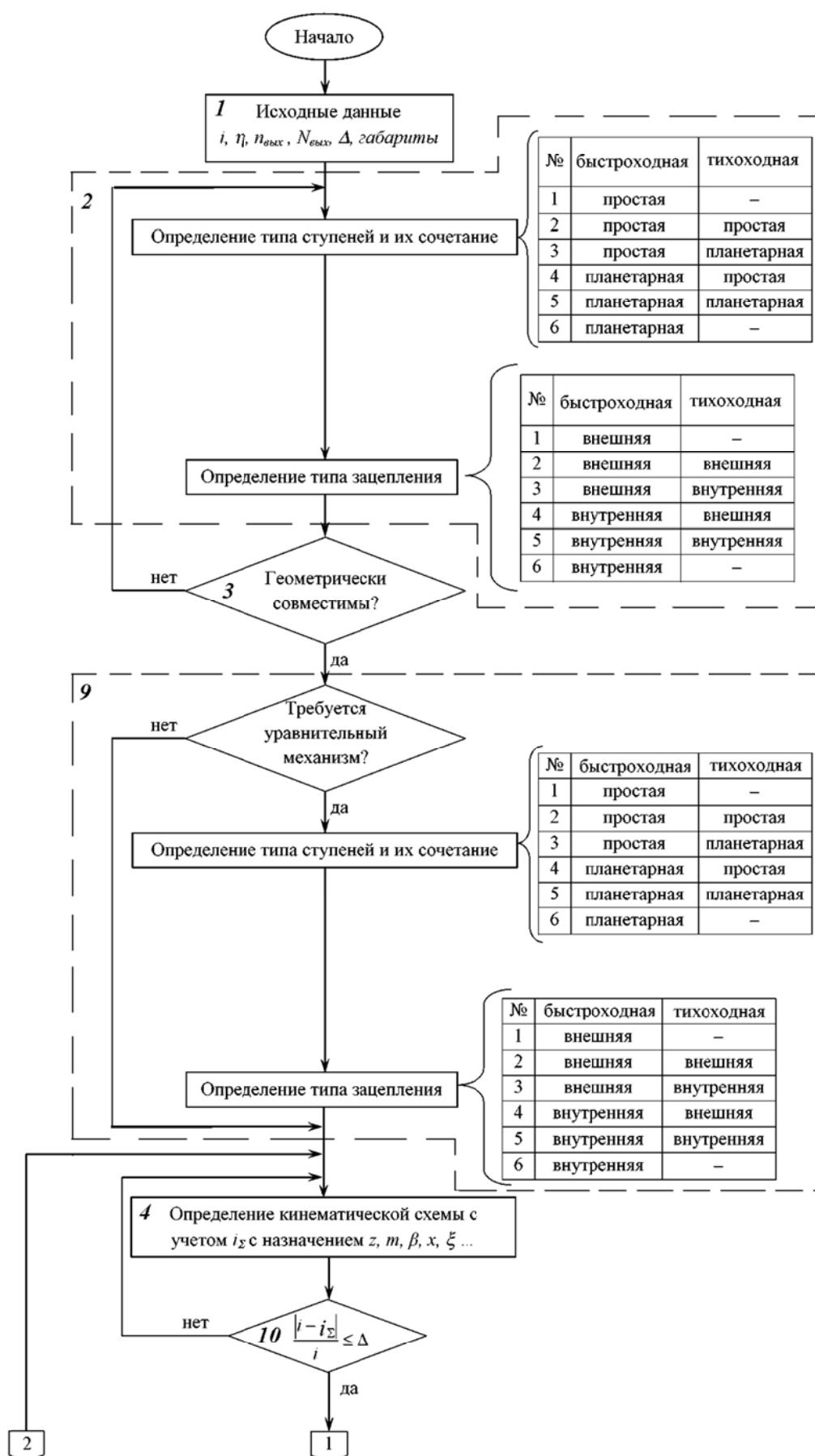


Рисунок 2 – Начало подробного алгоритма проектирования редуктора

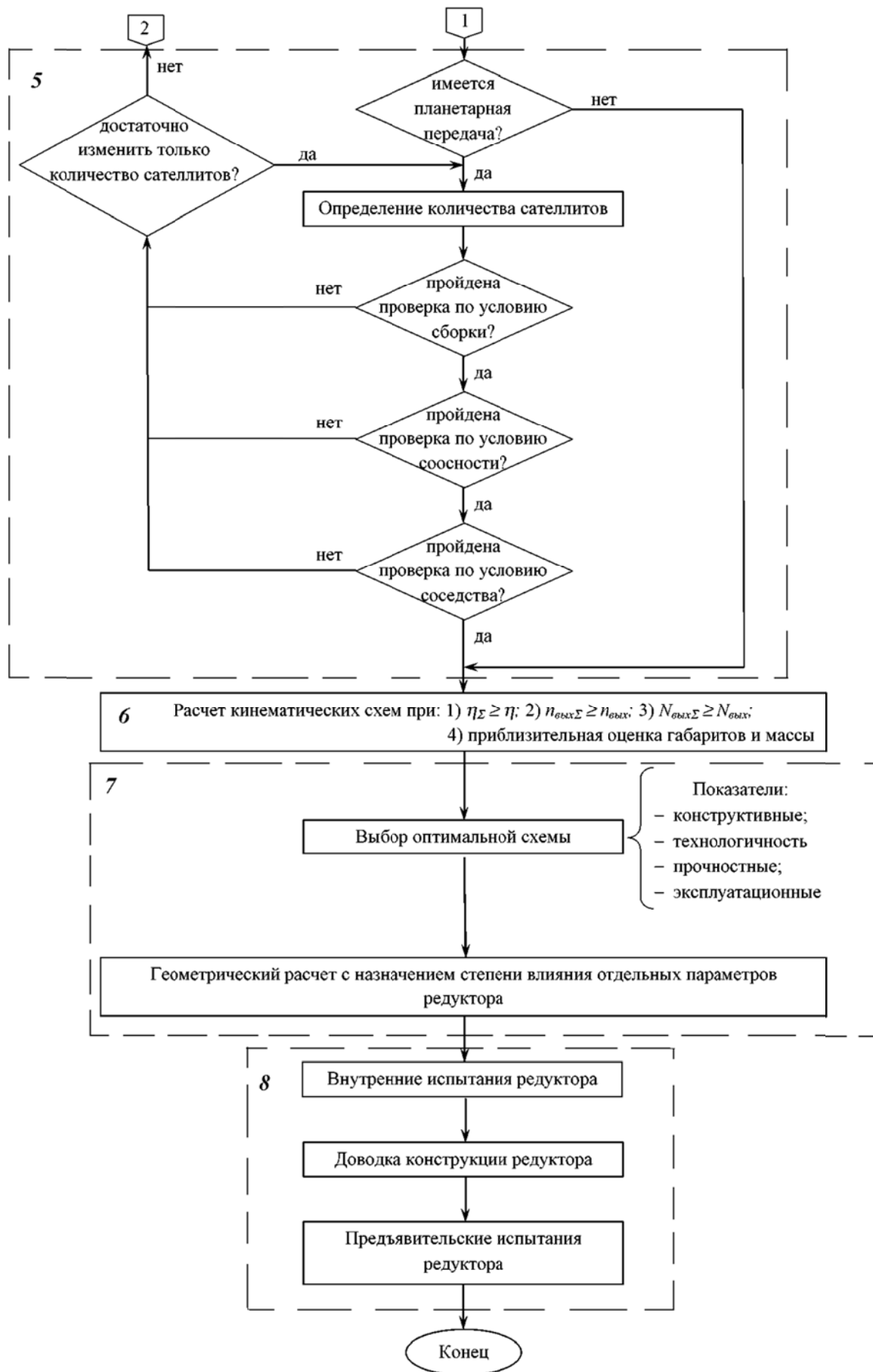


Рисунок 2 – Окончание подробного алгоритма проектирования редуктора

Этап 5: Для каждого из девяти редукторов определяют необходимость наличия планетарной передачи, так чтобы соблюдались требования исходных данных и условия сборки соседства и соосности. Для разрабатываемого редуктора планетарная передача необходима с количеством сателлитов 2–6 штук. Таким образом, остается пять схем редукторов для дальнейшей разработки [6–9].

Этап 6: Составляют рабочую компоновку каждого из пяти редукторов (рисунок 3) с определением оставшихся основных параметров (таблица 1) или их уточнений (число зубьев, модуль, ширина зубчатого венца, угол профиля и т.д.)

Этап 7: Оценку каждой из пяти конструкций редуктора ведут по требованиям, указанным в исходных данных:

- по КПД для каждой ступени и общее η_{Σ} ;
- по частоте вращения выходных валов $n_{вых\Sigma 1}$, $n_{вых\Sigma 2}$;
- по передаваемой мощности выходных валов $N_{вых\Sigma 1}$, $N_{вых\Sigma 2}$;
- по габаритно–массовым параметрам;
- по прочности: напряжения изгиба, напряжения контакта, запас по изгибной прочности, запас по контактной прочности, окружная скорость.

Таким образом, выбирают только одну конструкцию редуктора, которая удовлетворяет этим требованиям [8] и показана на рисунке 4.

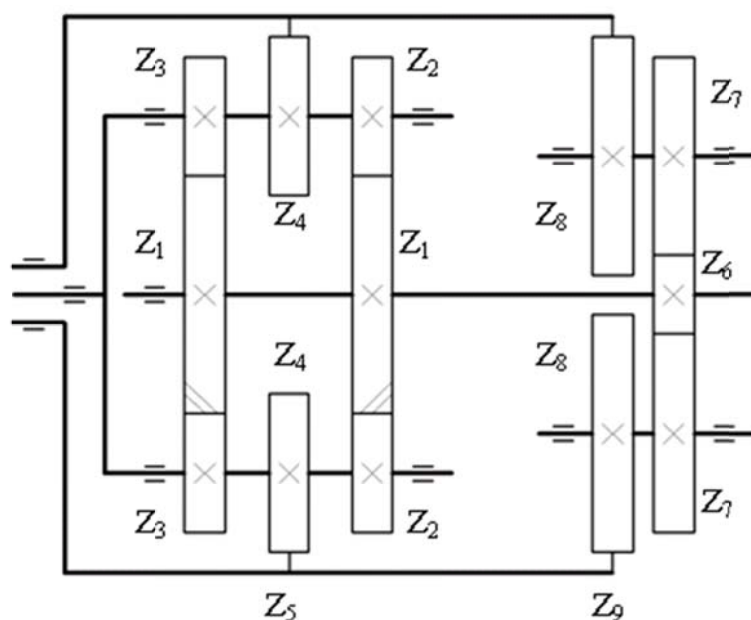


Рисунок 3 – Кинематическая схема зацепления с уравнительным механизмом

Таблица 1 – Геометрические параметры зубчатых зацеплений

Зубчатое колесо	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9
Число зубьев	38	25		31	96	25	32	20	78
Модуль, мм	1,25								
Ширина зубчатого венца, мм	15			5	6,5	5		6	
Угол профиля, α	25°								
Угол наклона, β	30°			—		12°		—	
Коэффициент смещения, x	−0,45...0,30								
Коэффициент перекрытия	не менее 2			1,3...1,9		не менее 2		1,3...1,9	
Межосевое расстояние, мм	40,8			−40,8		36		−36	

– по КПД $\eta_{\Sigma} \approx 0,9915$

- 1) быстроходная ступень $\eta_b \approx 0,9965$;
 - 2) тихоходная ступень $\eta_m \approx 0,9985$;
 - 3) уравнильный механизм $\eta_z \approx 0,9985$.
- по $n_{вых\Sigma 1}=6900$ об/мин, $n_{вых\Sigma 2}=6900$ об/мин;
 - по $N_{вых\Sigma 1} \approx 1000$ к Вт, $N_{вых\Sigma 2} \approx 1000$ к Вт;
 - по массе 5,5...6 кг.
 - по габаритным размерам $\varnothing 170 \times 167$ мм;
 - по прочности (таблица 2).

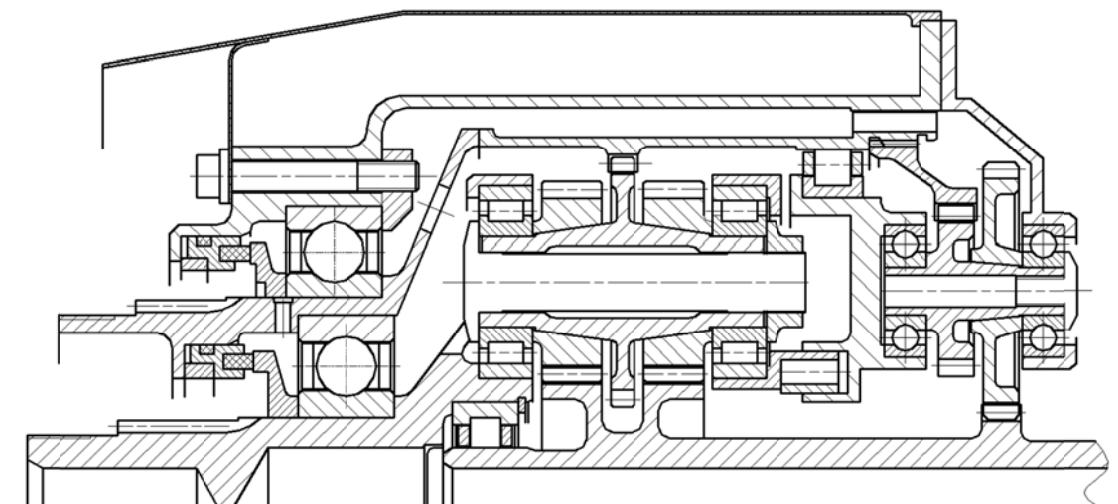


Рисунок 4 – Планетарно-дифференциальный редуктор ТВД

Этап 8: По рабочей компоновке схемы редуктора строят модель редуктора, чертеж (фрагмент чертежа показан на рисунке 5) и изготавливают сам редуктор, который отправляют на дальнейшие испытания.

Таблица 2 – Параметры спроектированного редуктора

Напряжения изгиба, МПа	570...630			
Запас по изгибной прочности	не менее 1,5			
Напряжения контакта, МПа	970...1530			
Запас по контактной прочности	не менее 1,1			
Окружная скорость (рисунок 4), м/с	Z_1-Z_3	Z_4-Z_5	Z_6-Z_7	Z_8-Z_9
	71,14	87,24	57,27	35,8

Заключение

1. Разработанная методика позволяет проектировать редуктор с двумя нагружающими элементами (выходными валами) с выполнением оптимизации по нескольким параметрам (конструктивным, технологическим и эксплуатационным) с последующими испытаниями и доводкой редуктора.

Использование уравнильного механизма обеспечивает передачу мощности от ведущего вала к выходным валам. Передаваемая мощность механизмом загрузки определяется по формуле:

$$N_{згр} = \frac{N_{ред}}{|i| + 1}, \quad (1)$$

где $N_{згр}$ – мощность уравнильного механизма;
 $N_{ред}$ – мощность редуктора;

перекрытия больше 2) и увеличения числа зубьев в передачах. Это достигается применением в конструкции передачи с двумя косозубыми зубчатыми колёсами внешнего зацепления со встречными углами наклона линии зуба относительно друг друга – угол наклона линии зуба на начальной окружности $\beta = (20 \dots 30)^\circ$, что позволяет довести рабочий угол внешнего зацепления до $\alpha_w = 29,205^\circ$ и рабочий угол внутреннего зацепления до $\alpha_w = 26,571^\circ$.

Высокие углы зацепления и большее количество зубьев, по сравнению с одновенцовым прямозубым сателлитом позволило довести КПД наружного зацепления до $\eta_n = 99,65$ и внутреннего зацепления до $\eta_v = 99,85$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные зубчатые передачи и редукторы Справочник / под ред. Э.Б. Вулгакова. – М. Машиностроение, 1981 г. – 374 с.
2. Кидрук, М. Авторское приложение для КОМПАС–3D. Автоматизируем проектирование редукторов / Максим Кидрук; <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=14850&iid=705>, дата обращения 30.04.2014.
3. Saulesce, Radu On the use of 2 dof planetary gears as “speed increasers” in small hydros and wind turbines / Radu Saulesce, Oliver Climescu, Codruta Jaliu, Dorin Valentin Diaconescu: Proceedings of the ASME 2011 International Desidn Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011. – USA, Washington, DC, 2011 – 10 p.
4. Пат 2433470 Япония, МПК7 G 06 F17/50. Система и способ поддержки проектирования изделия / Мори Хацуо, Куре Хиротака; патентообладатель: АйЭйчАй Корпорейшен. – № 2010117348/08; заявл. 03.10.2008, опубл. 10.11.2011, бюл. №31. – 40 с.
5. Заявка 2014120167. Способ изготовления редуктора / Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель: Открытое акционерное общество «Научно–производственное объединение «Сатурн». – заявл. 19.05.2014;
6. Пат 2528236 Российская Федерация, МПК7 F 02 C7/36. Планетарно–дифференциальный редуктор / Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно–производственное объединение «Сатурн». – № 2013139906/06; заявл. 27.08.2013; опубл. 10.09.2014, бюл. №25. – 8 с.
7. Пат 2532089 Российская Федерация, МПК7 F 02 C7/36. Дифференциальный редуктор турбовинтового двигателя / Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно–производственное объединение «Сатурн». – № 2013148351/06; заявл. 29.10.2013; опубл. 27.10.2014, бюл. №30. – 11 с.
8. Пат 140814 Российская Федерация, МПК7 F 16 H1/46. Планетарно–дифференциальный редуктор турбовинтового двигателя / Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно–производственное объединение «Сатурн». – № 2013156152/11; заявл. 17.12.2013; опубл. 20.05.2014, бюл. №14. – 3 с.
9. Пат 145078 Российская Федерация, МПК7 F 16 H1/48. Планетарно–дифференциальный редуктор ТВД / Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно–производственное объединение «Сатурн». – № 2014113729/11; заявл. 08.04.2014; опубл. 10.09.2014, бюл. №25. – 3 с.
10. Скубачевский, Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Скубачевский Г. С. – 4–е изд., исправленное и доп. – М., Машиностроение, 1974 г. – 540 с.
11. Максимов, Н.А. Двигатели самолетов и вертолетов. Основы устройства и летной эксплуатации / Максимов Н.А., Секистов В.А. – М., Воениздат, 1977 г. – 343 с.
12. Пат 2346172 Российская Федерация, МПК7 F 02 C7/36. Редуктор газотурбинного двигателя / Кузнецов В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Авиадвигатель». – № 2007107573/06; заявл. 28.02.2007; опубл. 10.02.2009, бюл. №4. – 6 с.
13. Пат 2316667 Российская Федерация, МПК7 F 02 K3/072, F 16 C21/00. Турбореактивный двигатель сверхвысокой степени двухконтурности с редукторным приводом двухрядного вентилятора противоположного вращения / Кузнецов В.А., Пожаринский А.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Авиадвигатель». – № 2006103474/06; заявл. 06.02.2006; опубл. 10.02.2008, бюл. №. – 8 с.

Шеховцева Татьяна Владимировна
ФГБОУ ВО «РГТУ имени П.А. Соловьева»,
г. Рыбинск
Кандидат технических наук, начальник отдела
нормативной документации
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53
Тел. 8–920–108–24–70
E-mail: tanyha_fischburg@mail.ru

Шеховцева Евгения Владимировна
ПАО «ОДК–Сатурн», г. Рыбинск
Кандидат технических наук, эксперт по приводам
152935, г. Рыбинск, пр. Ленина, 163
Тел. (4855) 29–62–61
E-mail: evgeniya.shehovtseva@uec-saturn.ru

T.V. SHEHOVTSEVA, E.V. SHEHOVTSEVA

THE DESIGN METHOD OF THE PLANETARY–DIFFERENTIAL DRIVE

Abstract. *The main purpose of work is the development of drive design method for small aircraft turbo-propeller engine (TPE), where the input shaft is coaxial with output shafts, and the gearbox sizes are not more than $\varnothing 180 \times 180$ mm for the rate speed of input shaft 35000 r/min. The original design method of the planetary–differential drive was developed and allows the execution of the optimization on different stages. Some drives were designed according to the base of the developed method, the construction of which was patented. As the result of using double tooth contact, which make the contact ratio more then two, the bearing resistance of the drive increases. The use of leveling device provides any combination of turning torque and rotation frequency on output shafts. In the designed drive the unloading thrust load is provided on the bearings, which allowed the reducing of the drive size.*

Keywords: *design method, planetary–differential drive, gear.*

BIBLIOGRAPHY

1. Aviatsonnyye zubchatyye peredachi i reduktory Spravochnik / pod. red. E.B. Vulgakova. – M. Mashinostroyeniye, 1981 g. – 374 s.
2. Kidruk, M. Avtorskoye prilozheniye dlya KOMPAS–3D. Avtomatiziruyem proyektirovaniye reduktorov / Maksim Kidruk; <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=14850&iid=705>, data obrashcheniya 30.04.2014.
3. Saulesce, Radu On the use of 2 dof planetary gears as “speed increasers” in small hydros and wind turbines / Radu Saulesce, Oliver Climescu, Codruta Jaliu, Dorin Valentin Diaconescu: Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011. – USA, Washington, DC, 2011 – 10 p.
4. Pat 2433470 Yaponiya, MPK7 G 06 F17/50. Sistema i sposob podderzhki proyektirovaniya izdeliya / Mori Khatsuo, Kure Khirataka; patentoobladatel: AyEychAy Korporeyshen. – № 2010117348/08; zayavl. 03.10.2008, opubl. 10.11.2011, byul. №31. – 40 s.
5. Zayavka 2014120167. Sposob izgotovleniya reduktora / Shekhovtseva Ye.V., Nikiforov V.A.; zayavitel: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Nauchno–proizvodstvennoye ob'yedineniye «Saturn». – zayavl. 19.05.2014;
6. Pat 2528236 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 F 02 C7/36. Planetarno–differentsialnyy reduktor / Shekhovtseva Ye.V., Nikiforov V.A.; zayavitel i patentoobladatel: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Nauchno–proizvodstvennoye ob'yedineniye «Saturn». – № 2013139906/06; zayavl. 27.08.2013; opubl. 10.09.2014, byul. №25. – 8 s.
7. Pat 2532089 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 F 02 C7/36. Differentsialnyy reduktor turbovintovogo dvigatelya / Shekhovtseva Ye.V., Nikiforov V.A.; zayavitel i patentoobladatel: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Nauchno–proizvodstvennoye ob'yedineniye «Saturn». – № 2013148351/06; zayavl. 29.10.2013; opubl. 27.10.2014, byul. №30. – 11 s.
8. Pat 140814 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 F 16 H1/46. Planetarno–differentsialnyy reduktor turbovintovogo dvigatelya / Shekhovtseva Ye.V., Nikiforov V.A.; zayavitel i patentoobladatel: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Nauchno–proizvodstvennoye ob'yedineniye «Saturn». – № 2013156152/11; zayavl. 17.12.2013; opubl. 20.05.2014, byul. №14. – 3 s.
9. Pat 145078 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 F 16 H1/48. Planetarno–differentsialnyy reduktor TVD / Shekhovtseva Ye.V., Nikiforov V.A.; zayavitel i patentoobladatel: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Nauchno–proizvodstvennoye ob'yedineniye «Saturn». – № 2014113729/11; zayavl. 08.04.2014; opubl. 10.09.2014, byul. №25. – 3 s.
10. Skubachevskiy, G. S. Aviatsonnyye gazoturbinnyye dvigateli. Konstruktsiya i raschet detaley / Skubachevskiy G. S. – 4–ye izd., ispravlennoye i dop. – M., Mashinostroyeniye, 1974 g. – 540 s.
11. Maksimov, N.A. Dvigateli samoletov i vertoletov. Osnovy ustroystva i letnoy ekspluatatsii / Maksimov N.A., Sekistov V.A. – M., Voenizdat, 1977 g. – 343 s.
12. Pat 2346172 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 F 02 S7/36. Reduktor gazoturbinnogo dvigatelya / Kuznetsov V.A.; zayavitel i patentoobladatel: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Aviadvigatel». – № 2007107573/06; zayavl. 28.02.2007; opubl. 10.02.2009, byul. №4. – 6 s.
13. Pat 2316667 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 F 02 K3/072, F 16 C21/00. Turboreaktivnyy dvigatel sverkhvysokoy stepeni dvukhkонтурности s reduktornym privodom dvukhryadnogo ventilyatora protivopolozhnogo vrashcheniya / Kuznetsov V.A., Pozharinskiy A.A.; zayavitel i patentoobladatel: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Aviadvigatel». – № 2006103474/06; zayavl. 06.02.2006; opubl. 10.02.2008, byul. №. – 8 s.

Shehovtseva Tatiana Vladimirovna
FSBEI of HE «RSATU, Rybinsk
Candidate of technical Sciences,
the head of the department
of normative documentation,
53, str. Pushkina, Rybinsk, 152934
Tel. 8–920–108–24–70
E–mail: tanyha_fischburg@mail.ru

Shehovtseva Evgeniya Vladimirovna
PJSC «UEC–Saturn», Rybinsk
Candidate of technical Sciences, drives expert,
163 Lenin Ave. Rybinsk, 152935
Tel. (4855) 29–62–61
E–mail: evgeniya.shehovtseva@uec-saturn.ru

М.А. СИТНИКОВА, А.И. БУКОВСКИЙ

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЧИСЛОВОЙ ЛИНИИ

Аннотация. Владение математическими навыками имеет большое значение, как для каждого конкретного человека, так и для общества в целом. Недостаточная сформированность основных математических навыков и понимания числовых величин, в последствие, может привести к проблемам в карьерном росте и снижению качества жизни в целом.

На сегодняшний день у многих взрослых и детей наблюдается боязнь математики (*math anxiety*), это считается полноценной фобией, проявляющейся как сильно выраженный навязчивый страх. Боязнь математики начинается с непонимания основ и порождает отсутствие интереса к более сложным абстрактным понятиям.

Предотвратить возникновение и развитие, а также скорректировать уже начавшую формироваться математическую фобию в старшем дошкольном и младшем школьном возрасте помогают развивающие занятия, которые в увлекательной игровой форме позволяют научить ребенка выполнять сравнение числовых величин, определять позицию числа на числовой линии.

В настоящее время существуют пространственно-числовые тренинги, развивающие игры (в том числе и компьютерные), однако, более перспективным, на наш взгляд, является применение тренинга на основе воплощенного числового познания в форме игры с элементами социального взаимодействия.

Ключевые слова: робот, математика, обучение счету, числовые тренинги, числовая линия.

Введение.

Математика является неотъемлемой частью повседневной жизни и играет важную роль в современном обществе на всех уровнях. Приобретение математических способностей имеет большое значение, как для каждого конкретного человека, так и для общества в целом [1]. Отсутствие или недостаточная сформированность основных математических навыков и понимания числовых величин может вызвать трудности в решении даже простых повседневных задачи, таких как, например, покупка товаров в магазине. В последствие отсутствие нужных математических компетенций может привести к проблемам в карьерном росте, к снижению качества жизни в целом. Этот факт был подтвержден исследованием, проведенным в Великобритании. Результаты говорят о том, что люди, испытывающие серьезные трудности с арифметикой, меньше зарабатывают, чаще болеют и чаще нарушают законы. Социологи выяснили, при условии того что удалось бы подтянуть 20% самых «математически отсталых» американцев до минимально приемлемого уровня по стандарту «Международной программы по оценке образовательных достижений учащихся» (см.: PISA), это обеспечило бы дополнительный прирост ВВП на 0,74% в год.

Сегодня у многих взрослых и детей наблюдается боязнь математики. Ученые считают это полноценной фобией (*math anxiety*) в современном обществе [2], проявляющейся как сильно выраженный навязчивый страх, не поддающийся полному логическому объяснению и обостряющийся в ситуациях необходимости решать математические задачи. Математическая фобия начинается с непонимания основ математики, с отсутствия интереса к сложным абстрактным понятиям. В дальнейшем тревога усиливается, перерастая в стресс, и человек начинает избегать объектов, видов деятельности или ситуаций, связанных с оперированием математическими понятиями. Математика не представляет собой реальную угрозу, но проявления математической фобии вызывают совершенно реальную физическую реакцию, сопровождающуюся выбросом гормонов стресса, например кортизола, что характерно для таких реакций, как "бей или беги".

Предотвратить возникновение и развитие, а также скорректировать уже начавшую формироваться математическую фобию в старшем дошкольном и младшем школьном возрасте помогают специально организованные развивающие занятия, которые в увлекательной игровой форме позволяют научить ребенка выполнять сравнение числовых величин, определять позицию числа на числовой линии, производить простейшие арифметические вычисления с одно- и двузначными числами. В настоящее время

существуют пространственно–числовые тренинги и развивающие компьютерные игры, например, "Числовая гонка" [3] и "Спасение Калькуляриса" [4], числовые настольные игры (линейные настольные игры) [5].

Однако более перспективным, на наш взгляд, является применение тренинга на основе воплощенного числового познания в форме игры с элементами социального взаимодействия. Основная идея воплощенного числового познания основана на предположении, что двигательная система не только контролирует и отслеживает действия, но также оказывает влияние на формирование мысленных представлений о числах (Domahs и др., 2008). Ярким примером воплощенного числового познания на практике является использование детьми пальцев рук для счета, которое представляет собой универсальный этап в развитии математических компетенций у детей.

Основная часть.

Двигательная активность всего тела, используемая в пространственно–числовых тренингах на основе воплощенного числового познания с использованием числовой прямой, является очень эффективной и перспективной стратегией развития различных математических навыков [6–8]. Дети во время движения слева направо вдоль числовой линии усваивают на сенсорном уровне, что большие числа требуют перемещения на большие дистанции по сравнению с малыми числами, когда достаточно сделать несколько шагов и достичь цели. Различные типы систематических движений тела вдоль числовой линии в соответствии с ориентацией слева направо могут быть использованы для усовершенствования арифметических навыков и точности при определении положения числа на линии. Включение в тренинг элементов соревнования с другими детьми или даже социальными роботами в качестве партнеров по социальному взаимодействию позволит сделать его более продуктивным достичь более значимых результатов в развитии математических навыков [9, 10]. Использование в качестве партнера ребенка робота дает возможность управлять сложностью соревнований, позволяя ребенку выигрывать достаточно часто, чтобы повысить его мотивацию.

Целью нашего исследования является разработка пространственно–числового тренинга с помощью роботизированного программно–аппаратного комплекса «Числовая линия» [11] (рисунок 1).

Все компоненты комплекса синхронизированы и связаны в беспроводную локальную сеть (центральный компьютер, к которому присоединен проектор, 2 датчика, лазерный построитель числовой линии, 2 цифровых коробки).

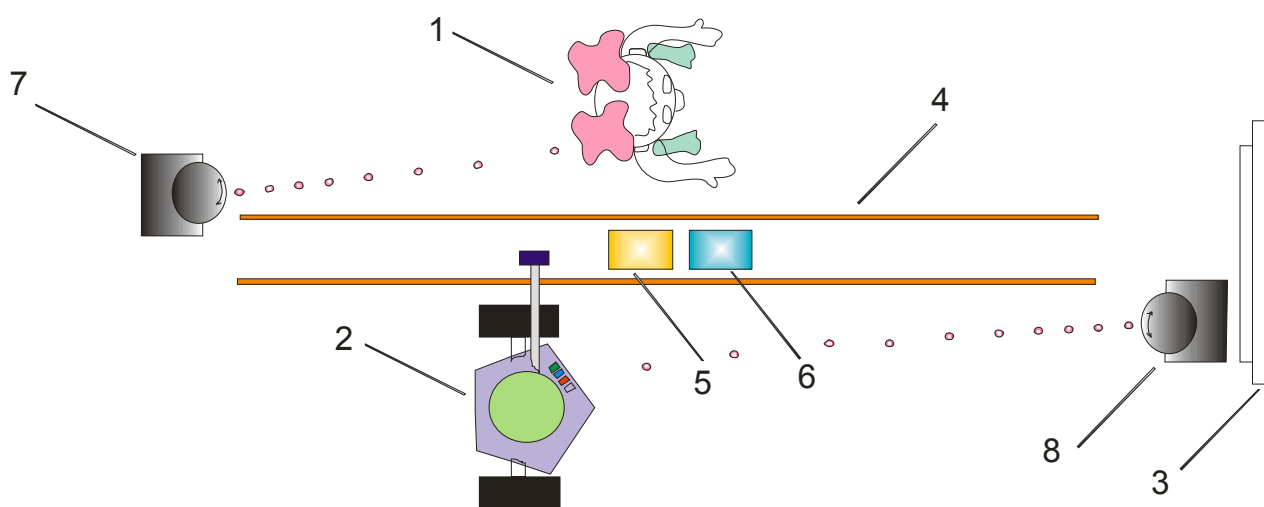


Рисунок 1 – схема роботизированной числовой линии (вид сверху):

- 1– Ребенок, 2– Робот, 3– Экран проектора, 4– Числовая линия, нарисованная лазером, 5– Коробка ребенка, 6– Коробка робота, 7– Лазерный дальномер (А) с поворотным по углу устройством, 8– Лазерный дальномер (Б) с поворотным по углу устройством

Математические задания выводятся на экране проектора (3), который должен быть закреплен на стене в видимой доступности для обоих участников. Так как все математические задачи требуют оценки положения числа на числовой линии, ребенок (1) и робот (2) одновременно начинают двигаться вдоль числовой линии. Лазерная числовая линия (4) состоит из двух сплошных линий, созданных при помощи лазерного излучателя с небольшой мощностью излучения (сопоставимой с лазерной указкой), закрепленного на потолке. С целью фиксации ответа на числовой линии, робот и ребенок могут ставить коробочки соответственно 5 и 6, чтобы блокировать сегменты на числовой линии (2 сегмента до и 2 после выбранного в качестве ответа числа автоматически блокируются). При этом на одно и то же место можно поставить только одну коробку. Расстояние от начала числовой линии до ребенка и робота определяется при помощи двух лазерных дальномеров 7,8 с изменяемым углом поворота. Также, с помощью лазерных дальномеров определяется текущее местоположение коробок 5 и 6. Эта схема может быть реализована в различных типах взаимодействия: ребенок – робот, ребенок – ребенок.

Примером робота, который может быть использован для обучения детей может быть разработанный в НИУ БелГУ презентационный робот «Пегасик» (рисунок 2). Данный робот оснащен тремя омниколесами, что позволяет ему перемещаться в любом направлении. Для управления подобным роботом разработан оригинальный алгоритм [12]. Каждое колесо робота приводится отдельным шаговым электродвигателем с редуктором. Питание осуществляется от аккумулятора, обеспечивающего непрерывную работу робота в течении 3–4 часов.



Рисунок 2. – Презентационный робот «Пегасик»

В качестве интерфейса робота используется установленный на нем планшетный компьютер. Дистанционное управление осуществляется по Wi-Fi. Робот также оснащен веб-камерой.

Помимо возможности перемещения робота в любом направлении, он обладает функциями перемещения корзины/коробки и поворота планшетного компьютера.

Основой системы управления является бюджетный микроконтроллер Atmega 64. Управление шаговыми привода колес платформы, перемещения корзинки и планшетного компьютера осуществляется посредством драйверов. Определение текущего местоположения осуществляется с использованием платы навигации В ее состав входят датчики: магнитный компас, 3 ультразвуковых датчика расстояния и оптический датчик черной линии. Связь с планшетным компьютером осуществляется посредством периферийного моста.

Заключение.

Мы ожидаем, что решение пространственных числовых задач в сочетании с движением всего тела вдоль числовой линии и взаимодействие с роботом или другим ребенком в качестве партнера в форме соревнования во время тренинга позволит получить значительные образовательные результаты, подтверждая функциональное преимущество использования телесного опыта в развитии математических способностей и навыков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hudson, C. The long-term costs of numeracy difficulties / C. Hudson, D. Price, J. Gross // Every Child a Chance Trust. – 2009. – London, UK – 55 p.
2. Artemenko, C. Neural correlates of math anxiety – an overview and implications / C. Artemenko, G. Daroczy, H.–C. Nuerk // Front. Psychol. – 2015
3. Wilson, A.J. An open trial assessment of "The Number Race", an adaptive computer game for remediation of dyscalculia / A.J. Wilson, S.K. Revkin, D. Cohen, L. Cohen, S. Dehaene // Behav. Brain Funct. – 2006
4. Kucian, K. Mental number line training in children with developmental dyscalculia / K. Kucian, U. Grond, S. Rotzer, B. Henzi, C. Schönmann, F. Plangger // NeuroImage. – 2011.
5. Siegler, R.S. Playing linear numerical board games promotes low income children's numerical development / R.S. Siegler, G.B. Ramani // Developmental Science, Special Issue on Mathematical Cognition. – 2008.
6. Fischer, U. Math with the dance mat: On the benefits of embodied numerical training approaches / U. Fischer, T. Link, U. Cress, H.–C. Nuerk, K. Moeller // Learning Technologies and the Body: Integration and Implementation in Formal and Informal Learning Environments, New York: Routledge. 2015. – p. 149–163.
7. Link, T. Walk the number line – An embodied training of numerical concepts / T. Link, K. Moeller, S. Huber, U. Fischer, H.C. Nuerk // Trends in Neuroscience and Education. 2013. – Vol. 2. – Nr. 2. – p. 74–84.
8. Link, T. On the relation between the mental number line and arithmetic competencies / T. Link, H.C. Nuerk, K. Moeller // The quarterly journal of experimental psychology. 2014. – Vol. 67. – Nr. 8. – p. 1597–1613.
9. Беляева, И.Г. Сферы применения робототехники: педагогика и математика / И.Г. Беляева // Современное технологическое обучение: от компьютера к роботу. Сб. тр. V Всерос. конф. СПб., 2015.
10. Highfield, K. Robotic Toys as a Catalyst for Mathematical Problem Solving / K. Highfield // Australian Primary Mathematics Classroom. 2010. – V. 15. – № 2. – P. 22–27.
11. Ситникова, М.А. Использование мобильного робота для интерактивного обучения счету с помощью числовой линии / М.А. Ситникова, А.Ю. Алейников, А.Н. Афонин, А.Р. Гладышев, А.В. Попова // Фундаментальные исследования. 2017. – № 5. – С. 72–77
12. Афонин, А.Н. Упрощенный расчет кинематики движения мобильного робота с тремя омниколесами / А.Н. Афонин, А.Ю. Алейников, Е.Н. Бондарева // Научные ведомости БелГУ. 2014. – № 19 (190). – Вып. 36. – С. 180–184.

Ситникова Мария Александровна
ФГАОУ ВО Белгородский государственный
национальный исследовательский университет
доцент кафедры психологии педагогического
института;
г. Белгород, Студенческая 14
Тел.: 89056717090
furmanchuk@bsu.edu.ru

Буковский Александр Иванович
ФГАОУ ВО Белгородский государственный
национальный исследовательский университет
магистрант второго года обучения, группа 07001638;
г. Белгород, Студенческая 14
Тел.: 89507184618
alexbukovskiy@mail.ru

HARDWARE SUPPORT FOR THE ROBOTIZED NUMERIC LINE

Abstract. Mastering mathematical skills is of great importance, both for each individual and for society as a whole. Insufficient formation of the basic technical skills and understanding of the number of previous values, in consequence, can lead to problems in career growth and the achievement of the quality of life in general.

To date, many adults and children have a fear of mathematics (math anxiety), this is considered a full-fledged phobia, manifested as a strong obsessive fear. Fear of mathematics begins with a lack of understanding of the fundamentals and generates a lack of interest in more complex abstract concepts.

Prevent the emergence and development, as well as adjust the already begun to form a mathematical phobia in the senior preschool and junior school age, developing classes that in an exciting game form allow you to teach the child to perform a comparison of numerical values, determine the position of the number on a numeric line.

Currently, there are spatial-numerical trainings, developing games (including computer games), however, in our opinion, more promising is the application of training based on the embodied numerical knowledge in the form of a game with elements of social interaction.

Keywords: robot, mathematics, account training, numerical trainings, numeric line.

BIBLIOGRAPHY

1. Hudson C. The long-term costs of numeracy difficulties / C. Hudson, D. Price, J. Gross // Every Child a Chance Trust. – 2009. – London, UK – 55 p.
2. Artemenko C. Neural correlates of math anxiety – an overview and implications / C. Artemenko, G. Daroczy, H.-C. Nuerk // Front. Psychol. – 2015
3. Wilson, A.J. An open trial assessment of "The Number Race", an adaptive computer game for remediation of dyscalculia / A.J. Wilson, S.K. Revkin, D. Cohen, L. Cohen, S. Dehaene // Behav. Brain Funct. – 2006
4. Kucian, K. Mental number line training in children with developmental dyscalculia / K. Kucian, U. Grond, S. Rotzer, B. Henzi, C. Schönmann, F. Plangger // NeuroImage. – 2011.
5. Siegler R.S. Playing linear numerical board games promotes low income children's numerical development / R.S. Siegler, G.B. Ramani // Developmental Science, Special Issue on Mathematical Cognition. – 2008.
6. Fischer U. Math with the dance mat: On the benefits of embodied numerical training approaches / U. Fischer, T. Link, U. Cress, H.-C. Nuerk, K. Moeller // Learning Technologies and the Body: Integration and Implementation in Formal and Informal Learning Environments, New York: Routledge. 2015. – p. 149–163.
7. Link T. Walk the number line – An embodied training of numerical concepts / T. Link, K. Moeller, S. Huber, U. Fischer, H.C. Nuerk // Trends in Neuroscience and Education. 2013. – Vol. 2. – Nr. 2. – r. 74–84.
8. Link T. On the relation between the mental number line and arithmetic competencies / T. Link, H.C. Nuerk, K. Moeller // The quarterly journal of experimental psychology. 2014. – Vol. 67. – Nr. 8. – r. 1597–1613.
9. Belyaeva I.G. Sfery primeneniya robototekhniki: pedagogika i matematika / I.G. Belyaeva // Sovremennoe tekhnologicheskoe obucheniye: ot komp'yutera k robotu. Sb. tr. V Vseros. konf. SPb., 2015.
10. Highfield K. Robotic Toys as a Catalyst for Mathematical Problem Solving / K. Highfield // Australian Primary Mathematics Classroom. 2010. – V. 15. – № 2. – P. 22–27.
11. Sitnikova M.A. Ispol'zovanie mobil'nogo robota dlya interaktivnogo obucheniya schetu s pomoshch'yu chislovoj linii / M.A. Sitnikova, A.YU. Alejnikov, A.N. Afonin, A.R. Gladyshev, A.V. Popova // Fundamental'nye issledovaniya. 2017. – № 5. – S. 72–77
12. Afonin A.N. Uproshchennyj raschet kinematiki dvizheniya mobil'nogo robota s tremya omnikolessami / A.N. Afonin, A.YU. Alejnikov, E.N. Bondareva // Nauchnye vedomosti BelGU. 2014. – № 19 (190). – Vyp. 36. – S. 180–184.

Sitnikova Maria Alexandrovna

Belgorod State National Research University
Associate Professor of the Department of Psychology of
the Pedagogical Institute;
Belgorod, Studencheskaya 14
Phone: 89056717090
Email: furmanchuk@bsu.edu.ru

Bukovsky Alexander Ivanovich

Belgorod State National Research University
master of the second year of study, group 07001638;
Belgorod, Studencheskaya 14
Phone: 89507184618
E-mail: alexbukovskiy@mail.ru

А.В. ЧАСТУХИН

ПРИМЕНЕНИЕ РТК ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СЕЛЕКТИВНОГО СПЕКАНИЯ

Аннотация. Рассмотрена одна из технологий аддитивного производства – прямое лазерное выращивание. Приведены основные преимущества использования промышленных роботов для методов прямого лазерного выращивания при изготовлении и восстановлении изделий. Приведен порядок получения управляющей программы для промышленного робота использующегося в аддитивном производстве. Данный порядок рассчитан на применении САМ (computer-aided manufacturing) системы.

Рассмотрен пример получения управляющей программы для промышленного робота KUKA KR-15 с применением специализированного программного обеспечения. В примере пошагово показан процесс расчета управляющей программы от момента добавления 3D модели в систему SprutCAM до момента генерации программы с применением постпроцессора системы управления роботом.

Ключевые слова: робототехнологический комплекс, промышленный робот, лазерное селективное спекание, программирование роботов.

Введение

В последнее время технологии аддитивного производства активно развиваются во многих отраслях промышленности [1–4]. Одним из видов аддитивных технологий является прямое лазерное выращивание. Этот вид характеризуется подачей металлического порошка непосредственно в место формирования детали. Вместе с формообразующим материалом в зону построения направляется лазерный луч для плавления частиц и специальный газ для обеспечения среды, в которой происходит процесс плавления (рисунок 1).

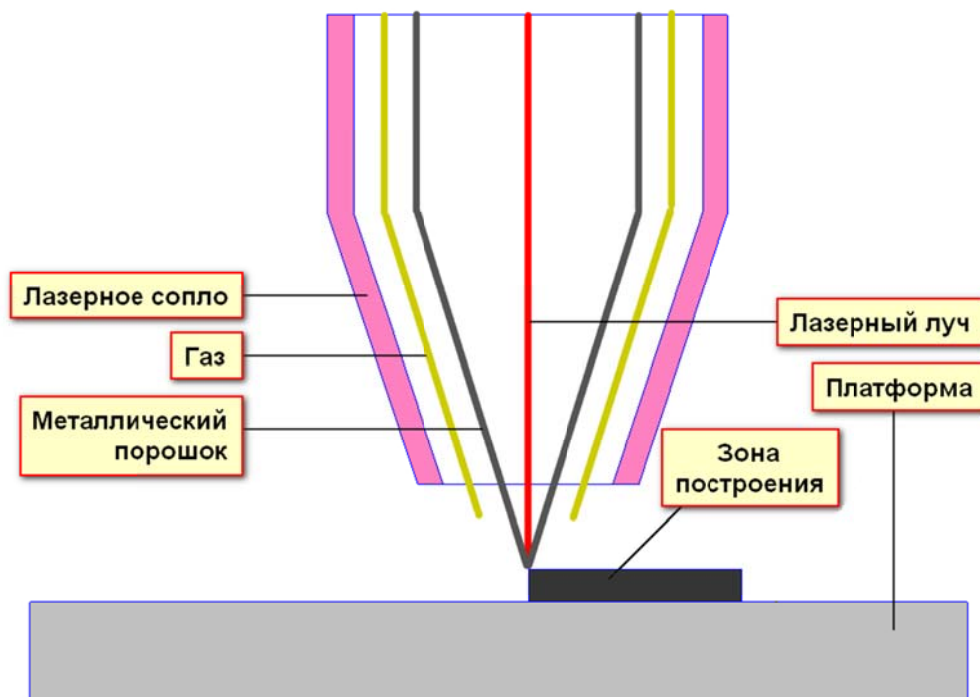


Рисунок 1 – Схема установки прямого лазерного выращивания

Основная часть

Технология прямого лазерного выращивания позволяет сократить время получения прототипа изделия. А если речь идет о мелкосерийном или единичном производстве, то и получить экономический эффект, за счет сокращения ресурсов на вспомогательную оснастку необходимую таким широко используемым технологиям как механическая обработка и литье.

Например, для получения детали литьем часто требуется предварительно изготовить литевную форму. Таким образом, чем меньше партия изделий, тем выше конечная стоимость каждого изделия в партии. Также стоит отметить, что даже небольшие изменения конструкции могут привести к изготовлению новой литевой формы. Таким образом, технология прямого лазерного выращивания может быть применима в единичном производстве при изготовлении опытных образцов.

Одним из вариантов реализации технологии прямого лазерного выращивания могут служить робототехнологические комплексы. Такие комплексы могут иметь различные компоновки: начиная от использования одного шестиосевого промышленного робота с исполнительным органом в виде лазерного устройства заканчивая несколькими такими роботами, оснащенными дополнительными поворотными устройствами и линейными перемещателями (рисунок 2) [5].

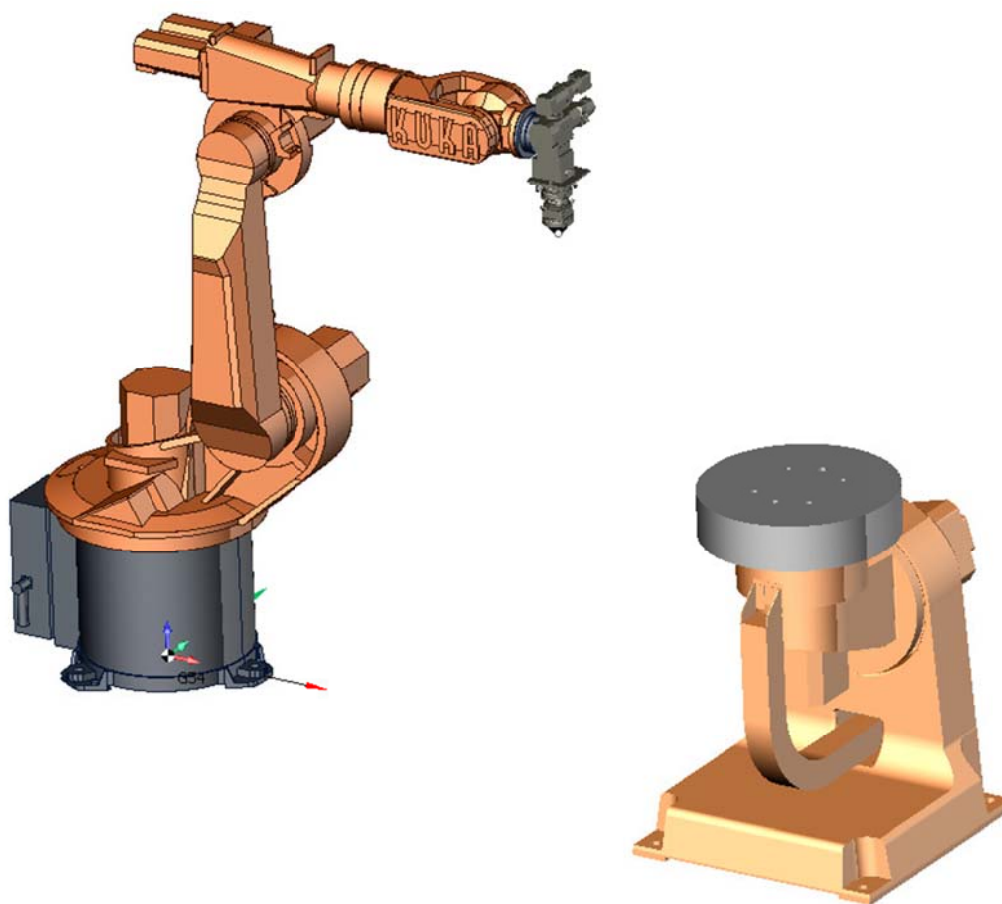


Рисунок 2 – Упрощенная трехмерная модель робототехнологического комплекса

Такие комплексы обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими 3D принтерами портального типа:

1) Обработка крупногабаритных изделий.

Робототехнологические комплексы могут изготавливать и производить ремонт крупногабаритных изделия. При этом габариты изделий не ограничиваются размерами рабочей зоной самого промышленного робота. Например, робот может быть помещен на линейный транспортер, что позволит увеличить один из габаритных размеров на величину рабочего хода транспортера. По такому принципу устроены робототехнологические комплексы по обработке длинномерных изделий.

2) Экономичность.

В примере с обработкой длинномерных изделий для увеличения рабочей зоны робототехнологического комплекса достаточно установить линейный перемещатель, что не

сильно повлияет на цену всего комплекса. В случае с 3D принтером, увеличение габаритов обрабатываемого изделия приведет к значительному удорожанию оборудования в связи со значительными изменениями конструкции (замена направляющих, новые колонны для крепления направляющих, новое основание для расположения изделия и так далее).

3) Минимизация количества поддержек

В процессе выращивания деталей должна быть предусмотрена база для создания каждого следующего слоя. При выращивании деталей с разнонаправленными элементами на 3D принтере необходимо добавлять специальные поддержки. А при выращивании деталей на робототехнологическом комплексе количество поддержек сокращается за счет изменения направления выращивания [6]. Это возможно из-за большего числа степеней свободы комплекса. Для детали представленной на рисунке 3 возможно однонаправленное выращивание вдоль оси A_1 и разнонаправленное выращивание для каждого из трех элементов. Направления определяются функциональным назначением частей изделия (рисунок 4).

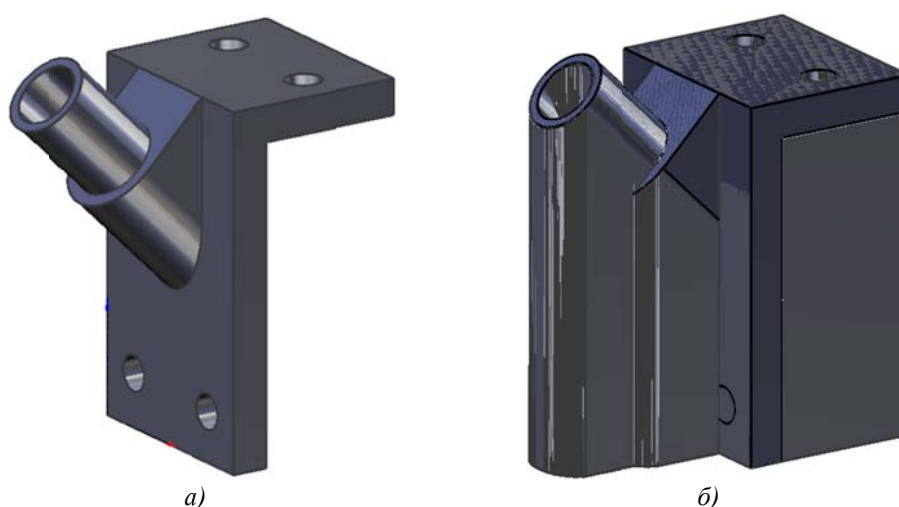


Рисунок 3 – Деталь без (а) и с (б) поддержками

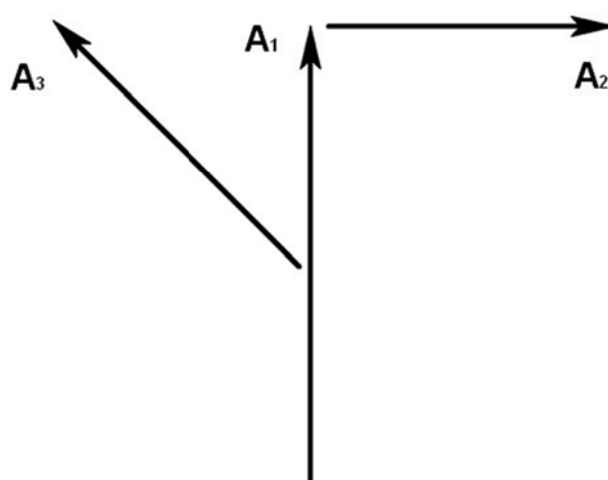


Рисунок 4 – Направления выращивания при изготовлении на робототехнологическом комплексе

Наряду с материалами, оборудованием одним из составляющих успешной реализации той или иной технологии аддитивного производства является программное обеспечение [1]. Рассмотрим технологию прямого лазерного выращивания с точки зрения программирования и управления оборудованием.

Для управления робототехнологическими комплексами на основе 6-ти осевого промышленного робота необходимо использовать функционал САМ систем [7]. Во-первых,

потому что разбиение на слои для каждого элемента является крайне трудоемкой задачей для ручного программирования. Во-вторых, требуется учет кинематики промышленного робота для перевода управляющей траектории лазерной головки в управляющую программу для робота.

CAM система должна выполнять следующий порядок действий:

1. Генерировать управляющую траекторию для каждого элемента с учетом выбранной стратегии.

2. Согласовывать управляющую траекторию с кинематикой промышленного робота.

2.1 Учитывать зоны досягаемости робота.

2.2 Учитывать предел перемещения по каждой оси робота.

2.3 Учитывать зоны сингулярности робота

2.4 Учитывать зоны, в которых возможны коллизии в виде соударений органов робота, лазерной головки, оснастки и детали

3. Моделировать технологический процесс выращивания детали

4. Преобразовывать полученную траекторию в управляющую программу конкретного робота.

Приведенную выше последовательность действий можно рассмотреть на примере подготовки управляющей программы для изделия типа «Колесо» в CAM системе SprutCAM (рисунок 5) [8].

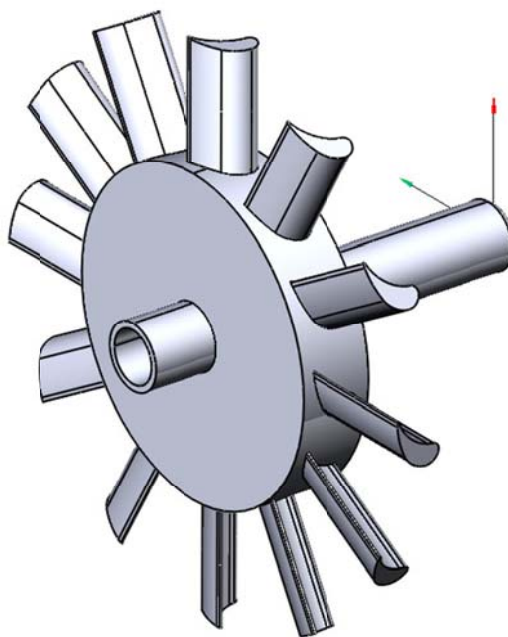


Рисунок 5 – Изделие типа «Колесо»

В качестве оборудования был выбран промышленный робот KUKA KR15 с лазерной головкой и дополнительным поворотным устройством в виде глобусного стола.

В качестве стратегии выращивания лопаток на основании колеса была выбрана стратегия спиральной наплавки с шагом 0,5 мм.

После расчета управляющей траектории (рисунок 6) был проведен анализ зон досягаемости, пределов перемещений, зон сингулярности и зон коллизий с помощью оптимизатора осей робота (рисунок 7). Для проведения такой работы был создан специальный модуль, который позволил встроить трехмерную модель робота в систему SprutCAM и передать данные о кинематике робота в модуль оптимизатора осей [9–11].

Анализ показал, что некоторые положения шестой оси робота, на которой расположен инструмент, ведут к ограничениям по углу вращения осей. Верхняя и нижняя красные зоны

указывают на выход за пределы перемещения пятой оси робота. Узкая средняя полоса указывает на выход за пределы перемещения четвертой оси робота (рисунок 8).

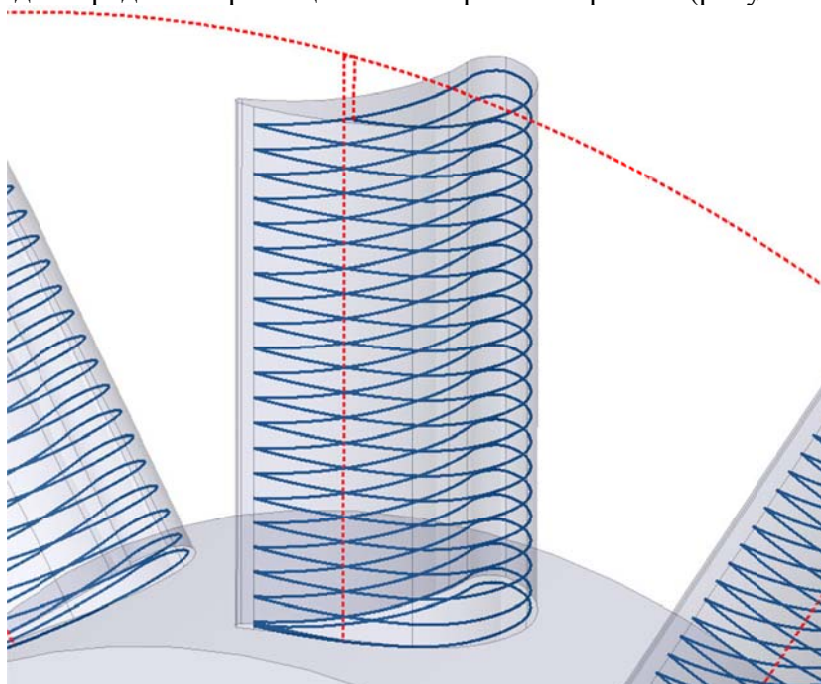


Рисунок 6 – Траектория движения лазерной головки

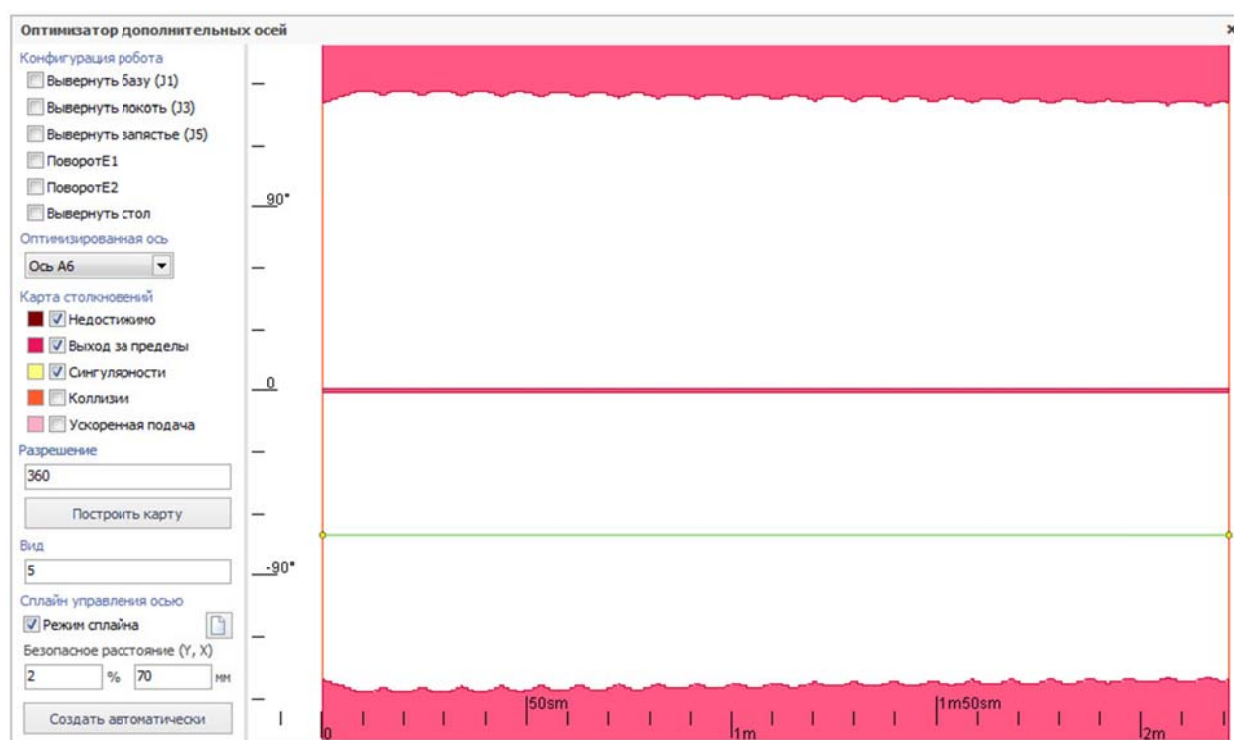


Рисунок 7 – Вид окна «Оптимизатор осей робота» в системе SprutCAM

Положение шестой оси робота было сформировано с учетом отсутствия этих зон из дальнейшего расчета.

Далее было проведено моделирование технологического процесса выращивания лопаток. Полученный результат совпал с конструкцией исходной модели. При этом был проведен визуальный контроль процесса, в ходе которого никаких проблем обнаружено не было (рисунок 9).

По полученной управляющей траектории была получена управляющая программа для промышленного робота KUKA KR 15 (рисунок 10).

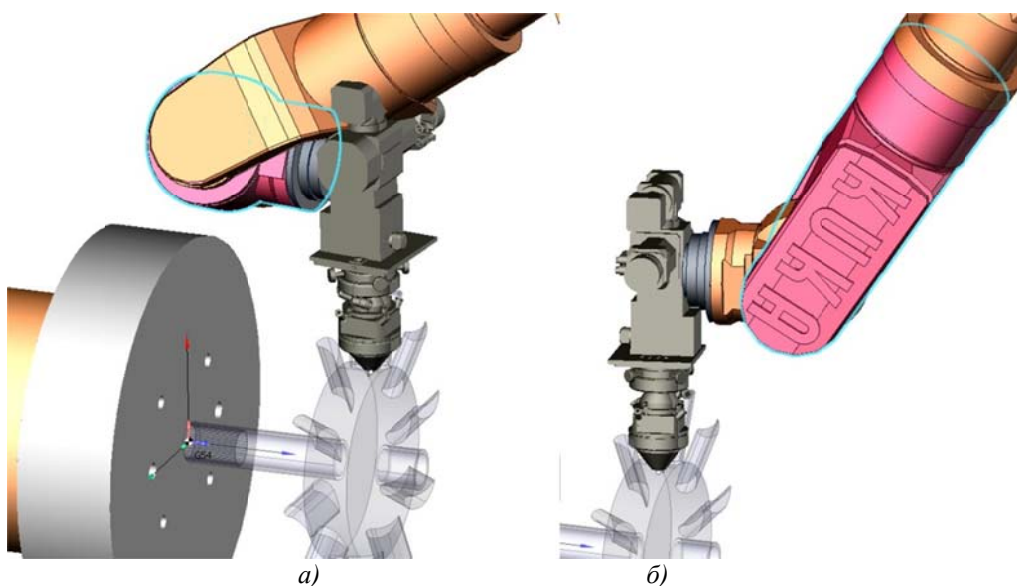


Рисунок 8 – Положение трёхмерной модели робота при выходе за пределы перемещения оси:
а – пятая ось, б – четвертая ось

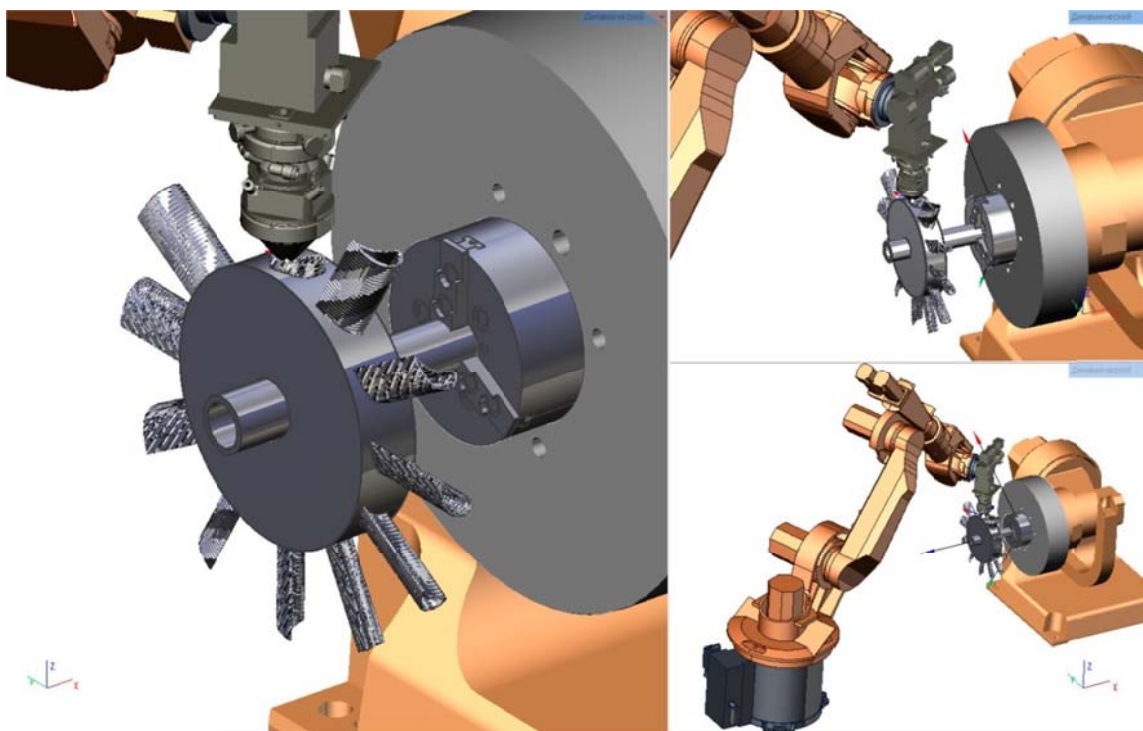


Рисунок 9 – Вид робототехнологического комплекса в момент вырачивания одной из лопаток

Заключение

Рассмотрен механизм прямого лазерного вырачивания. Предложен новый метод использования данной технологии на основе использования промышленного робота. Описаны основные преимущества использования робототехнологических комплексов для методов прямого лазерного вырачивания. Разработан порядок получения управляющей программы для робототехнологического комплекса. Такой подход значительно упрощает подготовку технологического процесса прямого лазерного вырачивания при изготовлении и восстановлении крупногабаритных изделий и изделий с разнонаправленными элементами. Создан специальный модуль для системы SprutCAM, позволяющий учитывать кинематику

промышленного робота KUKA KR15. В дальнейшем этот модуль может быть использован для получения опытных образцов при исследовании технологии прямого лазерного выращивания.

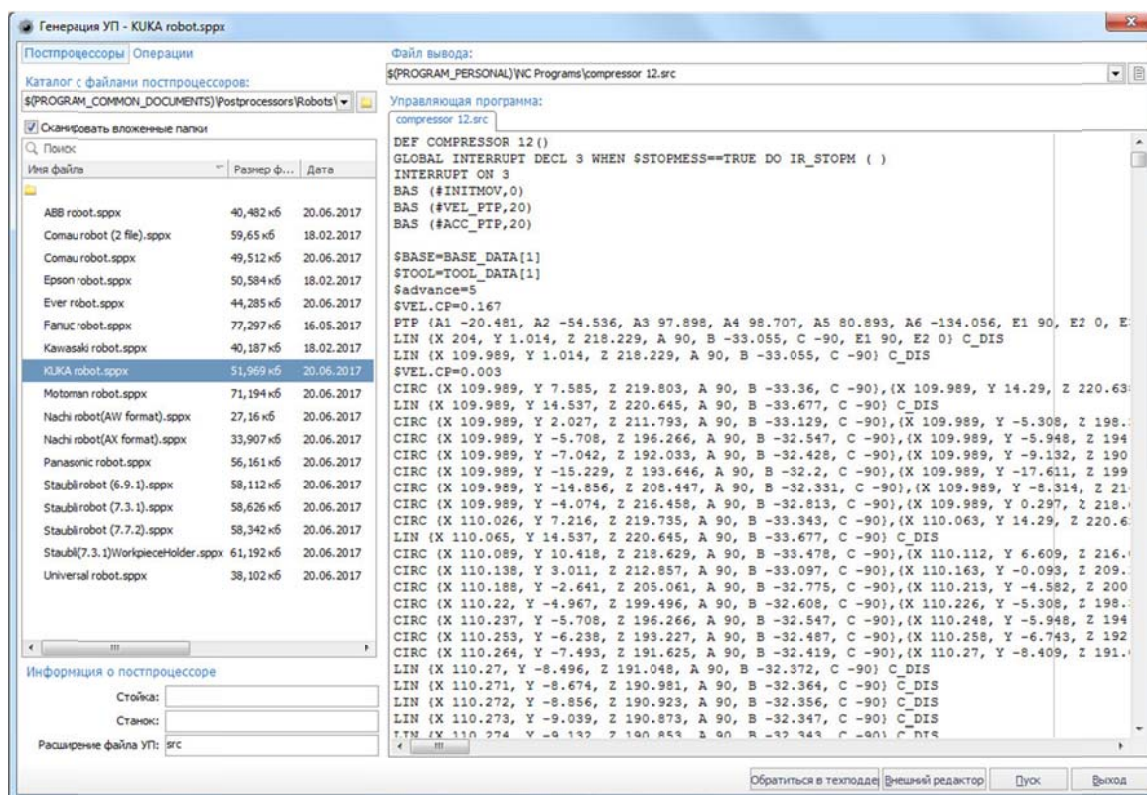


Рисунок 10 – Вид окна «Генератор управляющих программ» в системе SprutCAM

Получена управляющая программа для робототехнологического комплекса на основе робота KUKA KR15 с использованием программного обеспечения SprutCAM. Приведенный пример получения программы может быть использован для других моделей шести осевых промышленных роботов последовательной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourell, D. Roadmap for Additive Manufacturing Identifying the Future of Freeform Processing / D. Bourell, C. Ming, W. Rosen. // Published by The University of Texas at Austin Laboratory for Freeform Fabrication Advanced Manufacturing Center. 2009. – 92 p.
2. Ford, S. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. / S. Ford // Journal of International Commerce and Economics. Published electronically September. 2014.
3. Зленко, А.М. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М: ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. – 220 с.
4. Udriou, R. Optimisation of rapid prototyping process for electrical vehicle manufacturing / R. Udriou, D. A. Serban, G. Belgiu // Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium. 2010. – 28 p.
5. Евгеньев, Г.Б. Обработка робототехнологических комплексов в машиностроении / Г.Б. Евгеньев // Известия высших учебных заведений. – М: Машиностроение. 2017. – №5(686)/ – с.60–77.
6. Donghong, D. Process planning for robotic wire and arc additive manufacturing Text] / D. Donghong, P. Zengxi, C. Dominic, L. Huijun // IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2015.
7. Евгеньев, Г.Б. Методы программирования комбинированной аддитивно-субтрактивной обработки / Г.Б. Евгеньев // Известия высших учебных заведений. – М: Машиностроение. 2017. – №4(685). – С.47–56.
8. СПРУТ–Технология // Интернет ресурс. Режим доступа: www.sprut.ru (дата обращения: 02.10.17)
9. Евгеньев, Г.Б. Интеграция систем проектирования и программирования технологических процессов обработки / Г.Б. Евгеньев, А.В. Частухин // Инженерный вестник. 2015. – № 10. – С. 8.
10. Куликовский, С.В. Концепция создания модуля для формирования кинематических моделей станков в системе SprutCAM / С.В. Куликовский, Г.В. Серегин, А.В. Грошев // Известия высших учебных заведений. – М: Машиностроение. 2012. – №14. – с.44–50.

11. Частухин, А.В. Использование кинематических схем станков в САМ-системах, на примере SprutCAM / А.В. Частухин // Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: Материалы Всероссийской научно-практической конференции – Уфа. 2013. – С. 90–93.

Частухин Александр Валерьевич

ООО «Центр СПРУТ-Т», Москва

Руководитель отдела САПР ЧПУ

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.3, стр. 5

Тел. (495) 181-00-13 доб. 532

E-mail: chastuhin@sprut.ru

A.V. CHASTUKHIN

APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOTS FOR MANUFACTURING AND REPAIRING BY SELECTIVE LASER SINTERING METHOD

Abstract. *The article describes one of an additive manufacturing technology – selective laser sintering. General advantages of industrial robots' usage for methods of selective laser sintering are given. The sequence of setting of CNC program for an industrial robot which is used at additive manufacturing processes is given. This sequence implies the usage of CAM (computer-aided manufacturing) system.*

The example at the article describes a process of getting CNC program for industrial robot KUKA KR-15 through special software. The process of a calculation of a CNC program is described step by step: from an import of a 3D model into the system SprutCAM to a generation of the program through a postprocessor of robot control system.

Keywords: *robototekhnologicheskie systems, industrial robot, selective laser sintering, robot programming.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bourell D. Roadmap for Additive Manufacturing Identifying the Future of Freeform Processing / D. Bourell, C. Ming, W. Rosen. // Published by The University of Texas at Austin Laboratory for Freeform Fabrication Advanced Manufacturing Center. 2009. – 92 p.
2. Ford S. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. / S. Ford // Journal of International Commerce and Economics. Published electronically September. 2014.
3. Zlenko A.M. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii / M.V. Nagajcev, V.M. Dovbysh // posobie dlya inzhenerov. – M. GNC RF FGUP «NAMI» 2015. – 220 s.
4. Udriou, R. Optimisation of rapid prototyping process for electrical vehicle manufacturing / R. Udriou, D. A. Serban, G. Belgiu // Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium. 2010. – 28 p.
5. Evgenev G.B. Obrabatyvayushchie robototekhnologicheskie komplekсы v mashinostroenii / G.B. Evgenev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. – M: Mashinostroenie. 2017. – №5(686)/ – s.60–77.
6. Donghong D. Process planning for robotic wire and arc additive manufacturing Text] / D. Donghong, P. Zengxi, C. Dominic, L. Huijun // IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2015.
7. Evgenev G.B. Metody programmirovaniya kombinirovannoj additivno-subtraktivnoj obrabotki / G.B. Evgenev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. – M: Mashinostroenie. 2017. – №4(685). – S.47–56.
8. SPRUT-Tekhnologiya // Internet resurs. Rezhim dostupa: www.sprut.ru (data obrashcheniya: 02.10.17)
9. Evgenev G.B. Integraciya sistem proektirovaniya i programmirovaniya tekhnologicheskikh processov obrabotki / G.B. Evgenev, A.V. CHastuhin // Inzhenernyj vestnik. 2015. – № 10. – S. 8.
10. Kulikovskij S.V. Koncepciya sozdaniya modulya dlya formirovaniya kinematcheskikh modelej stankov v sisteme SprutCAM / S.V. Kulikovskij, G.V. Seregin, A.V. Groshev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. – M: Mashinostroenie. 2012. – №14. – s.44–50.
11. CHastuhin A.V. Ispol'zovanie kinematcheskikh skhem stankov v CAM-sistemah, na primere SprutCAM / A.V. CHastuhin // Avtomatizaciya i upravlenie tekhnologicheskimi i proizvodstvennymi processami: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii – Ufa. 2013. – S. 90–93.

Chastukhin Aleksandr Valerevich

LLC «Centre SPRUT-T»

Head of CAD/CAM department

111250, Moscow, Krasnokazarmennaya street 3, building 5

Ph.: (495) 181-00-13 ext. 532

E-mail: chastuhin@sprut.ru

УДК 631.37 (075.8)

Е.В. СЛИВИНСКИЙ., С.Ю. РАДИН, И.Н. ГРИДЧИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУХЗВЕННОГО АВТОПОЕЗДА

Аннотация. В статье представлена методика аналитических исследований пространственных колебаний двухзвенного автомобильного поезда состоящего из автомобиля тягача и двухосного прицепа с использованием разработанной двух массовой расчётной схемы имеющей реальные геометрические размеры позволяющие определить абсолютные перемещения центров тяжести рассматриваемых масс, необходимых для составления уравнений кинетической и потенциальной энергий системы с использованием построены Лагранжа второго рода. В результате полученных дифференциальных уравнений и их решений построены амплитудно частотные графики позволяющие установить резонансные зоны колебаний звеньев автопоезда и предложены технические решения на уровне изобретений повышающих устойчивость движения последнего.

Ключевые слова: тягач, прицеп, дышло, поворотный круг, подкатная тележка, рама, дорожные неровности, влияние, боковая качка, подёргивание.

Введение.

Для аналитического исследования колебаний и силового нагружения конструктивных элементов автотракторного самосвального прицепа 2ПТС–4–793А разработана расчётная схема автотракторного поезда (рисунок 1), эквивалентная натурному автопоезду, состоящему из автомобиля тягача ГАЗ–53А и прицепа 2ПТС–4–793А.

Основная часть.

На схеме геометрические размеры автопоезда имеют следующие обозначения: a_T — расстояние от оси управляемых колес автомобиля тягача до его центра тяжести; L_T — база автомобиля тягача; l_T — расстояние от оси управляемых колес автомобиля тягача до точки сцепа его с дышлом прицепа; d_T — расстояние от центра тяжести автомобиля тягача до горизонтальной плоскости сцепа; B_p и B_k — колея передних колес автомобиля тягача и прицепа B_m и B_n — колея задних колес трактора и прицепа; a_1 — расстояние от центра тяжести прицепа до его места сцепа с автомобилем тягачом; l_1 — расстояние от центра поворотного круга до места сцепа поворотной тележки с автомобилем тягачом; L_1 — расстояние от задней оси прицепа до поворотного круга; d_k — расстояние от центра тяжести подкатной тележки до плоскости соединения дышла с подкатной тележкой; d_n — расстояние от центра тяжести прицепа до плоскости сцепа автомобиля тягача и прицепа.

Принятая модель состоит из m_T и m_P , которые соответственно обозначают: массу автомобиля тягача, приведённую к его центру тяжести; массу прицепа с рамой, платформой, с осями колёс и рессорным комплектом. К приведённым массам в процессе движения тракторного поезда приложены следующие внешние нагрузки: P_T — тяговое усилие автомобиля тягача; P_{pn} , P_{pl} , P_{pn} и P_{pl} — горизонтальные продольные силы сопротивления качению рулевых и ведущих колёс, приложенные в точке контакта колёс с дорогой и вызывающие пространственные колебания автомобиля тягача; G_{pn} , G_{pl} , G_{np} и G_l — горизонтальные поперечные силы, вызывающие боковой увод колёс и приложенные в точке контакта колёс автомобиля тягача с дорогой; P_{2n} , P_{2l} , P_{3n} и P_{3l} — горизонтальные продольные силы сопротивления качению рулевых и ведомых колёс прицепа и приложенные в точках контакта его колёс и вызывающие пространственные колебания прицепа; G_{2n} , G_{2l} , G_{3n} и G_{3l} — горизонтальные поперечные силы, вызывающие боковой увод колёс и приложенные в точке контакта колёс прицепа с дорогой.

Положение масс исследуемой системы в пространстве в любой момент времени определяется следующими координатами: X_{i1} — абсолютное перемещение массы m_1 прицепа, характеризующее влияние прицепа; \dot{o}_{i1} — абсолютное перемещение массы m_1 прицепа, характеризующее подёргивание прицепа; z_{i1} — абсолютное перемещение массы m_1 ,

характеризующее подпрыгивание прицепа;

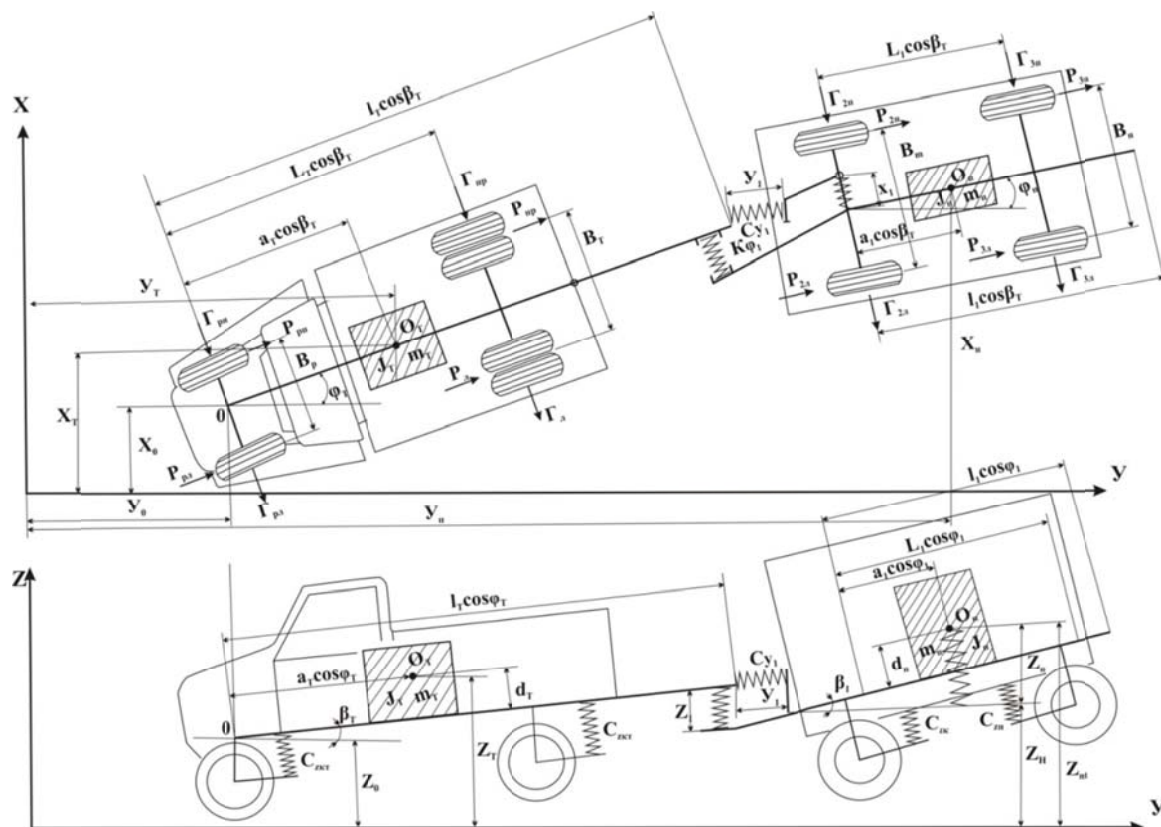


Рисунок 1– Расчётная схема

Относительные упругие деформации подкатной тележки прицепа характеризуются следующими обозначениями: ϕ_1 – угол поворота массы m_{Π} определяющий её смещение в горизонтальной поперечной плоскости движения; x_1 – перемещения массы m_{Π} определяющие её смещение в горизонтальной поперечной плоскости движения; y_1 – перемещения массы m_{Π} определяющие её смещение в горизонтальной продольной плоскости движения; β_1 – углы поворота массы m_{Π} определяющие её смещение в продольной вертикальной плоскости движения; z_1 – перемещения массы m_{Π} определяющие её смещение в продольной вертикальной плоскости движения;

Возбуждение колебаний динамической модели осуществляют следующие кинематические координаты: φ_T – угол поворота автомобиля тягача в плоскости XY , вызывающий влияние прицепа; x_0 – перемещения автомобиля тягача по оси OX , способствующие возникновению влияния и подёргивание прицепа; y_0 – перемещения автомобиля тягача по оси OY , способствующие возникновению подёргивание прицепа; β_T – угол поворота автомобиля тягача в плоскости YZ вызывающий подпрыгивание прицепа; z_j – высота неровности микро и макро и микро профиля дорог вызывающая колебания прицепа по оси OZ ;

При разработке расчётной схемы сделаны следующие допущения [1–4]. Коэффициенты трения в кинематических парах постоянны, характеристики подвески линейны, зазоры в кинематических парах заменены эквивалентными жесткостями, изгибные колебания рамы и основания платформы не учитываются, бокового скольжения шин не происходит, принятая система координат XYZ расположена на уровне условной дороги и движется вдоль нее с постоянной скоростью.

Составим общее уравнение движения автопоезда по формуле Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial \Pi}{\partial q} = Q \quad (1)$$

Анализ модели (рисунок 1) показывает, что по геометрическим размерам ее связей и элементов можно определить абсолютные перемещения центров тяжести рассматриваемых масс, необходимые для составления уравнений кинетической и потенциальной энергий системы. Так, абсолютное перемещение массы дышла по осям OX , OY , OZ определяется методом алгебраического сложения относительных перемещений:

$$\begin{aligned} X_{II} &= X_0 + l_m \cos \beta_m \sin \varphi_m + X_I + a_I \cos \beta_T \sin \varphi_T \approx X_0 + l_m \varphi_m + X_I + a_I \varphi_I, \\ Y_{II} &= Y_0 + l_m \cos \beta_m \cos \varphi_m + Y_I + a_I \cos \beta_I \cos \varphi_I \approx Y_0 + l_m + Y_I + a_I, \\ Z_{II} &= Z_0 + l_m \cos \varphi_m \sin \beta_m - Z_I + a_I \cos \varphi_I \sin \beta_I \approx Z_0 + l_m + \beta_m - Z_I + a_I \beta_I. \end{aligned}$$

В окончательной форме указанные уравнения записаны исходя из того, что для малых углов $\beta_T \cos \beta_T \approx 1$, а $\sin \beta_T \approx \beta_T$ (аналогично для φ_T , φ_I , β_I).

С учетом принятых допущений и на основании работ [1–4] в плоскостях ZOY , ZOX и UOX с учетом сил сопротивления в кинематических парах выведены уравнения энергий:

1. Кинетической —

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \{ J_{T\varphi} \dot{\varphi}_T^2 + J_{T\beta} \dot{\beta}_T^2 + m_T [(\dot{X}_0 + a_T \dot{\varphi}_T)^2 + (\dot{Y}_0 + a_T \dot{\beta}_T)^2 + (\dot{Z}_0 + a_T \dot{\beta}_T)^2] + \\ &+ m_I [(\dot{X}_0 + l_T \dot{\varphi}_T + \dot{X}_1 + a_I \dot{\varphi}_1)^2 + (\dot{Y}_0 + \dot{Y}_1)^2 + (\dot{Z}_0 + a_I \dot{\beta}_1 + l_T \dot{\beta}_T - \dot{Z}_1)^2] + J_{1\varphi} \dot{\varphi}_1^2 + \\ &+ J_{1\beta} \dot{\beta}_1^2 \end{aligned} \quad (2)$$

и запишем частные производные для первого члена уравнения

$$\frac{d}{dq} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) \quad (2.1)$$

по X_I , Y_I , Z_I , φ_I , β_I :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial X_1} &= m_{II} \dot{X}_1^2 + m_{II} \dot{X}_1 a_I \dot{\varphi}_1 + m_{II} \dot{X}_0 X_1 + m_{II} \ell_T \varphi_T \dot{X}_1; \\ \frac{d}{dX_1} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_1} \right) &= m_{II} \ddot{X}_1^2 + m_{II} \ddot{X}_1 a_I \dot{\varphi}_1 + m_{II} \dot{X}_0 \ddot{X}_1 + m_{II} \ell_T \varphi_T \ddot{X}_1 & \frac{\partial T}{\partial Y_1} &= m_{II} \dot{Y}_1 \dot{Y}_0 + m_{II} \dot{Y}_1 \\ \frac{d}{dY_1} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{Y}_1} \right) &= m_{II} \ddot{Y}_1 \dot{Y}_0 + m_{II} \ddot{Y}_1; & \frac{\partial T}{\partial Z_1} &= -m_{II} \ell_T \dot{\beta}_T \dot{Z}_1 + m_{II} \dot{Z}_1 - m_{II} \dot{Z}_1 \dot{Z}_0 - m_{II} \dot{Z}_1 a_I \dot{\beta}_1 \\ \frac{d}{dZ_1} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{Z}_1} \right) &= -m_{II} \ell_T \dot{\beta}_T \ddot{Z}_1 + m_{II} \ddot{Z}_1^2 - m_{II} \ddot{Z}_1 \dot{Z}_0 - m_{II} \ddot{Z}_1 a_I \dot{\beta}_1; \\ \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} &= m_{II} \dot{X}_0 a_I \dot{\varphi}_1 + m_{II} \ell_T \dot{\varphi}_T a_I \dot{\varphi}_1 + m_{II} a_I \dot{\varphi}_1 \dot{X}_1 + m_{II} a_I^2 \dot{\varphi}_1 + J_{1\varphi} \dot{\varphi}_1; \\ \frac{d}{d\varphi_1} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) &= m_{II} \dot{X}_0 a_I \ddot{\varphi}_1 + m_{II} \ell_T \dot{\varphi}_T a_I \ddot{\varphi}_1 + m_{II} a_I \ddot{\varphi}_1 \dot{X}_1 + m_{II} a_I^2 \ddot{\varphi}_1 + J_{1\varphi} \ddot{\varphi}_1; \\ \frac{\partial T}{\partial \beta_1} &= m_{II} a_I \dot{\beta}_1 \dot{Z}_0 + m_{II} a_I^2 \dot{\beta}_1 + m_{II} a_I \ell_T \dot{\beta}_T \dot{\beta}_1 - m_{II} a_I \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 + J_{1\beta} \dot{\beta}_1; \\ \frac{d}{d\beta_1} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}_1} \right) &= m_{II} a_I \ddot{\beta}_1 \dot{Z}_0 + m_{II} a_I^2 \ddot{\beta}_1 + m_{II} a_I \ell_T \dot{\beta}_T \ddot{\beta}_1 - m_{II} a_I \dot{Z}_1 \ddot{\beta}_1 + J_{1\beta} \ddot{\beta}_1. \end{aligned}$$

2. Потенциальной —

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} [K_{\varphi} (\varphi - \varphi_T)^2 + K_{\beta} (\beta_1 - \beta_T)^2 + C_{X1} X_1^2 + C_{Y1} Y_1^2 + C_{Z1} Z_1^2 + \\ &+ C_{ZK} (Z_0 - Z_{KH} + l_T \beta_T - Z_1 + l_1 \beta_1 - d_k)^2 + C_{ZII} (Z_0 - Z_{IIH} + l_T \beta_T - Z_1 - l_1 \beta_1 + \\ &+ d_{II})] \end{aligned} \quad (3)$$

и запишем частные производные для третьего члена уравнения $\frac{\partial \Pi}{\partial q}$ (2.1)

по $X_l, Y_l, Z_l, \phi_l, \beta_l$:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial X_1} = \frac{1}{2} C_{x1} \dot{X}_1, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial Y_1} = \frac{1}{2} C_{y1} \dot{Y}_1$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial Z_1} = \frac{1}{2} C_{z1} \dot{Z}_1 - \frac{1}{2} C_{z\pi} \dot{Z}_1 - \frac{1}{2} C_{zk} \dot{Z}_1 Z_0 + \frac{1}{2} C_{zk} Z_{KH} \dot{Z}_1 - \frac{1}{2} C_{zk} \ell_T \beta_T \dot{Z}_1 + \frac{1}{2} C_{zk} \dot{Z}_1 - C_{zk} \ell_1 \beta_1 \dot{Z}_1 + C_{zk} \dot{Z}_1 d_K$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \phi_1} = \frac{1}{2} K_{\phi 1} \dot{\phi}_1 - K_{\phi 1} \dot{\phi}_1 \phi_T$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \beta_1} = \frac{1}{2} K_{\beta 1} \dot{\beta}_1 - K_{\beta 1} \dot{\beta}_1 \beta_T + \frac{1}{2} C_{zk} Z_0 \ell_1 \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} C_{zk} Z_{KH} \ell_1 \dot{\beta}_1 - \frac{1}{2} C_{zk} \ell_T \beta_T \ell_1 \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} C_{zk} \ell_1^2 \dot{\beta}_1 - C_{zk} \ell_1 \dot{\beta}_1 Z_1 - C_{zk} \ell_1 \dot{\beta}_1 d_K$$

3. Работы внешних сил на виртуальных перемещениях

$$\begin{aligned} \delta A = & -(\Gamma_{\pi\pi} \phi_T + P_{\pi\pi})(\delta Y_0 - 0,5 B_p \delta \phi_T) + (\Gamma_{\pi\pi} - P_{\pi\pi} \phi_T)(\delta X_0 + 0,5 B_p \phi_T \delta \phi_T) - \\ & -(\Gamma_{\pi l} \phi_T + P_{\pi l})(\delta Y_0 + 0,5 B_p \delta \phi_T) + (\Gamma_{\pi l} - P_{\pi l} \kappa_T)(\delta X_0 - 0,5 B_p \phi_T \delta \phi_T)(\Gamma_{\pi\pi} \phi_T + P_{\pi\pi}) \\ & (\delta Y_0 - L_T \phi_T \delta \phi_T + 0,5 B_T \delta \phi_T) + (\Gamma_{\pi l} - P_{\pi l} \phi_T)(\delta X_0 + L_T \delta \phi_T + 0,5 B_T \phi_T \delta \phi_T) + \\ & + P_T [\phi_T (\delta X_0 - l_T \delta \phi_T) + \delta Y_0 - l_T \phi_T \delta \phi_T] - \\ & -(\Gamma_{3\pi} \phi_1 + P_{3\pi})(\delta Y_0 - l_T \phi_T \delta \phi_T + \delta Y_1 - l_1 \phi_1 \delta \phi_1 - L_1 \phi_1 \delta \phi_1 - 0,5 B_{\pi} \delta \phi_1) + \\ & + (\Gamma_{3\pi} - P_{3\pi} \phi_1)(\delta X_0 + l_T \delta \phi_T + \delta X_1 + l_1 \delta \phi_1 + L_1 \delta \phi_1 - 0,5 B_{\pi} \phi_1 \delta \phi_1) - \\ & -(\Gamma_{3l} \phi_1 + P_{3l})(\delta Y_0 - l_T \phi_T \delta \phi_T + \delta Y_1 - l_1 \phi_1 \delta \phi_1 - L_1 \phi_1 \delta \phi_1 + 0,5 B_{\pi} \delta \phi_1) + \\ & + (\Gamma_{3l} - P_{3l} \phi_1)(\delta X_0 + l_T \delta \phi_T + \delta X_1 + l_1 \delta \phi_1 + L_1 \delta \phi_1 + 0,5 B_{\pi} \phi_1 \delta \phi_1) \end{aligned} \quad (4)$$

и запишем частные производные для правой части уравнения (2.1) Q по $X_l, Y_l, Z_l, \phi_T, \beta_T$

$$\frac{\delta A}{\delta X_1}, \frac{\delta A}{\delta Y_1}, \frac{\delta A}{\delta Z_1}, \frac{\delta A}{\delta \phi_T}, \frac{\delta A}{\delta \beta_T}:$$

$$\frac{\delta A}{\delta X_1} = \Gamma_{3\pi} - P_{3\pi} \phi_1 + \Gamma_{3l} - P_{3l} \phi_1 \quad \frac{\delta A}{\delta Y_1} = -\Gamma_{3\pi} \phi_1 - P_{3\pi} - \Gamma_{3l} \phi_1 - P_{3l} \quad \frac{\delta A}{\delta Z_1} = 0$$

$$\frac{\delta A}{\delta \phi_1} = -(\Gamma_{3\pi} \phi_1 + P_{3\pi})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 - \frac{1}{2} B_{\pi}) + (\Gamma_{3\pi} - P_{3\pi} \phi_1)(\ell_1 + L_1 - \frac{1}{2} B_{\pi} \phi_1) - (\Gamma_{3l} \phi_1 + P_{3l})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 + \frac{1}{2} B_{\pi}) + (\Gamma_{3l} - P_{3l} \phi_1)(\ell_1 + L_1 + \frac{1}{2} B_{\pi} \phi_1);$$

$$\frac{\delta A}{\delta \beta_1} = 0.$$

Подставляя уравнения (2), (3) и (4) в уравнение Лагранжа (1) и считая, что второй член этого уравнения $-\frac{\partial T}{\partial q}$, равен нулю, получим систему 5 дифференциальных уравнений второго порядка (5):

$$\begin{aligned}
 & \left\{ m_{\Pi} \ddot{X}_1 + m_{\Pi} \ddot{X}_1 a_1 \dot{\phi}_1 + m_{\Pi} \dot{X}_0 \ddot{X}_1 + m_{\Pi} \ell_T \varphi_T \ddot{X}_1 - m_{\Pi} \dot{X}_1 - m_{\Pi} \dot{X}_1 a_1 \dot{\phi}_1 - m_{\Pi} \dot{X}_0 \dot{X}_1 - m_{\Pi} \ell_T \varphi_T \dot{X}_1 + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} C_{X1} \dot{X}_1 = \Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1 + \Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1; \right. \\
 & m_{\Pi} \ddot{Y}_1 \dot{Y}_0 + m_{\Pi} \ddot{Y}_1 - m_{\Pi} \dot{Y}_1 \dot{Y}_0 - m_{\Pi} \dot{Y}_1 + \frac{1}{2} C_{Y1} \dot{Y}_1 = -\Gamma_{3\Pi} \phi_1 - P_{3\Pi} - \Gamma_{3\Pi} \phi_1 - P_{3\Pi}; \\
 & -m_{\Pi} \ell_T \dot{\beta}_T \ddot{Z}_1 + m_{\Pi} \ddot{Z}_1 - m_{\Pi} \ddot{Z}_1 \dot{Z}_0 - m_{\Pi} \ddot{Z}_1 a_1 \dot{\beta}_1 + m_{\Pi} \ell_T \dot{\beta}_T \ddot{Z}_1 - m_{\Pi} \dot{Z}_1 + m_{\Pi} \dot{Z}_1 \dot{Z}_0 + m_{\Pi} \dot{Z}_1 a_1 \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} C_{Z1} \dot{Z}_1 - \\
 & \left. - \frac{1}{2} C_{Z\Pi} \dot{Z}_1 - \frac{1}{2} C_{ZK} \dot{Z}_1 Z_0 + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} \dot{Z}_1 - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T \dot{Z}_1 + \frac{1}{2} C_{ZK} \dot{Z}_1 - C_{ZK} \ell_1 \beta_1 \dot{Z}_1 + C_{ZK} \dot{Z}_1 d_K = 0; \right. \\
 & m_{\Pi} \ddot{X}_0 a_1 \ddot{\phi}_1 + m_{\Pi} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 \ddot{\phi}_1 + m_{\Pi} a_1 \ddot{\phi}_1 \dot{X}_1 + m_{\pi} a_1^2 \ddot{\phi}_1 + J_{1\phi} \ddot{\phi} - m_{\Pi} \dot{X}_0 a_1 \dot{\phi}_1 - m_{\Pi} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 \dot{\phi}_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{\phi}_1 \dot{X}_1 - m_{\pi} a_1^2 \dot{\phi}_1 - J_{1\phi} \dot{\phi}_1 + \\
 & + \frac{1}{2} K_{\phi 1} \dot{\phi}_1 - K_{\phi 1} \dot{\phi}_1 \varphi_T = -(\Gamma_{3\Pi} \phi_1 + P_{3\Pi})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 - \frac{1}{2} B_{\Pi}) + (\Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1)(\ell_1 + L_1 - \frac{1}{2} B_{\Pi} \phi_1) - (\Gamma_{3\Pi} \phi_1 + P_{3\Pi})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 + \\
 & + \frac{1}{2} B_{\Pi}) + (\Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1)(\ell_1 + L_1 + \frac{1}{2} B_{\Pi} \phi_1); \\
 & m_{\Pi} a_1 \dot{\beta}_1 \dot{Z}_0 + m_{\Pi} a_1^2 \dot{\beta}_1 + m_{\Pi} a_1 \ell_T \dot{\beta}_T \dot{\beta}_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 + J_{1\beta} \dot{\beta}_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{\beta}_1 \dot{Z}_0 - m_{\Pi} a_1^2 \dot{\beta}_1 - m_{\Pi} a_1 \ell_T \dot{\beta}_T \dot{\beta}_1 + m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 - J_{1\beta} \dot{\beta}_1 + \\
 & \left. + \frac{1}{2} K_{\beta 1} \dot{\beta}_1 - K_{\beta 1} \dot{\beta}_1 \beta_T + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_0 \ell_1 \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} \ell_1 \dot{\beta}_1 - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T \ell_1 \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_1^2 \dot{\beta}_1 - C_{ZK} \ell_1 \beta_1 \dot{Z}_1 - C_{ZK} \ell_1 \dot{\beta}_1 d_K = 0. \right.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Сгруппировав члены, производные которых имеют одинаковый порядок, получим следующую систему уравнений (6):

$$\begin{aligned}
 & \left\{ (m_{\Pi} + m_{\Pi} a_1 \dot{\phi}_1 + m_{\Pi} \dot{X}_0 + m_{\Pi} \ell_T \varphi_T) \ddot{X}_1 + (-m_{\Pi} - m_{\Pi} a_1 \dot{\phi}_1 - m_{\Pi} \dot{X}_0 - m_{\Pi} \ell_T \varphi_T + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} C_{X1}) \dot{X}_1 = \Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1 + \Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1; \right. \\
 & (m_{\Pi} \dot{Y}_0 + m_{\Pi}) \ddot{Y}_1 + (-m_{\Pi} \dot{Y}_0 - m_{\Pi} + \frac{1}{2} C_{Y1}) \dot{Y}_1 = -\Gamma_{3\Pi} \phi_1 - P_{3\Pi} - \Gamma_{3\Pi} \phi_1 - P_{3\Pi}; \\
 & (-m_{\Pi} \ell_T \dot{\beta}_T + m_{\Pi} - m_{\Pi} \dot{Z}_0 - m_{\Pi} a_1 \dot{\beta}_1) \ddot{Z}_1 + (m_{\Pi} \ell_T \dot{\beta}_T - m_{\Pi} + m_{\Pi} \dot{Z}_0 + m_{\Pi} a_1 \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} C_{Z1} - \\
 & - \frac{1}{2} C_{Z\Pi} - \frac{1}{2} C_{ZK} Z_0 + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T + \frac{1}{2} C_{ZK} - C_{ZK} \ell_1 \beta_1 + C_{ZK} d_K) \dot{Z}_1 = 0; \\
 & (m_{\Pi} \dot{X}_0 a_1 + m_{\Pi} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 + m_{\Pi} a_1 \dot{X}_1 + m_{\pi} a_1^2 + J_{1\phi}) \ddot{\phi}_1 + (-m_{\Pi} \dot{X}_0 a_1 - m_{\Pi} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{X}_1 - m_{\pi} a_1^2 - J_{1\phi} + \\
 & + \frac{1}{2} K_{\phi 1} - K_{\phi 1} \varphi_T) \dot{\phi}_1 = -(\Gamma_{3\Pi} \phi_1 + P_{3\Pi})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 - \frac{1}{2} B_{\Pi}) + (\Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1)(\ell_1 + L_1 - \frac{1}{2} B_{\Pi} \phi_1) - (\Gamma_{3\Pi} \phi_1 + P_{3\Pi})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 + \\
 & + \frac{1}{2} B_{\Pi}) + (\Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1)(\ell_1 + L_1 + \frac{1}{2} B_{\Pi} \phi_1); \\
 & (m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_0 + m_{\Pi} a_1^2 + m_{\Pi} a_1 \ell_T \dot{\beta}_T - m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 + J_{1\beta}) \ddot{\beta}_1 + (-m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_0 - m_{\Pi} a_1^2 - m_{\Pi} a_1 \ell_T \dot{\beta}_T + m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 - J_{1\beta} + \\
 & + K_{\beta 1} - K_{\beta 1} \beta_T + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_0 \ell_1 + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} \ell_1 - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T \ell_1 + \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_1^2 - C_{ZK} \ell_1 \beta_1 d_K) \dot{\beta}_1 = 0.
 \end{aligned} \quad (6)$$

и преобразуя его, получим систему в виде (7):

$$\begin{aligned}
 & \left\{ (m_{\Pi} + m_{\Pi} \dot{X}_0 + m_{\Pi} \ell_T \varphi_T) \ddot{X}_1 + (-m_{\Pi} - m_{\Pi} \dot{X}_0 - m_{\Pi} \ell_T \varphi_T + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} C_{X1}) \dot{X}_1 + m_{\Pi} a_1 \dot{\phi}_1 \ddot{X}_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{\phi}_1 \dot{X}_1 + \phi_1 P_{3\Pi} + \phi_1 P_{3\Pi} = \Gamma_{3\Pi} + \Gamma_{3\Pi}; \right. \\
 & (m_{\Pi} \dot{Y}_0 + m_{\Pi}) \ddot{Y}_1 + (-m_{\Pi} \dot{Y}_0 - m_{\Pi} + \frac{1}{2} C_{Y1}) \dot{Y}_1 + \Gamma_{3\Pi} \phi_1 + \Gamma_{3\Pi} \phi_1 = -P_{3\Pi} - P_{3\Pi}; \\
 & (-m_{\Pi} \ell_T \dot{\beta}_T + m_{\Pi} - m_{\Pi} \dot{Z}_0) \ddot{Z}_1 + (m_{\Pi} \ell_T \dot{\beta}_T - m_{\Pi} + m_{\Pi} \dot{Z}_0 + \frac{1}{2} C_{Z1} - \frac{1}{2} C_{Z\Pi} - \frac{1}{2} C_{ZK} Z_0 + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} - \\
 & - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T + \frac{1}{2} C_{ZK} + C_{ZK} d_K) \dot{Z}_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 + m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 - C_{ZK} \ell_1 \dot{Z}_1 \beta_1 = 0; \\
 & (m_{\Pi} \dot{X}_0 a_1 + m_{\Pi} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 + m_{\pi} a_1^2 + J_{1\phi}) \ddot{\phi}_1 + (-m_{\Pi} \dot{X}_0 a_1 - m_{\Pi} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 - m_{\pi} a_1^2 - J_{1\phi} + \frac{1}{2} K_{\phi 1} - K_{\phi 1} \varphi_T) \dot{\phi}_1 + \\
 & + m_{\Pi} a_1 \ddot{\phi}_1 \dot{X}_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{\phi}_1 \dot{X}_1 + (\Gamma_{3\Pi} \phi_1 + P_{3\Pi})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 - \frac{1}{2} B_{\Pi}) - (\Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1)(\ell_1 + L_1 - \frac{1}{2} B_{\Pi} \phi_1) + (\Gamma_{3\Pi} \phi_1 + P_{3\Pi})(-\ell_1 \phi_1 - L_1 \phi_1 + \\
 & + \frac{1}{2} B_{\Pi}) - (\Gamma_{3\Pi} - P_{3\Pi} \phi_1)(\ell_1 + L_1 + \frac{1}{2} B_{\Pi} \phi_1) = 0; \\
 & (m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_0 + m_{\Pi} a_1^2 + m_{\Pi} a_1 \ell_T \dot{\beta}_T + J_{1\beta}) \ddot{\beta}_1 + (-m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_0 - m_{\Pi} a_1^2 - m_{\Pi} a_1 \ell_T \dot{\beta}_T - J_{1\beta} + \\
 & + K_{\beta 1} - K_{\beta 1} \beta_T + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_0 \ell_1 + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} \ell_1 - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T \ell_1 + \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_1^2 - C_{ZK} \ell_1 d_K) \dot{\beta}_1 - m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 + m_{\Pi} a_1 \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 - C_{ZK} \ell_1 \dot{Z}_1 \dot{\beta}_1 = 0.
 \end{aligned} \quad (7)$$

В матричной форме данные уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} a_{11}\ddot{X}_1 + a_{12}\dot{X}_1 + a_{13}\dot{\phi}_1\ddot{X}_1 + a_{14}\dot{\phi}_1\dot{X}_1 + a_{15}\phi_1 = b_1; \\ a_{21}\ddot{Y}_1 + a_{22}\dot{Y}_1 + a_{23}\dot{\phi}_1 = b_2; \\ a_{31}\ddot{Z}_1 + a_{32}\dot{Z}_1 + a_{33}\ddot{Z}_1\dot{\beta}_1 + a_{34}\dot{Z}_1\dot{\beta}_1 + a_{35}\dot{Z}_1\beta_1 = 0; \\ a_{41}\ddot{\phi}_1 + a_{42}\dot{\phi}_1 + a_{43}\ddot{\phi}_1\dot{X}_1 + a_{44}\dot{\phi}_1\dot{X}_1 + a_{45}\phi_1 = 0; \\ a_{51}\ddot{\beta}_1 + a_{52}\dot{\beta}_1 + a_{53}\ddot{\beta}_1\dot{Z}_1 + a_{54}\dot{\beta}_1\dot{Z}_1 + a_{55}\dot{\beta}_1Z_1 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Для упрощения предполагаем, что в процессе движения автопоезда его массы совершают установившиеся вынужденные колебания с фиксированной круговой частотой ω . Решение системы дифференциальных уравнений (2.5), описывающих продольные и продольно-угловые колебания масс автопоезда, ищем в форме:

$$\begin{aligned} \varphi_i(t) &= \varphi_{ai} \cos \omega t, & \beta_i(t) &= \beta_{ai} \cos \omega t \\ X_i(t) &= X_{ai} \cos \omega t, & Z_i(t) &= Z_{ai} \cos \omega t \\ Y_i(t) &= Y_{ai} \cos \omega t, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\varphi_{ai}, X_{ai}, Y_{ai}, \beta_{ai}, Z_{ai}$ – амплитуды колебаний масс автопоезда.

После подстановки решений (9) в систему дифференциальных уравнений (7) получим систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} -a_{11}\omega^2 X_{ai} \cos \omega t - a_{12}\omega X_{ai} \sin \omega t + a_{13}\omega^3 \phi_{ai} X_{ai} \sin \omega t \cos \omega t + a_{14}\omega^2 \phi_{ai} X_{ai} \sin^2 \omega t + a_{15}\phi_{ai} \cos \omega t = b_1; \\ -a_{21}\omega^2 Y_{ai} \cos \omega t - a_{22}\omega Y_{ai} \sin \omega t + a_{23}\phi_{ai} \cos \omega t = b_2; \\ -a_{31}\omega^2 Z_{ai} \cos \omega t - a_{32}\omega Z_{ai} \sin \omega t + a_{33}\omega^3 Z_{ai} \beta_{ai} \sin \omega t \cos \omega t + a_{34}\omega^2 Z_{ai} \beta_{ai} \sin^2 \omega t - a_{35}\omega Z_{ai} \beta_{ai} \sin \omega t \cos \omega t = 0; \\ -a_{41}\omega^2 \phi_{ai} \cos \omega t - a_{42}\omega \phi_{ai} \sin \omega t + a_{43}\omega^3 \phi_{ai} X_{ai} \sin \omega t \cos \omega t + a_{44}\omega^2 \phi_{ai} X_{ai} \sin^2 \omega t + a_{45}\phi_{ai} \cos \omega t = 0; \\ -a_{51}\omega^2 \beta_{ai} \cos \omega t - a_{52}\omega \beta_{ai} \sin \omega t + a_{53}\omega^3 \beta_{ai} Z_{ai} \sin \omega t \cos \omega t + a_{54}\omega^2 \beta_{ai} Z_{ai} \sin^2 \omega t + a_{55}\omega \beta_{ai} Z_{ai} \sin \omega t \cos \omega t = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Численные значения инерционных и жесткостных коэффициентов a_{ij} и b_{ij} входящих в систему уравнений (10) вычислены по следующим зависимостям (11).

Из представленной динамической модели и систем дифференциальных уравнений видно, что рассматриваемая система с 5 степенями свободы может совершать пять независимых гармонических колебаний, каждому из которых соответствует определенное значение собственной частоты. Известно, что максимумы амплитудно-частотных характеристик находятся вблизи собственных частот [1–4]. Поэтому наличие спектра собственных частот дает возможность предсказать места максимумов значений амплитуд, и, наоборот, по максимумам можно определить собственные частоты системы. В реальных условиях при колебаниях автопоезда в такой системе практически содержится столько частот, сколько максимумов значений обобщенных координат проявляется во всех их диапазонах. Отсюда следует метод их определения.

$$\begin{cases} a_{11} = m_{II} + m_{II} \dot{X}_0 + m_{II} \ell_T \varphi_T; a_{12} = -m_{II} - m_{II} \dot{X}_0 - m_{II} \ell_T \varphi_T + \frac{1}{2} C_{XI}; a_{13} = m_{II} \ell_T \dot{\phi}_1; a_{14} = -m_{II} \ell_T \dot{\phi}_1; a_{15} = P_{3II} + P_{3II} \\ b_1 = \Gamma_{3II} + \Gamma_{3II} \\ a_{21} = m_{II} \dot{Y}_0 + m_{II} \dot{Y}_1; a_{22} = -m_{II} \dot{Y}_0 - m_{II} + \frac{1}{2} C_{YI}; a_{23} = \Gamma_{3II} + \Gamma_{3II}; b_2 = -P_{3II} - P_{3II} \\ a_{31} = -m_{II} \ell_T \dot{\beta}_T + m_{II} - m_{II} \dot{Z}_0; a_{32} = m_{II} \ell_T \dot{\beta}_T - m_{II} + m_{II} \dot{Z}_0 + \frac{1}{2} C_{ZI} - \frac{1}{2} C_{ZII} - \frac{1}{2} C_{ZK} Z_0 + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} - \\ - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T + \frac{1}{2} C_{ZK} + C_{ZK} d_K; a_{33} = -m_{II} \ell_T; a_{34} = a_{II} \ell_T; a_{35} = -C_{ZK} \ell_T; b_3 = 0; \\ a_{41} = m_{II} \dot{X}_0 \ell_T + m_{II} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 + m_{II} \ell_T^2 + J_{I\phi}; a_{42} = -m_{II} \dot{X}_0 \ell_T - m_{II} \ell_T \dot{\phi}_T a_1 - m_{II} \ell_T^2 - J_{I\phi} + \frac{1}{2} K_{\phi} - K_{\phi} \varphi_T; \\ a_{43} = m_{II} \ell_T; a_{44} = -m_{II} \ell_T; a_{45} = (\Gamma_{3II} \ell_T + P_{3II}) (\ell_T \phi_1 - L_1 \phi_1 - \frac{1}{2} B_{II}) - (\Gamma_{3II} - P_{3II} \ell_T) (\ell_T \phi_1 + L_1 \phi_1 - \frac{1}{2} B_{II}) + (\Gamma_{3II} \ell_T + P_{3II}) (\ell_T \phi_1 - L_1 \phi_1 + \\ + \frac{1}{2} B_{II}) - (\Gamma_{3II} - P_{3II} \ell_T) (\ell_T \phi_1 + L_1 \phi_1 - \frac{1}{2} B_{II}); \\ a_{51} = m_{II} \ell_T \dot{Z}_0 + m_{II} \ell_T^2 + m_{II} \ell_T \dot{\beta}_T + J_{I\beta}; a_{52} = -m_{II} \ell_T \dot{Z}_0 - m_{II} \ell_T^2 - m_{II} \ell_T \dot{\beta}_T - J_{I\beta} + \\ + K_{\beta} - K_{\beta} \beta_T + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_0 \ell_T + \frac{1}{2} C_{ZK} Z_{KH} \ell_T - \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T \beta_T \ell_T + \frac{1}{2} C_{ZK} \ell_T^2 - C_{ZK} \ell_T d_K; a_{53} = -m_{II} \ell_T; a_{54} = m_{II} \ell_T; a_{55} = -C_{ZK} \ell_T; b_5 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Пусть на систему действует гармоническая сила частоты ω_1 и эта частота совпадает с одной из частот собственных колебаний. Тогда амплитуды колебаний неограниченно возрастают и происходит явление резонанса. Когда частота ω_1 близка к одной из собственных частот, то соответствующая амплитуда намного превышает все остальные.

Решается система уравнений (2.5) с использованием метода Гаусса [1], с выбором главного элемента.

Для того чтобы ошибка вычислений была минимальной, при выполнении преобразований матрицы, деление производится по максимальному модулю элемента матрицы. При этом учитывалась возможность изменения коэффициентов жёсткости эквивалентных серийному образцу прицепа и модернизированному снабжённому устройством для гашения колебаний представляющее собой торсион расположенный на подкатной тележке, а также задания в широком диапазоне значений кинематических координат приближающих расчётную схему к условиям близким к эксплуатационным.

Зная геометрические и жесткостные параметры модели (рисунок 1) и задаваясь частотой вынужденных колебаний системы в пределах от 0 до 50 рад/с, а также амплитудами кинематических координат [2–4], на ЭВМ с использованием программного комплекса Maple 9.5 вычислены значения динамических составляющих усилий и моментов, действующих на приведенные массы модели. При выполнении расчетов приняты следующие исходные данные [2]: $m_T = 325 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}$, $m_n = 300 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}$, $I_{m\phi} = 330 \text{ кгс} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $I_{m\beta} = 382 \text{ кгс} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $I_{n\phi} = 160 \text{ кгс} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $I_{n\beta} = 324 \text{ кгс} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $C_{y1} = 3,0 \cdot 10^3 \text{ Н/см}$ (пружина в тяговом крюке автомобиля), $C_{z1} = 1,68 \cdot 10^5 \text{ Н/см}$, $K_{\phi1} = 1,75 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{см/рад}$ (без торсиона), $K_{\phi1} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{см/рад}$ (с торсионом), $C_{zk} = 2,12 \cdot 10^3 \text{ Н/см}$, $K_{20} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{см/рад}$, $P_m = 1,125 \cdot 10^4 \text{ Н}$, $P_{2n} = P_{2l} = P_{3n} = P_{3l} = 5,85 \cdot 10^2 \text{ Н}$, $\Gamma_{2n} = \Gamma_{2l} = \Gamma_{3n} = \Gamma_{3l} = 8,87 \cdot 10^3 \text{ Н}$, $\phi_m = 0,0017 \div 0,0087 \text{ рад}$, $X_0 = 5 \div 20 \text{ мм}$, $Y_0 = 2 \div 10 \text{ мм}$, $\beta_m = 0,0017 \div 0,0105 \text{ рад}$, $Z_0 = 2 \div 6 \text{ мм}$, $\gamma_m = 0,0008 \div 0,0087 \text{ рад}$, $Z_{kn} = Z_{nn} = B_k = B_m = 1900 \text{ мм}$, $B_n = 1730 \text{ мм}$, $a_1 = 720 \text{ мм}$, $l_1 = 1300 \text{ мм}$, $a_2 = 635 \text{ мм}$, $l_2 = 664 \text{ мм}$, $a_3 = 1630 \text{ мм}$, $L_1 = 2200 \text{ мм}$, $d_k = 86 \text{ мм}$ и $d_n = 218 \text{ мм}$, $d_T = 25 \text{ мм}$ (диаметр торсиона), $l_T = 375 \text{ мм}$ (длина торсиона).

Для расчёта наиболее важных параметров, характеризующих устойчивость движения прицепа связанных как с безопасностью, так и надёжностью его конструктивных элементов, а это такие как подёргивание y_1 , влияние ϕ_1 и боковой снос x_1 использована программа Maple 9.5. Для этого исследуемые уравнения записаны в форме показанной в окнах (рисунок 2 и рисунок 3), и тогда в итоге создана новая система, которая решается известным методом подстановок (рисунок 4 и рисунок 5).

The screenshot shows the Maple 9.5 command window. At the top, a function is defined: $F := f(x1, y1, \phi1)$. Below this, a vector of equations is assigned to a variable: $y1 := [1/2, m_y, 2 \left(\left(\frac{\partial}{\partial x1} f(x1, y1, \phi1) \right) + a_1 \left(\frac{\partial}{\partial \phi1} f(x1, y1, \phi1) \right) \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x1^2} f(x1, y1, \phi1) \right) + a_1 \left(\frac{\partial^2}{\partial \phi1 \partial x1} f(x1, y1, \phi1) \right) + 2 \left(\frac{\partial}{\partial y1} f(x1, y1, \phi1) \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x1 \partial y1} f(x1, y1, \phi1) \right) \right) \right]$.

Рисунок 2 – Окно записи уравнений

The screenshot shows the Maple 9.5 command window. At the top, a function is defined: $F := f(x1, y1, \phi1)$. Below this, a vector of equations is assigned to a variable: $y1 := [1/2, m_y, 2 \left(\left(\frac{\partial}{\partial x1} f(x1, y1, \phi1) \right) + a_1 \left(\frac{\partial}{\partial \phi1} f(x1, y1, \phi1) \right) \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x1^2} f(x1, y1, \phi1) \right) + a_1 \left(\frac{\partial^2}{\partial \phi1 \partial x1} f(x1, y1, \phi1) \right) + 2 \left(\frac{\partial}{\partial y1} f(x1, y1, \phi1) \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x1 \partial y1} f(x1, y1, \phi1) \right) \right) \right]$.

Рисунок 3 – Окно записи уравнений

Рисунок 4 – Новая система уравнений

Рисунок 5 – Новая система уравнений

Задаваясь частотой вынужденных колебаний системы в пределах от 0 до 50 rad/c , а также амплитудами кинематических координат, с использованием программы Maple 9.5, построены амплитудные частотные графики, иллюстрирующие вынужденные колебания расчетных масс и резонансные области исследуемой математической модели. Так на графиках рисунок 6, рисунок 7 и рисунок 8 показаны наиболее характерные перемещения прицепа в месте его сцепа соответственно без демпфера и с демпфером, характеризующие поперечно–угловые колебания в горизонтальной плоскости (φ_l), поперечные колебания в горизонтальной плоскости (X_l), продольные колебания (Y_l).

Так на рисунке 6 представлен амплитудно–частотный график характеризующий продольные перемещения по координате Y_l как серийного, так и модернизированного прицепа, снабжённого устройством, повышающим устойчивость движения последнего (патент RU2338658), где в диапазоне частот от 18,8 rad/c до 22,3 rad/c наблюдается значительный рост амплитуд, причём резонанс наблюдается дважды с широкой областью проявления поэтому возможно возникновение значительных по величине динамических составляющих нагрузок в сцепном устройстве поезда. При использовании устройства для гашения колебаний влияния проявление резонансной зоны несколько выше чем у серийного, однако, в диапазоне частот от 15,0 rad/c до 30,0 rad/c амплитуды колебаний прицепа в среднем в 1,5–2,2 раза ниже. Такое снижение амплитуд позволяет сделать вывод, что связь продольных колебаний прицепа с колебаниями влияния и бокового сноса, хотя и слабая, но существует. Следовательно, можно сделать вывод о некоторой эффективности использования устройств исключающих влияние прицепов, устанавливаемых на последних, как в место сцепа, так и в зоне поворотного круга их подкатных тележек.

На рисунке 7 представлен амплитудно–частотный график, характеризующий угловые перемещения по координате φ_l как серийного, так и модернизированного прицепа снабжённого устройством повышающим устойчивость движения последнего (патент RU2338658) где в диапазоне частот от 15,0 rad/c до 25,0 rad/c наблюдается широкая резонансная область в диапазоне эксплуатационных частот колебаний составляющих порядка 20,0 rad/c (3,2 $гц$) при этом, величина угла φ , характеризующая отклонение прицепа относительно продольной оси симметрии автопоезда составляет порядка 0,085 рад, что соответствует поперечному

прицепа на 185 мм. При использовании же устройства для гашения колебаний виляния выполненного по патенту RU2338658 такие амплитуды порядка ниже и составляют порядка 111 мм.

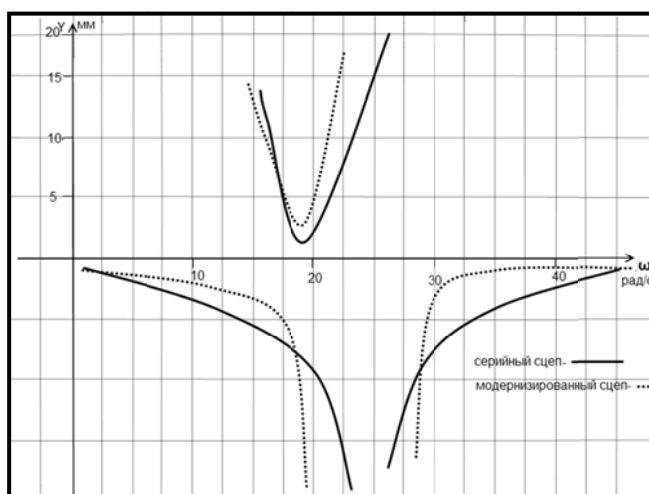


Рисунок 6 – Амплитудно частотный график

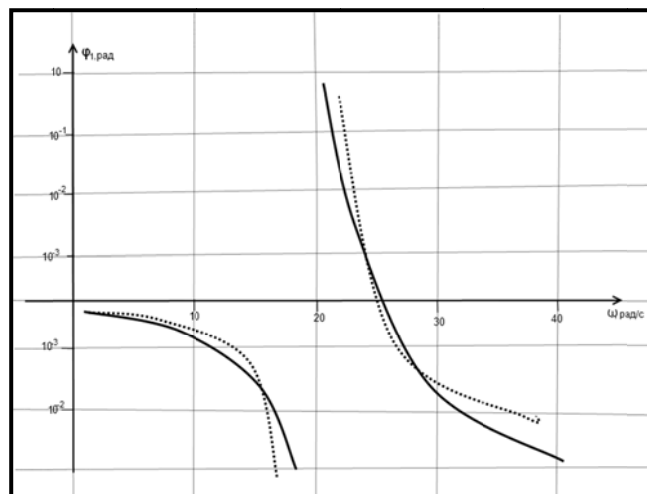


Рисунок 7 – Амплитудно частотный график

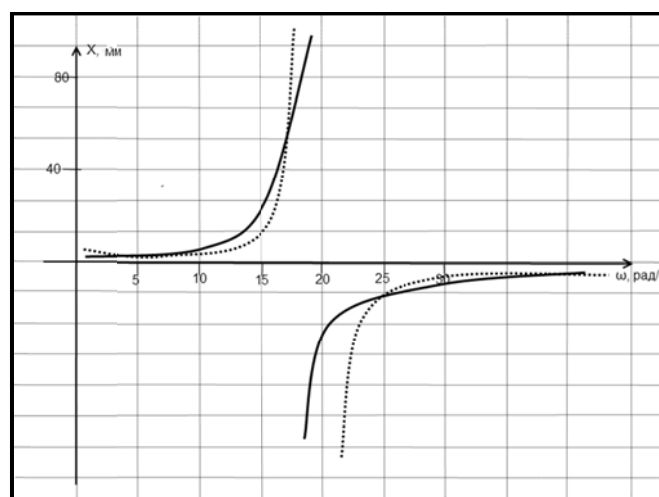


Рисунок 8 – Амплитудно частотный график

На рисунке 8 представлен амплитудно–частотный график, характеризующий поперечные перемещения по координате X_i как серийного, так и модернизированного прицепа снабжённого устройством повышающим устойчивость движения последнего (патент RU2338658) где в диапазоне частот от 16,0 рад/с до 22,0 рад/с так же как и в предыдущих случаях наблюдается резонансная область в диапазоне эксплуатационных частот колебаний составляющих порядка 18,0 рад/с (2,8 гц) при этом, величина амплитуды, характеризующая боковой снос прицепа относительно продольной оси симметрии автопоезда составляет порядка 60,0 мм. При использовании же устройства для гашения колебаний виляния выполненного по патенту RU2338658 такие амплитуды не на много ниже и составляют порядка 43,0– 52,0 мм.

Полученные амплитудно–частотные графики на разработанной физической и математической моделях автопоезда показал, что наиболее существенные составляющие динамических нагрузок возникают преимущественно при подёргивании и вилянии прицепа. Такие нагрузки расшатывают крепления, смонтированных на раме и подкатной тележке конструкционных элементов и узлов, и выводят из строя несущих конструкций, форсируют износ сопряжённых деталей сцепного устройства, и в целом ухудшают показатель устойчивости движения прицепа.

В то же время анализ полученных результатов аналитического исследования показывает, что установка предложенного технического решения выполненного по патенту RU2338658 на

автотракторные самосвалы прицепа семейства 2ПТС–4 позволяет отметить положительную тенденцию в части улучшения устойчивости движения прицепа в целом, что позволит в итоге добиться показателей предусмотренных ГОСТ 2349–54 и ГОСТ 13377–67 используемых в данной области техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушенко, А.Д. Динамика и прочность транспортной системы для перевозки легковесных грузов / А.Д. Глушенко, Е.В. Сливинский. – Ташкент: Фан, 1988. – 116с.
2. Закин, Я. Х. Прикладная теория движения автопоезда / Я.Х. Закин Москва: Транспорт, 1987. – 286 с.
3. Сливинский, Е. В. Исследование колебаний и силового нагружения тракторного самосвального прицепа 2ПТС–4–793А [автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук. (05.20.01) / Сливинский Евгений Васильевич; Казах. сельскохозяйств. инст. – Алма-Ата, 1977, – 23 с.
4. Глушенко, А. Д., Исследование колебаний и силового нагружения тракторного самосвального прицепа 2ПТС–4–793А / А.Д Глушенко, Ю.В. Гроховский, Е.В. Сливинский. Журнал Тракторы и сельхозмашины. 1980. – № 4. – С. 8–11.

Сливинский Евгений Васильевич
ФГБОУ ВО «Елецкий
государственный университет им.
И.А. Бунина», г. Елец
Доктор. техн. наук, профессор, проф.
кафедры «Технологических
процессов в машиностроении и
агроинженерии»,
E-mail: evgeni_sl@mail.ru

Радин Сергей Юрьевич
ФГБОУ ВО «Елецкий
государственный университет
им. И.А. Бунина», г. Елец
Канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Технологических процессов в
машиностроении и
агроинженерии»

Гридина Ирина Николаевна
ФГБОУ ВО «Елецкий
государственный университет им.
И.А. Бунина», г. Елец
Канд. пед. наук, доц.

E.V. SLIVINSKIY, S.Y. RADIN, I.N. GRIDCHINA

RESEARCH OF SPATIAL FLUCTUATIONS TWO-UNIT ROAD TRAIN

Abstract. *In the article the technique of analytical researches of spatial fluctuations of the two-link automobile train consisting of the car of the tractor and the two-axis trailer with use of the developed two mass settlement scheme having the real geometrical sizes allowing to define absolute displacements of the centers of gravity of the considered masses necessary for drawing up the equations of kinetic and potential energies of system with use of the second kind Lagrange is constructed is considered. As a result of the received differential equations and their solutions amplitude-frequency graphs allowing to establish resonant zones of fluctuations of links of a road train are constructed and technical solutions at the level of inventions increasing stability of the movement of the last are offered.*

Keywords: tractor, trailer, drawbar, turntable, movable cart, frame, road irregularities, yaw, lateral motion, twitching.

BIBLIOGRAPHY

1. Glushchenko, A.D. Dinamika i prochnost transportnoj sistemy dlya perevozki legkovesnyh грузов / A.D. Glushchenko, E.V. Slivinskij. – Tashkent: Fan, 1988.– 116s.
2. Zakin, YA. X. Prikladnaya teoriya dvizheniya avtopoezda / YA.H. Zakin Moskva: Transport, 1987. – 286 s.
3. Slivinskij, E. V. Issledovanie kolebanij i silovogo nagruzheniya traktornogo samosvalnogo pricepa 2PTS–4–793A avtoref. dis. na soisk. uchyon. step. kand. tekhn. nauk. (05.20.01) / Slivinskij Evgenij Vasilevich; Kazah. selskohoz. inst. – Alma–Ata, 1977, – 23 s.
4. Glushchenko, A. D., Issledovanie kolebanij i silovogo nagruzheniya traktornogo samosvalnogo pricepa 2PTS–4–793A / A.D Glushchenko, YU.V. Grohovskij, E.V. Slivinskij. ZHurnal Traktory i selhozmashiny. 1980. – № 4. – S. 8–11.

Slivinskij Evgenij Vasilevich
FGBOU VO «Eleckij
gosudarstvennyj universitet im. I.A.
Bunina», g. Elec
Doktor. tekhn. nauk, professor, prof.
kafedry «Tekhnologicheskikh
processov v mashinostroenii i
agroinzhenerii»,
E-mail: evgeni_sl@mail.ru

Radin Sergej YUrevich
FGBOU VO «Eleckij
gosudarstvennyj universitet im. I.A.
Bunina», g. Elec
Kand. tekhn. nauk, docent,
zaveduyushchij kafedroj
«Tekhnologicheskikh processov v
mashinostroenii i agroinzhenerii»
E-mail: radin81@mail.ru

Gridchina Irina Nikolaevna
FGBOU VO «Eleckij
gosudarstvennyj universitet im. I.A.
Bunina», g. Elec
Kand. ped. nauk, docent.

КАЛИБРОВКА ИНСТРУМЕНТА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Аннотация. Рассмотрены математические модели систем управления промышленных роботов, позволяющие выполнить калибровку центра инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота. Калибровка инструмента выполняется при оснащении промышленного робота новым инструментом. Первый этап калибровки состоит в определении центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в *TCP*. Данная статья посвящена исследованию первого этапа калибровки инструмента. Рассмотрены методы распространённые в практике эксплуатации промышленных роботов. Представленные в статье результаты могут быть использованы при разработке программно-математического обеспечения систем управления промышленными роботами.

Ключевые слова: промышленные роботы, калибровка инструмента, математические модели, системы управления.

Введение

Комплекс мероприятий по оснащению робота новым инструментом предусматривает выполнение процедуры калибровки этого инструмента перед его использованием в работе. Это необходимо для того чтобы система управления промышленного робота могла правильно выполнять перемещение инструмента в рабочем пространстве робота. Для этого математические модели, описывающие преобразования координат в данной модели робота, должны быть дополнены математической моделью сформированной для установленного инструмента. Математические модели, описывающие преобразования координат для инструмента создаются системой управления автоматически при выполнении процедуры калибровки инструмента перед вводом нового инструмента в эксплуатацию. Созданные математические модели сохраняются в постоянной памяти контроллера системы управления в библиотеке инструмента с указанием логического имени, присвоенного данному инструменту. В последующем при программировании движения промышленного робота системе управления указывается устанавливаемый на роботе инструмент путём присвоения специальному параметру логического имени выбранного инструмента.

Процедура калибровки инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в *TCP*. Данная статья посвящена исследованию первого этапа калибровки инструмента, а именно разработке математических моделей систем управления промышленных роботов, предназначенных для калибровки центра инструмента (*TCP*).

Промышленные роботы представляют собой многозвенные механические системы с последовательной структурой, звенья которых образуют друг с другом кинематические пары пятого класса и моделируются твёрдыми телами. Такие многозвенные механические системы называют манипуляционными системами. Пример манипуляционной системы промышленного робота *KUKA KR6*, имеющего шесть степеней подвижности, представлен на рисунке 1. На рисунке изображены контуры звеньев и шарниры с указанием осей относительного вращения соединяемых ими звеньев.

К последнему звену манипуляционной системы промышленного робота может быть жестко присоединён инструмент. Для этого в конструкции последнего звена предусматривается присоединительный фланец. На рисунке 1 присоединительный фланец изображен в форме диска, внутри которого помещен шарнир, ось вращения которого перпендикулярна плоскости диска. В качестве инструмента может быть использовано захватное устройство, сварочная или измерительная головки, а также, например, мотор-шпиндель.

Системы координат

Для описания относительного движения звеньев манипуляционных систем используют математические модели, обеспечивающие преобразование координат между системами координат, связываемыми с каждым звеном и системой координат, связываемой с неподвижным основанием. Существуют разные методы задания связанных со звеньями

систем координат и построения математических моделей, реализующих преобразования координат между ними, например, метод Денавита – Хартенберга [1], или метод двух связываемых с каждым звеном систем координат [2].

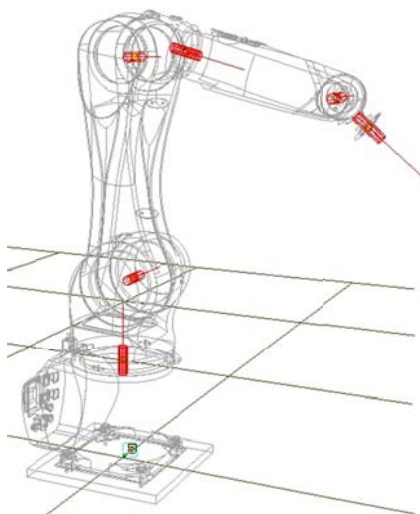


Рисунок 1 – Манипуляционная система промышленного робота KUKA KR6

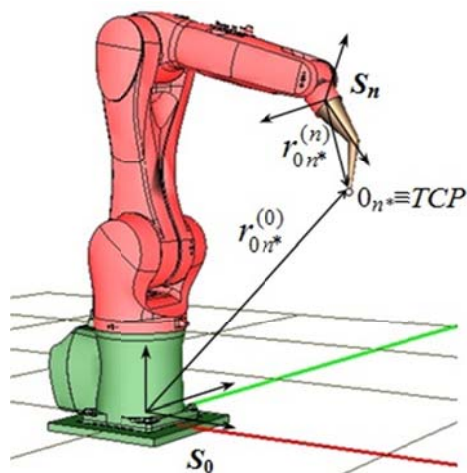


Рисунок 2 – Системы координат $S_0 \equiv \text{WORLD}$, $S_n \equiv \text{FLANGE}$ и точка $0_n^* \equiv \text{TCP}$

Не вникая в отличительные особенности предложенных методов достаточно отметить, что оба эти метода сводятся к составлению матриц, выполняющих преобразования однородных координат вида

$$A_{0,k} = A_{0,1}A_{1,2} \dots A_{(i-1),i} \dots A_{(r-1),k} = \prod_{i=1}^k A_{(i-1),i}, k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где $A_{(i-1),i}$ – матрица размера 4×4 , выполняющая преобразование однородных координат из системы S_i , связанной с i -м звеном в систему $S_{(i-1)}$, связанную с $(i-1)$ -м,

$A_{0,k}$ – матрица размера 4×4 , выполняющая преобразование однородных координат из системы S_k , связанной с k -м звеном в систему S_0 , связанную с неподвижным основанием,

n – количество звеньев в манипуляционной системе робота.

Для произвольной точки M , выбранной на k -м звене, матрицы преобразования однородных координат (1) позволяют получить простую форму математической модели, реализующей эти преобразования [2]

$$r_M^{(0)} = A_{0,k} r_M^{(k)}, \quad (2)$$

где $r_M^{(0)} = [x_M^{(0)} \ y_M^{(0)} \ z_M^{(0)} \ 1]^T$ – расширенный радиус-вектор точки M в неподвижной системе S_0 ,

$r_M^{(k)} = [x_M^{(k)} \ y_M^{(k)} \ z_M^{(k)} \ 1]^T$ – расширенный радиус-вектор точки M в связанной системе S_k (рисунок 2).

В системах управления промышленных роботов неподвижную систему координат S_0 именуют *WORLD* и называют мировой системой координат. Начало системы координат S_n , связанную с конечным звеном, помещают в центр установочного фланца, а ось Z_n этой системы координат направляют перпендикулярно плоскости фланца вдоль оси его вращения. Систему координат S_n именуют *FLANGE*. Точку центра инструмента обозначают 0_n^* и именуют *TCP*. Система координат $S_n^* \equiv \text{TOOL}$ с началом в точке $0_n^* \equiv \text{TCP}$, связывается с инструментом, присоединяемым к фланцу.

Методы калибровки TCP

На практике используется несколько методов калибровки центра инструмента (*TCP*).

Прямой ввод

По данному методу калибровки в систему управления вводят значения $(x_{0_n^*}^{(n)} \ y_{0_n^*}^{(n)} \ z_{0_n^*}^{(n)})$, являющиеся координатами точки $0_n^* \equiv \text{TCP}$ в системе координат S_n . Задача может быть решена двумя способами (рисунок 2).

Первый способ основывается на данных, полученных из конструкторской документации, в частности из 3D-модели калибруемого инструмента.

Второй способ является метрологическим и основывается на прямых измерениях. Поскольку при установке инструмента точка центра установочного фланца, являющаяся началом системы координат $FLANGE$, оказывается закрытой и недоступной для прямого измерения, то измеряются координаты $(x_{0n*}^{(0)} \ y_{0n*}^{(0)} \ z_{0n*}^{(0)})$, являющиеся координатами точки $0_n \equiv TCP$ в неподвижной системе координат $S_0 \equiv WORLD$. Искомые координаты могут быть получены вычислением на основе математической модели полученной преобразованием выражения (2)

$$r_{0n*}^{(n)} = A_{0,n}^{-1} r_{0n*}^{(0)}. \quad (3)$$

Калибровка базовым инструментом

Данный метод позволяет выполнить калибровку нового инструмента на основе использования другого уже откалиброванного базового инструмента.

Последовательность действий:

1. На установочном фланце закрепляется ранее откалиброванный базовый инструмент.
2. Системе управления промышленного робота указывается логическое имя базового инструмента. Выполняется ввод данных о TCP базового инструмента.
3. TCP базового инструмента подводится к заостренному наконечнику, закреплённому в рабочем пространстве робота и в памяти контроллера системы управления сохраняются данные соответствующие значениям шарнирных координат.
4. Базовый инструмент отводится от наконечника и снимается. Устанавливается новый инструмент.
5. TCP нового инструмента подводится к тому же наконечнику и в памяти контроллера системы управления сохраняются данные соответствующие новым значениям шарнирных координат.

6. Выполняется расчёт данных для TCP нового инструмента. Данные сохраняются с указанием логического имени нового инструмента.

Математическая модель, обеспечивающая расчет данных для TCP нового инструмента по методу калибровки базовым инструментом может быть получена на основе рассмотрения уравнений, полученных на основе (2), для случая подвода к заостренному наконечнику TCP базового и нового инструментов (рисунок 2).

Для базового инструмента в точке контакта его TCP с закреплённым наконечником может быть составлено уравнение

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n*}^{(n)}. \quad (4)$$

Для нового инструмента в точке контакта его TCP с закреплённым наконечником может быть составлено уравнение

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0,n} {}^{(2)}r_{0n*}^{(n)}. \quad (5)$$

Левые части уравнений (4) и (5) равны, так как представляю радиус-вектор одной и той же точки (острия наконечника) в неподвижной системе координат $S_0 \equiv WORLD$, следовательно, равны и правые части этих уравнений

$${}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0,n} {}^{(2)}r_{0n*}^{(n)}. \quad (6)$$

Окончательно математическая модель для калибровки центра инструмента промышленных роботов по методу калибровки базовым инструментом будет иметь вид

$${}^{(2)}r_{0n*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0,n}^{-1} {}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n*}^{(n)}, \quad (7)$$

где ${}^{(2)}r_{0n*}^{(n)} = [x_{0n*}^{(n)} \ y_{0n*}^{(n)} \ z_{0n*}^{(n)} \ 1]^T$ – расширенный радиус-вектор, содержащий координаты TCP нового инструмента в системе координат $S_n \equiv FLANGE$.

Метод двух подходов

По методу двух подходов TCP калибруемого инструмента дважды подводится к закреплённому наконечнику с разных сторон.

Последовательность действий:

1. На установочном фланце закрепляется калибруемый инструмент.
2. TCP калибруемого инструмента подводится к заостренному наконечнику, закреплённому в рабочем пространстве робота и в памяти контроллера системы управления сохраняются значения шарнирных координат соответствующих данному положению манипуляционной системы робота.

3. Инструмент отводится и снова поводится к наконечнику с другого направления. Сохраняются значения шарнирных координат, соответствующих новому положению манипуляционной системы робота.

4. Выполняется расчёт данных для *TCP* калибруемого инструмента. Данные сохраняются с указанием логического имени инструмента.

Математическая модель, обеспечивающая расчет данных для *TCP* калибруемого инструмента по методу двух подходов может быть получена на основе рассмотрения уравнений, полученных на основе (2), для двух случаев подвода *TCP* калибруемого инструмента к закреплённому наконечнику.

Для первого подхода

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0,n} r_{0n*}^{(n)}. \quad (8)$$

Для второго подхода

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0,n} r_{0n*}^{(n)}. \quad (9)$$

Разность уравнений (8) и (9) имеет вид

$$\left({}^{(2)}A_{0,n} - {}^{(1)}A_{0,n} \right) r_{0n*}^{(n)} = 0. \quad (10)$$

Элементы матриц составляющих левую часть уравнения (10) могут быть вычислены по зафиксированным значениям шарнирных координат в первом и втором подходах манипуляционной системы робота. Разность этих матриц представляет собой матрицу известной структуры

$$A = {}^{(2)}A_{0,n} - {}^{(1)}A_{0,n}, \quad (11)$$

позволяющей представить уравнение (10) в виде

$$A r_{0n*}^{(n)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{0n*}^{(n)} \\ y_{0n*}^{(n)} \\ z_{0n*}^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (12)$$

Матрично–векторное уравнение (12) может быть приведено к уравнению

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{0n*}^{(n)} \\ y_{0n*}^{(n)} \\ z_{0n*}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

разрешимому относительно искомых координат $(x_{0n*}^{(n)}, y_{0n*}^{(n)}, z_{0n*}^{(n)})$.

Уравнения (11) и (13) представляют собой математическую модель для калибровки центра инструмента промышленных роботов по методу двух подходов. Координаты *TCP* калибруемого инструмента в системе координат $S_n \equiv FLANGE$ могут быть определены численно, например, одним из методов решения систем линейных уравнений.

Метод двух подходов может быть повторён несколько раз, а полученные результаты усреднены. Это позволит снизить влияние ошибки, связанной с неточностью позиционирования *TCP* калибруемого инструмента на закреплённом наконечнике.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены математические модели для калибровки центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*) промышленных роботов, соответствующие методам наиболее распространённым в практике эксплуатации промышленных роботов. Полученные математические модели могут быть использованы в системах управления промышленных роботов. Близкие по данной теме вопросы рассмотрены в работах [3–5]. Теоретические основы представлены в монографиях и учебниках [1–3, 7–10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахинпур, М. Курс робототехники / М. Шахинпур. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
2. Крахмалев, О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов–манипуляторов: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ, 2012. – 200 с.
3. Крахмалев, О.Н. Точность управляемого движения промышленных роботов и многокоординатных станков: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ, 2015. – 236 с.

4. Крахмалев, О.Н. Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т.16. – №7. – С. 491–496.
5. Крахмалев, О.Н. Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами / О.Н. Крахмалев, Л.И. Блейшмидт // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – №1. – С.29–36.
6. Крахмалев, Г.Н. Обзор методов калибровки инструмента промышленных роботов / Г.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Автоматизированные технологии и производства. – 2017. – №1 (15). – С.71–74.
7. Юревич, Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. – 359 с.
8. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение / Ю.В. Подураев. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
9. Корендяев, А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. (Кн.1.) / А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. – 383 с.
10. Зенкевич, С.Л. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

Крахмалев Геннадий Николаевич

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

аспирант

8 (903) 819–59–47

genakr73@mail.ru

G.N. KRAKHMALLEV

CALIBRATING THE TOOL OF INDUSTRIAL ROBOTS

Abstract. *Mathematical models of control systems of industrial robots are considered, allowing to perform the calibration of the tool center, fixed on the mounting flange of the robot. The tool is calibrated when the industrial robot is equipped with a new tool. The first step of the calibration is to determine the center of the tool (TCP – Tool Center Point). The second stage includes actions to determine the orientation of the rectangular coordinate system associated with the instrument, whose origin is placed in TCP. This article is devoted to the study of the first stage of calibration of the tool. The methods widely used in the practice of industrial robots are considered. The results presented in the article can be used in the development of software and software for control systems for industrial robots.*

Keywords: *industrial robots; tool calibration; mathematical models; control systems.*

BIBLIOGRAPHY

1. Shakhinpur, M. Kurs robototekhniki / M. Shakhinpur. – М.: Mir, 1990. – 527 s.
2. Krakhmalev, O.N. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki manipulyatsionnykh sistem promyshlennykh robotov i kranov–manipulyatorov: monografiya / O.N. Krakhmalev. – Bryansk: BGTU, 2012. – 200 s.
3. Krakhmalev, O.N. Tochnost upravlyayemogo dvizheniya promyshlennykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov: monografiya / O.N. Krakhmalev. – Bryansk: BGTU, 2015. – 236 s.
4. Krakhmalev, O.N. Korrektsiya integralnykh otkloneniy dvizheniya ispolnitelnykh mekhanizmov promyshlennykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov / O.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. – 2015. – Т.16. – №7. – С. 491–496.
5. Krakhmalev, O.N. Opredeleniye dinamicheskoy tochnosti manipulyatsionnykh sistem robotov s uprugimi sharnirami / O.N. Krakhmalev, L.I. Bleyshmidt // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. – 2014. – №1. – С.29–36.
6. Krakhmalev, G.N. Obzor metodov kalibrovki instrumenta promyshlennykh robotov / G.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin // Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva. – 2017. – №1 (15). – С.71–74.
7. Yurevich, Ye.I. Osnovy robototekhniki / Ye.I. Yurevich. – Sankt–Pereburg: BKHV–Peterburg, 2010. – 359 s.
8. Podurayev, YU.V. Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye / YU.V. Podurayev. – М.: Mashinostroyeniye, 2007. – 256 s.
9. Korendyasev, A.I. Teoreticheskiye osnovy robototekhniki. V 2 kn. (Kn.1.) / A.I. Korendyasev, B.L. Salamandra, L.I. Tyves. – М.: Nauka, 2006. – 383 s.
10. Zenkevich, S.L. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami: uchebnyk dlya vuzov / S.L. Zenkevich, A.S. Yushchenko. – М.: Izd–vo MGTU im. N.E. Baumana, 2004.

Krakhmalev Gennadiy Nikolayevich

Bryansk State Technical University

graduate student

+7 (903) 819–59–47

genakr73@mail.ru

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Аннотация. Статья посвящена вопросам разработки теории, расчета и конструирования мощных ленточных конвейеров. Центральной проблемой статьи является определение основных параметров конвейерных установок для транспортирования грузов вверх и вниз при различных углах наклона их к горизонту. Даны рекомендации по снижению величины знакопеременных напряжений на роlikоопорах стационарных ленточных конвейеров, обобщен анализ динамических исследований, поставлена и успешно решена актуальная задача определения максимального статического и динамического усилия, возникающего в ленте конвейера в период пуска и нахождения условий, позволяющих свести эти усилия до минимума, получена формула для определения и анализа максимального динамического усилия в точке набегания ленты на приводной барабан при различных углах наклона конвейера к горизонту. Установлено, что максимальное динамическое усилие ленты конвейера с предельной длиной в пусковой период находится в функциональной зависимости от угла наклона их к горизонту.

Ключевые слова: ленточный конвейер, расчет, параметры, производительность.

Введение

Наиболее перспективным направлением в развитии промышленного транспорта является его полная конвейеризация, обеспечивающая поточность и автоматизацию транспортных операций.

Важное место в числе транспортных средств занимают ленточные конвейеры, которые в силу простоты устройства и обслуживания, обеспечения высокой производительности и дальности перемещения материалов имеют большие достоинства перед другими видами непрерывного транспорта.

Обзор области применения ленточных конвейеров большой мощности показывает, что в настоящее время еще недостаточно проведена конвейеризация различных отраслей промышленности РФ, связанных с большими грузопотоками. Между тем технико-экономический анализ ленточных конвейеров по сравнению с другими видами транспорта показал большую эффективность их применения.

Основная часть

В вопросах разработки теории, расчета и конструирования ленточных конвейеров большая заслуга принадлежит нашим соотечественникам [1–3, 5, 8]. Благодаря мощному заделу: усилиям больших коллективов институтов, кафедр, успешным исследованиям отдельных ученых, теория ленточного конвейера оформилась в самостоятельную науку.

Однако следует отметить, что ученые вплотную занимались в основном исследованиями ленточных конвейеров общего назначения. Проблемы теории, расчета и проектирования высокопроизводительных конвейеров большой длины предметом исследования стали относительно недавно.

Одним из вопросов, представляющих большой практический интерес является определение основных параметров конвейерных установок для транспортирования грузов вверх и вниз при различных углах наклона их к горизонту:

- а) предельной длины конвейера на один привод;
- б) расстояния между роlikоопорами рабочей ветви ленты конвейера (в условиях высокопроизводительных коротких и длинных конвейерных установок);
- в) стоимости ленты и конвейерных установок.

При транспортировании материалов вверх по произвольно искривленной трассе (с прямолинейными участками, имеющими различные углы наклона), получено:

$$L_{\text{пр1}} = \frac{S_{\text{max}}}{(\sum W_p + k_1 \cdot \sum W_x) k_a}, \text{ м}; \quad (1)$$

$$L_{\text{пр1}} = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{\sum W_p}, \text{ м}. \quad (2)$$

Из уравнений (1, 2) видно, что предельная длина конвейера $L_{\text{пр}}$ при определенной производительности и угле наклона установки β , находится в функциональной зависимости от тягового фактора привода $e^{\mu\alpha}$ и может изменяться теоретически в широких пределах

$$k_1 < e^{\mu\alpha} \leq +\infty.$$

Принимая определенную схему привода, можно определить оптимальную длину конвейера в зависимости от $e^{\mu\alpha}$ по формуле (1), соблюдая только условие «проскальзывания». Исключение фактора провеса ленты при этом очевидно потребует специального расчета расстояний между рабочими роlikоопорами.

Известно, что в настоящее время расстояния между роlikоопорами принимаются по ширине ленты, в действительности их величина должна определяться в зависимости от натяжения ленты [4].

В связи с этим данному вопросу посвящены специальные исследования, в результате чего получена зависимость (3) для нахождения величины l_p , длиной менее 100–200 м:

$$l_p = S_{max} \cdot \frac{k_m}{W_{np} k_{np}}, \text{ м.} \quad (3)$$

При огибании лентой барабанов и опорных роlikов, возникают изгибные напряжения, снижающие прочность ленты (происходит расслаивание прокладок и в конечном результате – разрыв ленты).

Поэтому для снижения величины знакопеременных напряжений на роlikоопорах стационарных ленточных конвейеров и уменьшения частоты их возникновения, необходимо увеличить натяжение ленты и принять переменные расстояния между роlikоопорами по длине конвейера.

В связи с этим были проведены исследования, в результате чего получена зависимость (4) для определения этого параметра, и решены вопросы расстановки роlikоопор рабочей ветви конвейера:

$$l_{x_1} = \frac{S_{max}}{W_{np}} \left[1 - \frac{W'_p}{W'_{oy} \cdot k_{\alpha}} \left(1 - \frac{x_1}{l_{np}} \right) \right], \text{ м.} \quad (4)$$

На практике приходится сталкиваться и с другой задачей: при заданной длине трассы определить основные параметры установки.

В данном случае можно принять, что $L_{np} = L_{тр}$, тогда по формуле (1) можно определить натяжение ленты и произвести прочностной расчет с последующим расчетом расстояний l_p по приводимой методике.

Вопрос о возможности повышения производительности ленточных конвейеров, увеличения предельной длины и скорости транспортирования материалов связан с изучением сложных динамических явлений, возникающих в пусковом периоде [6, 7].

Анализ выполненных динамических исследований показывает, что:

– в одних случаях, работы, посвященные методам определения динамических усилий конвейерных лент в пусковой период, или не учитывают упругие свойства тяговых органов ленточных конвейеров, или не учитывают рассеивание энергии и затухание колебаний;

– в других исследование динамики пуска ленточных конвейеров проводится с учетом рассеивания энергии и затухания колебаний при произвольно выбранном законе изменения скорости движения ленты при пуске конвейера, но не учитывается влияние массы ленты и возмущающей силы на характер колебательного процесса;

– в основу динамического анализа конвейерных лент в третьей группе работ принята возмущающая сила. Исследования проводятся с учетом приведенной массы тягового органа и привода конвейера, но в условиях эксплуатации мощных ленточных конвейеров с автоматическими натяжными устройствами, изменяющими натяжение ленты в период пуска, очевидно, нужно включать и массу натяжного устройства;

– приводимые методы не позволяют анализировать изменение динамических усилий ленты одновременно при различных углах наклона конвейерных установок.

Таким образом, в основу динамического анализа мощных ленточных конвейеров при различных углах наклона их к горизонту можно принять возмущающую силу и исследование проводить с учетом упругости тягового органа и приведенных масс всех вращающихся и поступательно движущихся частей конвейера (привода, полотна и натяжного устройства) [9, 10].

Одним из важнейших вопросов при расчете и конструировании машин является определение полных расчетных нагрузок, воспринимаемых их элементами.

Если статические нагрузки ленточных конвейеров можно определить довольно легко, то расчет динамических усилий вызывает определенные трудности.

В связи с этим актуальной является задача определения максимального $S_{\text{сумм}}$ (статического и динамического) усилия, возникающего в ленте конвейера в период пуска и нахождения условий, позволяющих свести эти усилия до минимума.

Одним из основных органов конвейерных установок является лента. Все сечения ленты на обеих ветвях в один и тот же момент времени имеют различные скорости и ускорения. Поэтому кинематические параметры реальных конвейерных лент являются функцией не только времени, но и положения сечения.

Благодаря действию возмущающих сил привода и упругим свойствам тягового органа конвейера, колебательный процесс ленты сопровождается возникновением в ней динамических усилий.

Для анализа этих усилий в конвейере необходимо предварительно составить расчетную механическую схему. Реальный механизм конвейера с натяжным устройством у привода заменим эквивалентной приведенной схемой, обладающей таким же энергетическим запасом.

Тогда задача сведется к расчету приведенной системы, состоящей из бесконечного числа распределенных и двух сосредоточенных масс.

Распределенные массы системы соответствуют поступательно движущимся частям конвейера (рабочей и нерабочей ветви ленты), а сосредоточенные – массам привода и натяжного груза соответственно с приводным и натяжным барабаном (сосредоточенные массы опорных роликов включаются в распределенные массы ленты).

Местом приведения сосредоточенных масс выбраны точки набегания ($x = l$) и сбегания ($x = 0$) ленты с приводного барабана.

Известно, что исследование процесса разгона мощных ленточных конвейеров проводилось при следующих допущениях:

1. Отсутствует пробуксовка ленты по приводному барабану и отсутствует трение в механизмах натяжного устройства.
2. Длина ленты принимается постоянной.
3. Система консервативная, что позволяет не учитывать затухание колебаний от внутренних и внешних сил.
4. На систему воздействует постоянная возмущающая сила F_0 , равная по величине первоначальному максимальному значению избыточной силы.

Экспериментальные исследования упругих свойств многопрокладочных лент конвейеров показывают, что между деформацией ленты и ее натяжением можно принять линейную зависимость.

Так как к линейным системам применим принцип наложения, то динамический анализ конвейеров в работе проводится в условиях и собственных, и вынужденных колебаний ленты.

Метод решения поставленной задачи состоит в определении величины деформации стержня $\frac{du}{dx}$ при известной его жесткости E_0 .

В этом случае динамическая нагрузка стержня, зависящая от времени и координаты, представляется формулой

$$S_d = E_0 \frac{du}{dx}. \quad (5)$$

В такой постановке упругая система описана волновым уравнением

$$\frac{d^2 u}{dt^2} - a^2 \frac{d^2 u}{dx^2} = 0. \quad (6)$$

Таким же уравнением описываются продольные колебания стержня.

Процесс разгона системы условно разделим на два этапа: от начала движения массы m_1 до начала движения массы m_2 и от начала движения всей системы до окончания процесса разгона.

На первом этапе осуществляется процесс деформации упругого звена, и при достижении этой деформацией определенного значения начинается второй этап, когда вся система приходит в движение.

Решение уравнения $u \sim u(x, t)$ для первого этапа выполнено методом Даламбера

$$u(x, t) = \varphi_1(at - x) + \varphi_2(at + x) \quad (7)$$

при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях.

Для второго этапа решение уравнения (7) представлено в виде:

$$u(x_1 t) = u_2(x_1 t) + u_1(x_1 t), \quad (8)$$

где $u_1(x_1 t)$ и $u_2(x_1 t)$ – перемещения сечений стержня при его собственных и вынужденных колебаниях.

Перемещения $u_1(x_1 t)$ и $u_2(x_1 t)$ определены методом Фурье и обобщенных координат при определенных начальных и граничных условиях.

В результате этого получена формула для определения и анализа максимального динамического усилия в точке набегания ленты на приводной барабан при различных углах наклона конвейера к горизонту:

$$S_d = \frac{2v_a \lambda}{t_p} \eta \left[m_1 + m_2 + \frac{2S_{max}}{w_{oy} \cdot k_\alpha} \rho \right], \text{ м.} \quad (9)$$

Из уравнения (9) видно, что максимальное динамическое усилие ленты конвейера с предельной длиной в пусковой период находится в функциональной зависимости от угла наклона их к горизонту.

Так как величина $\frac{2v_a}{t_p}$ является начальным максимальным ускорением при изменении скорости разгона электродвигателя по квадратичной параболе, что соответствует работе асинхронного двигателя с контактными кольцами при трех пусковых ступенях, то, обозначив его через S_q окончательно получим:

$$S_d = \lambda \cdot j \cdot \eta \sum m_c. \quad (10)$$

Заключение

Полученные формулы анализированы на примерах расчета максимальных динамических усилий в ленте. В результате установлено, что в пусковых режимах динамические усилия в ленте соизмеримы со статическими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зюзев, А.М. Пусковые режимы электропривода ленточного конвейера с учетом ограничений по нагреву двигателя / А.М. Зюзев, Г.Г. Кожушко, В.П. Метельков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – № 6. – 2012. – С. 71–75.
2. Галкин, В.И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин [и др.]. М.: Изд-во МГТУ, 2005. – 543 с.
3. Джиенкулов, С.А. К исследованию пусковых режимов мощных ленточных конвейеров / С.А. Джиенкулов, Р.А. Кабашев // Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов по механизации и автоматизации производства. – Алма-Ата, 1972. – 250 с.
4. Реутов, А.А. Определение положения ленты на роликоопорах криволинейного участка конвейера / А.А. Реутов, Р.Б. Иваницкий, С.Л. Эманов // Вестник Брянского государственного технического университета. – № 2. – 2012. – С. 4–7.
5. Зюзев, А. М., Метельков В. П. Исследование пусковых режимов электроприводов конвейеров // Электротехника. 2009. № 9. С. 41–45.
6. Реутов, А.А. Расчет привода ленточного конвейера с уравнительным натяжным устройством / А.А. Реутов // Горные науки и технологии. – № 1. – 2012. – С. 44–51.
7. Реутов, А.А. Моделирование стационарных режимов работы приводов ленточных конвейеров / А.А. Реутов // Тяжелое машиностроение. – № 2. – 2007. – С.34–36.
8. Галкин, В.И. Особенности эксплуатации мощных ленточных конвейеров с криволинейной в плане трассой для горной промышленности / В.И. Галкин, Е.С. Сазанкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № 6. – 2011. – С. 187–190.
9. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроительных вузов / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.
10. Ромакин, Н.Е. Конструкция и расчет конвейеров: справочник / Н.Е. Ромакин. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 504 с.

Божанов Аркадий Александрович
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
К.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин
302030, г. Орел, ул. Московская, 77
Тел. 8 906 663 9777
E-mail: abozhanov@yandex.ru

Трубин Алексей Сергеевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
Аспирант кафедры подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин
302030, г. Орел, ул. Московская, 77
Тел. 89155082664
E-mail: Alextrubin@yandex.ru

Баранов Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
Д.т.н., профессор, доцент кафедры сервиса и ремонта машин
302030, г. Орел, ул. Московская, 77
Тел. 8–905–856–65–56
E-mail: bar20062@mail.ru

A.A. BOZHANOV, A.S. TRUBIN, Yu.N. BARANOV

TO DETERMINING SOME PARAMETERS BELT CONVEYORS

Abstract. *The article is devoted to the development of theory, calculation and design of powerful belt conveyors. The central problem of the article is the determination of the main parameters of the conveyor systems for the transportation of goods up and down at different angles of inclination to the horizon. Recommendations are given to reduce the magnitude of alternating stresses on rollers of stationary belt conveyors, generalize the analysis of dynamic research, set and successfully solved the actual problem of determining the maximum static and dynamic forces occurring in the belt of the conveyor during the start-up period and finding conditions for reducing these efforts to a minimum, a formula is obtained for determining and analyzing the maximum dynamic force at the point where the tape hits the drive drum at various angles of inclination to conveyor to the horizon. It is established that the maximum dynamical force of the conveyor belt with the limiting length in the starting period is in functional dependence on the angle of their inclination to the horizon.*

Keywords: *belt conveyor, calculation, parameters, productivity.*

BIBLIOGRAPHY

1. Zyuzev, A.M. Puskovyye rezhimy elektropivoda lentochnogo konveyera s uchetom ogranicheniy po nagrevu dvigatelya / A.M. Zyuzev, G.G. Kozhushko, V.P. Metelkov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal. – № 6. – 2012. – S. 71–75.
2. Galkin, V.I. Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornyykh predpriyatiy / V. I. Galkin [i dr.]. M.: Izd-vo MGGU, 2005. – 543 s.
3. Dzhiyenkulov, S.A. K issledovaniyu puskovykh rezhimov moshchnykh lentochnykh konveyerov / S.A. Dzhiyenkulov, R.A. Kabashev // Tezisy dokladov respublikanskoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov po mekhanizatsii i avtomatizatsii proizvodstva. – Alma–Ata, 1972. – 250 s.
4. Reutov, A.A. Opredeleniye polozheniya lenty na rolkooporakh krivolineynogo uchastka konveyera / A.A. Reutov, R.B. Ivanitskiy, S.L. Emanov // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – № 2. – 2012. – S. 4–7.
5. Zyuzev, A. M., Metelkov V. P. Issledovaniye puskovykh rezhimov elektropivodov konveyerov // Elektrotekhnika. 2009. № 9. S. 41–45.
6. Reutov, A.A. Raschet pivoda lentochnogo konveyera s uravnitelnym natyazhnym ustroystvom / A.A. Reutov // Gornyye nauki i tekhnologii. – № 1. – 2012. – S. 44–51.
7. Reutov, A.A. Modelirovaniye statsionarnyykh rezhimov raboty pivodov lentochnykh konveyerov / A.A. Reutov // Tyazheloye mashinostroyeniye. – № 2. – 2007. – S.34–36.
8. Galkin, V.I. Osobennosti ekspluatatsii moshchnykh lentochnykh konveyerov s krivolineynoy v plane trassoy dlya gornoy promyshlennosti / V.I. Galkin, Ye.S. Sazankova // Gornyy informatsionno–analiticheskiy byulleten (nauchno–tekhnicheskii zhurnal). – № 6. – 2011. – S. 187–190.
9. Spivakovskiy, A.O. Transportiruyushchiye mashiny: ucheb. posobiye dlya mashinostroitelnykh vuzov / A.O. Spivakovskiy, V.K. Dyachkov. – M.: Mashinostroyeniye, 1983. – 487 s.
10. Romakin, N.Ye. Konstruktsiya i raschet konveyerov: spravochnik / N.Ye. Romakin. – Staryy Oskol: TNT, 2012. – 504 s.

Bozhanov Arkadi Aleksanrovich
Orel state University named after I. S. Turgenev
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor of the
Department of
Lifting, Transport, Construction and
Road Machinery
302030, Orel, Moskovskaya st., 77
Tel. 8 906 663 9777
E-mail: abozhanov@yandex.ru

Trubin Aleksey Sergeevich
Orel state University named after I. S. Turgenev
Postgraduate of the Department of
Lifting, Transport, Construction and
Road Machinery
302030, Orel, Moskovskaya st., 77
Tel. 89155082664
E-mail: Alextrubin@yandex.ru

Baranov Yuri Nikolaevich
Orel state University named after I. S. Turgenev
Doctor of Engineering Sciences, Full
Professor, Associate Professor of
Machine Maintenance and Repair
Department
302030, Orel, Moskovskaya st., 77
Tel. 8–905–856–65–56
E-mail: bar20062@mail.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ГЛАВНОГО ВЕКТОРА РЕАКЦИИ ЛЕПЕСТКОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА С АКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Аннотация: В статье приведена конструкция комбинированного подшипникового узла с активным управлением, включающей в себя лепестковый газодинамический подшипник (ЛГДП) и подшипник качения, установленные по последовательной пространственной схеме, и электромагнит, управляющий рабочим зазором ЛГДП. Также в работе рассматриваются основные математические соотношения для расчета полей давлений и главного вектора реакции ЛГДП.

Ключевые слова: подшипник качения, лепестковый газодинамический подшипник, комбинированная опора, поле давлений.

Введение.

Тенденция повышения энергоэффективности машин является причиной повышения скоростей вращения элементов машин и повышению вибронагрузок, что приводит к безальтернативному использованию подшипников скольжения, в частности лепестковых газодинамических подшипников (ЛГДП). Однако, при частых пусках–остановах машин лепестки ЛГДП подвержены повышенному износу. Одним из направлений решения данной проблемы является комбинация подшипника качения и ЛГДП, что позволяет разделить их функции работы и добиться оптимального сочетания полезных свойств каждого из вида опор. Включение в конструкцию комбинированной опоры управляющего элемента, который в виду малой массы и податливости лепестков, позволяет изменять профиль рабочего зазора в соответствии с режимом работы узла и управлять жесткостными характеристиками опоры. Изменение жесткостных характеристик в процессе работы узла также позволяет преодолевать критические частоты, что, безусловно, повышает надежность и работоспособность подшипникового узла.

Основная часть.

Авторами предлагается конструкция комбинированной опоры, изображенной на рисунке 1. Комбинированная опора состоит из корпуса 1, в котором установлены подшипник качения 2, в подшипнике качения 2 закреплена втулка 3 с металлическими пластинами 4, которые служат элементами центрирования вала 5. По окружности в корпусе 1 закреплены электромагнитные катушки 6. Для стопорения внутреннего кольца на основном режиме работы комбинированной опоры установлены пьезоэлементы 7 [1].

Устройство работает следующим образом: в начальный момент времени передача нагрузки с вала 5 на корпус 1 осуществляется через металлические пластины 4 и тела качения подшипника качения 2. По мере возрастания скорости вращения вала 5 на электромагнитные катушки 6 и пьезоэлементы 7 подается напряжение. Возникает электромагнитное поле, которое отгибает пластины 4 от поверхности вала 5, при этом между пластинами 4 и валом 5 образуется воздушный зазор, в котором возникает газодинамическая сила, которая центрирует вал и воспринимает внешнюю нагрузку. Внутреннее кольцо подшипника качения 2 стопорится пьезоэлементами 7 с торцевых сторон, таким образом, подшипник качения 2 выключается из работы. При остановке происходят обратные процессы. При этом повышается устойчивость вращения ротора за счет повышенного демпфирования со стороны упругих металлических пластин [2]. Более подробный принцип работы комбинированной опоры описан в предыдущих статьях авторов [2–4].

Определение силовых факторов в ЛГДП, таких как R_x и R_y , основывается на определении полей давлений $p(x, z)$, которое основывается на базовых уравнениях гидродинамической теории смазки [5, 6]: уравнения Рейнольдса, записанного для случая двумерного течения вязкого сжимаемого смазочного материала и суммарной деформации

упругого лепестка определяемой посредством решения уравнений теории упругости для защемлённой цилиндрической оболочки [7].

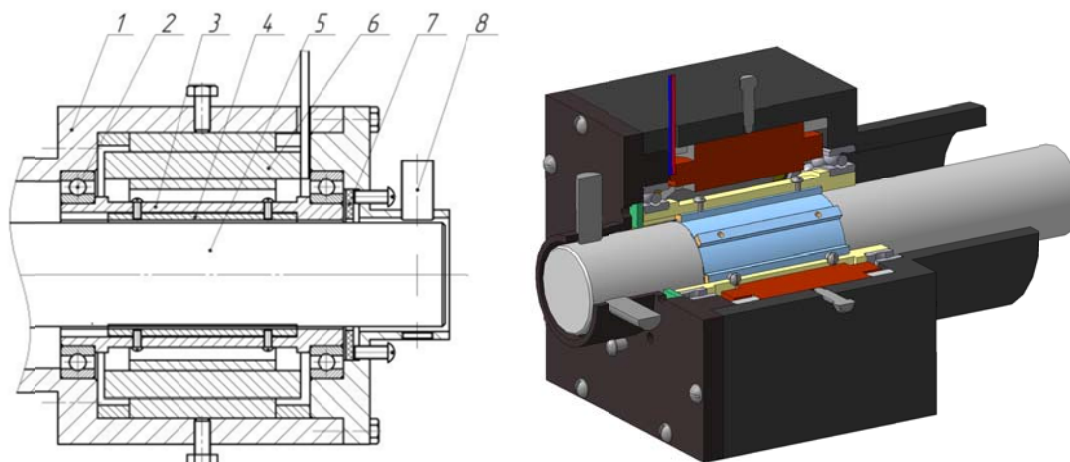


Рисунок 1 – Комбинированная опора с активным управлением

Основное уравнение для определения поля давлений – уравнение Рейнольдса, обобщенное на случай двумерного течения вязкого сжимаемого смазочного материала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot U \cdot h) - 12 \rho V + 12 h \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

В уравнении (1) переменные U и V являются скоростями в окружном и радиальном направлениях в точках на поверхности цапфы. При рассмотрении движения ротора они могут быть определены по следующим зависимостям:

$$U = \frac{\omega \cdot d}{2} - \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha; \quad V = \dot{X} \cos \alpha + \dot{Y} \sin \alpha, \quad (2)$$

где d – диаметр цапфы ротора.

Функцию радиального зазора представим в виде суммы двух составляющих:

$$h(n_x) = h_c + h_e, \quad (3)$$

где h_c – функция изменения зазора при концентричном положении цапфы и втулки в зависимости от первоначальных геометрических параметров лепестка, которая задается как линейная функция [8, 9], и деформации лепестка (4). На рисунке 3а приведен пример моделирования зазора, учитывающий геометрические характеристики, для подшипника с $z=6$ лепестков, реализованного в программном обеспечении GNU Octave;

h_e – составляющая, учитывающая положение ротора в подшипнике (5). Пример моделирования составляющей смещения, реализованного в программном обеспечении GNU Octave, представлен на рисунке 3, б.

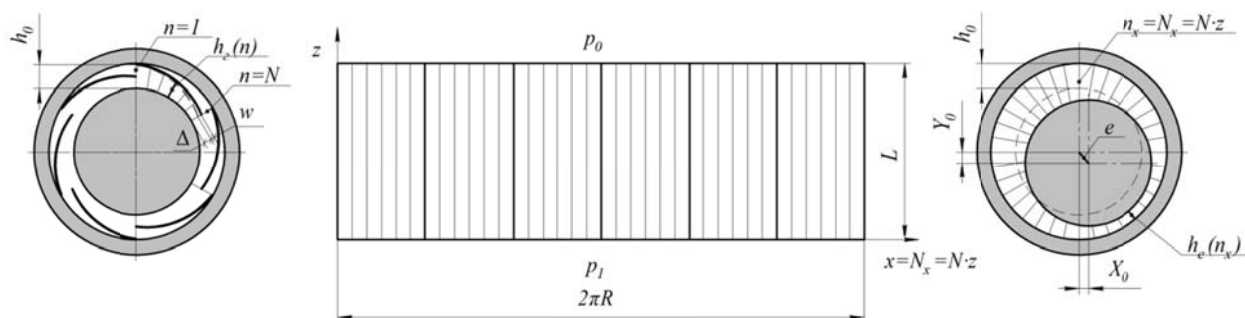


Рисунок 2 – Схема определения функции радиального зазора

$$\begin{cases} h_e(n) = h_0, n = 1 \\ h_e(n) = h(n-1) - \frac{h_0 - \Delta}{N} + w(n), n = 2 \dots N-1, \\ h_e(n) = \Delta + w(n), n = N \end{cases} \quad (4)$$

где h_0 – радиальный зазор при концентричном положении цапфы и втулки ЛГДП в месте крепления лепестка;

Δ – радиальный зазор при концентричном положении цапфы и втулки ЛГДП на конце лепестка;

w – деформация лепестка;

N – число разбиений лепестка;

n – номер разбиения лепестка.

$$h_e(n_x) = -X_0 \sin\left(2\pi \frac{n_x}{N_x}\right) - Y_0 \cos\left(2\pi \frac{n_x}{N_x}\right), \quad (5)$$

где X_0 – смещение цапфы по оси X;

Y_0 – смещение цапфы по оси Y;

n_x – номер разбиения окружности;

N_x – число разбиений окружности.

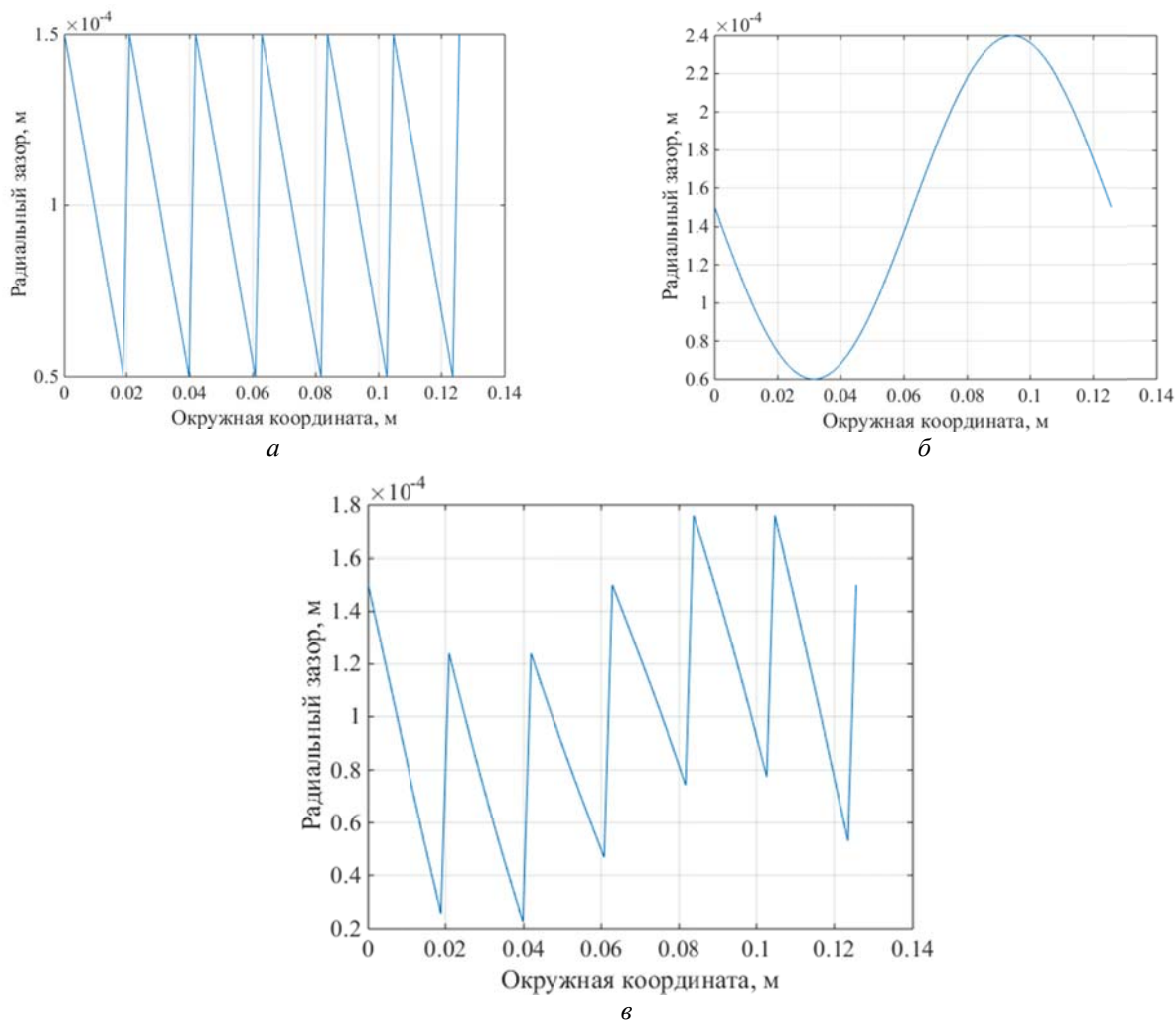


Рисунок 3 – Результаты моделирования зазора:

а) с учетом геометрических параметров лепестка и его деформации, б), с учетом смещения цапфы ротора в) с учетом смещения цапфы ротора и геометрических параметров лепестка и его деформации

Деформация лепестка под совместным действием газодинамической и электромагнитных сил определяется путем решения системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1-\nu}{2R^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2R} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial \theta} + \frac{\nu}{R} \cdot \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ \frac{1+\nu}{2R} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \theta} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial \theta^2} + \frac{1-\nu}{2} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} = -\frac{1-\nu^2}{E\delta} \left[p(x, z) + \frac{F_{em}}{A} \right]; \\ \nu \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial g}{\partial \theta} + \frac{w}{R} + \frac{k_1}{R} \left[R^3 \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + 2R \frac{\partial^4 w}{\partial z^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} \right] = -\frac{1-\nu^2}{E\delta} \left[p(x, z) + \frac{F_{em}}{A} \right]. \end{cases}, (6)$$

где g, u, w – перемещения лепестка;
 R – радиус кривизны лепестка;
 δ – толщина лепестка;
 $p(\theta, z)$ – газодинамическая сила;
 F_{em} – электромагнитная сила.

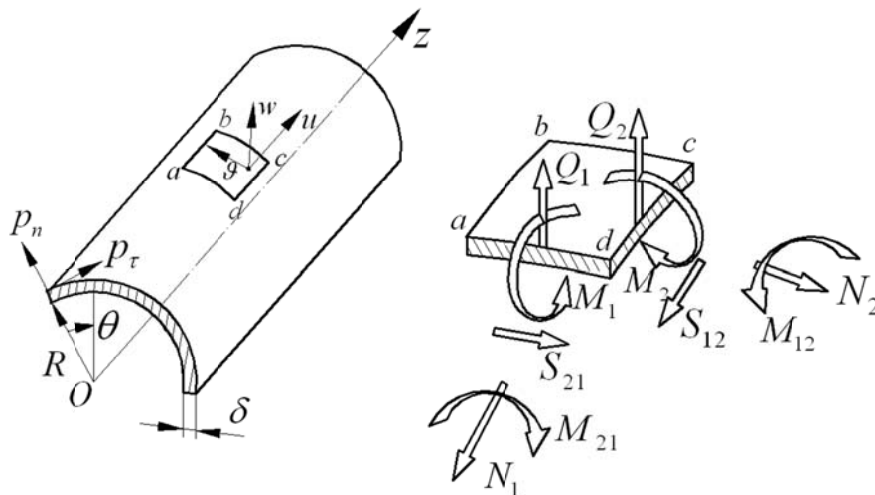


Рисунок 4 – Расчетная схема деформации лепестка

Реакции смазочного слоя в проекциях на оси системы координат можно представить в виде [10]:

$$R_X^{ЛГДП} = \int_0^L \int_0^{\pi D} p \cdot \cos \alpha dx dz, \quad R_Y^{ЛГДП} = \int_0^L \int_0^{\pi D} p \cdot \sin \alpha dx dz, \quad (7)$$

где p – давление в смазочном слое.

Несущая способность (грузоподъемность) W и направление ее действия (угол φ_w) определяются соотношениями:

$$W = \sqrt{R_X^{ЛГДП^2} + R_Y^{ЛГДП^2}} \quad \text{и} \quad \varphi_w = \arctg \left(\frac{R_X^{ЛГДП}}{R_Y^{ЛГДП}} \right). \quad (8)$$

Заключение.

В ходе вычислительного эксперимента были получены поля давлений ЛГДП, величина и направление главного вектора реакции. Эксперимент проводился для следующих параметров роторной системы: скорости вращения ротора $n=30000$ об/мин; диаметр вала $d=40$ мм; длина подшипника $L=35$ мм. На рисунке 5, а и 5, б приведены результаты вычислительного эксперимента для ЛГДП с восьмью лепестками. На рисунке 5, в и 5, г с четырьмя лепестками. Для каждого из подшипников моделировалась ситуация с включенным и выключенным электромагнитом.

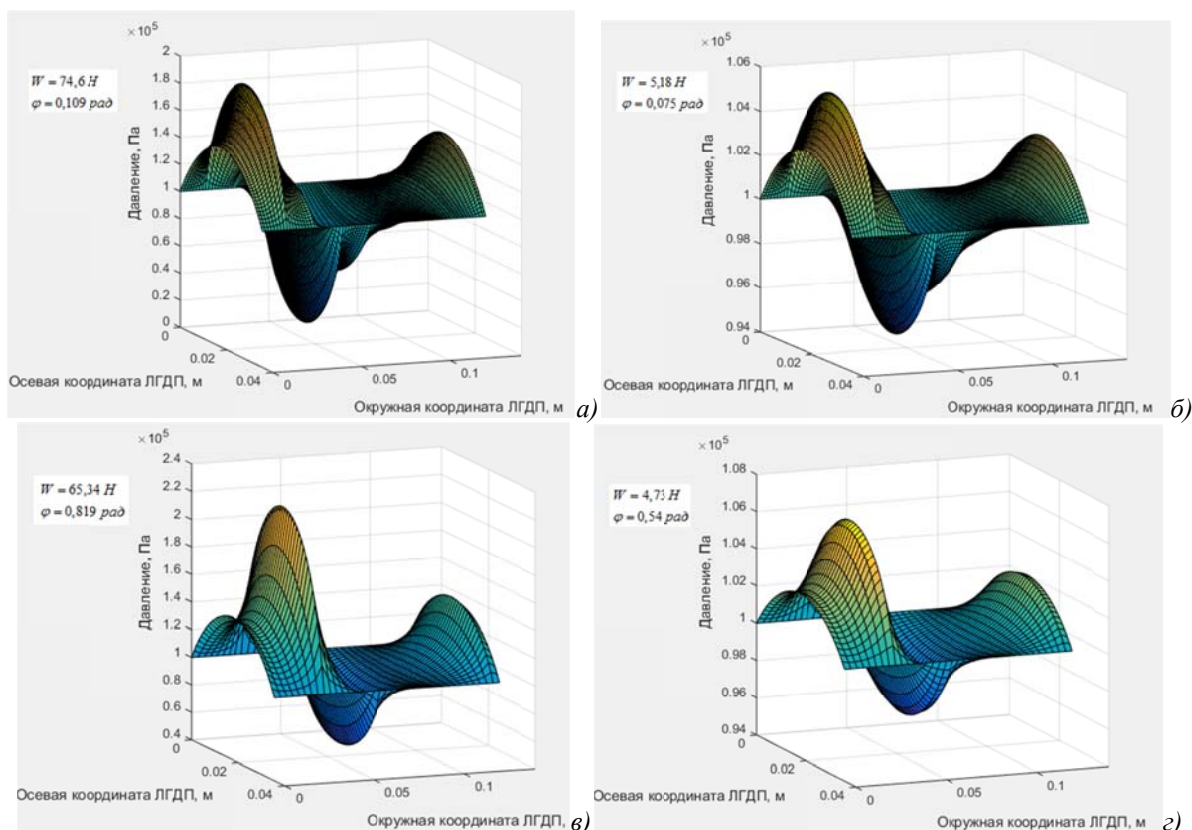


Рисунок 5 – Расчетная схема деформации лепестка

Как видно из результатов, наличие активного управления в виде электромагнита способствует изменению несущей нагрузки ЛГДП вследствие изменения радиального зазора. Также наличие электромагнита позволяет изменять динамические характеристики опоры в процессе работы, что позволяет в необходимые моменты времени переходить критические частоты и тем самым повысить виброустойчивость опорного узла.

Статья выполнена в рамках проекта РНФ №16–19–00186 «Планирование оптимальных по расходу энергии траекторий движения роторов мехатронных модулей в средах сложной реологии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2605228 Российская федерация МПК F16C21/00. Комбинированная опора / Поляков Р.Н., Бондаренко М.Э. заявл. 15.06.2015; опублик. 20.12.2016.
2. Polyakov, R.N. Hybrid Bearing with Actively Adjustable Radial Gap of Gas Foil Bearing / R.N. Polyakov, M.E. Bondarenko, L.A. Savin // Procedia engineering. – 2015. – Vol. 106C. – PP. 132–140.
3. Поляков, Р.Н. Комбинированный подшипниковый узел с активным управлением зазора лепесткового газодинамического подшипника / Р.Н. Поляков, М.Э. Бондаренко, Л.А. Савин // Динамика и виброакустика машин: сборник докладов второй международной научно-технической конференции 15–17 сентября 2014 г. – 2014. – В 2 томах. – Т.2, С. 677–681.
4. Polakov, R.N. Dynamics of the multimass rotor on active hybrid bearings / R.N. Polyakov, S.V. Mayorov, L.A. Savin, M.E. Bondarenko // Proceedings of the ECOMAS Thematic conference on multibody dynamics 2015. – Barcelona, June 29 – July 2, 2015. – PP 912–923

5. Коровчинский, М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения / М.В. Коровчинский. – М.: Mashgiz, 1959. – 404 с.
6. Чернавский, С.А. Подшипники скольжения / С.А. Чернавский. – М.: Mashgiz, 1963. – 244 с.
7. Работнов, Ю.Н. Сопротивление материалов / Ю.Н. Работнов. – Изд.: Физматгиз, 1962. 456 с.
8. Воскресенский, В.А. Расчет и проектирование опор скольжения / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
9. Пешти, Ю.В. Проектирование подшипников скольжения с газовой смазкой / Ю.В. Пешти. – М.: МГТУ, 1993. – 381 с.
10. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение–1, 2006. – 444 с.

Поляков Роман Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Канд. техн. наук, доцент кафедры «Мехатроника,
механика и робототехника»
E-mail: romanpolak@mail.ru

Бондаренко Максим Эдуардович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Аспирант кафедры «Мехатроника, механика и
робототехника»
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

R.N. POLYAKOV, M.E. BONDARENKO

DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION OF THE MAIN VECTOR REACTION OF A LIPESTIC GAZODYNAMIC BEARING WITH ACTIVE CONTROL

Abstract: *The article presents the design of a hybrid bearing with actively adjustable radial gap of a gas foil bearing. The hybrid bearing is a combination of a ball bearing and gas foil bearing with speed separation. Electromagnetic coils are placed on the bearing housing. The present paper considers basic aspects of development of a mathematical model of pressure field of foil bearing and the main vector of reaction.*

Keywords: *bearing, foil bearing, hybrid bearing, pressure field.*

BIBLIOGRAPHY

1. Pat. 2605228 Rossiyskaya federatsiya MPK F16S21/00. Kombinirovannaya opora / Po-lyakov R.N., Bondarenko M.E. zayavl. 15.06.2015; opubl. 20.12.2016.
2. Polyakov, R.N. Hybrid Bearing with Actively Adjustable Radial Gap of Gas Foil Bearing / R.N. Polyakov, M.E. Bondarenko, L.A. Savin // Procedia engineering. – 2015. – Vol. 106C. – PP. 132–140.
3. Polyakov, R.N. Kombinirovanny podshipnikovyy uzel s aktivnym upravleniyem zazora le-pestkovogo gazodinamicheskogo podshipnika / R.N. Polyakov, M.E. Bondarenko, L.A. Savin // Dinamika i vibroakustika mashin: sbornik dokladov vtoroy mezhdunarodnoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii 15–17 sentyabrya 2014 g. – 2014. – V 2 tomakh. – T.2. S. 677–681.
4. Polakov, R.N. Dynamics of the multimass rotor on active hybrid bearings [Text] / R.N. Polyakov, S.V. Mayorov, L.A. Savin, M.E. Bondarenko // Proceedings of the ECOMAS Thematic conference on multibody dynamics 2015. – Barcelona. June 29 – July 2. 2015. – PP 912–923
5. Korovchinskiy, M.V. Teoreticheskiye osnovy raboty podshipnikov skolzheniya / M.V. Korovchinskiy. – М.: Mashgiz. 1959. – 404 s.
6. Chernavskiy, S.A. Podshipniki skolzheniya / S.A. Chernavskiy. – М.: Mashgiz. 1963. – 244 s.
7. Rabotnov, Yu.N. Soprotivleniye materialov / Yu.N. Rabotnov. – Izd.: Fizmatgiz. 1962. 456 s.
8. Voskresenskiy, V.A. Raschet i proyektirovaniye opor skolzheniya / V.A. Voskresenskiy, V.I. Diakov. – М.: Mashinostroyeniye. 1980. – 224 s.
9. Peshti, Yu.V. Proyektirovaniye podshipnikov skolzheniya s gazovoy smazkoy / Yu.V. Peshti. – М.: MGTU. 1993. – 381 s.
10. Savin, L.A. Modelirovaniye rotornykh sistem s oporami zhidkostnogo treniya: monografiya / L.A. Savin, O.V. Solomin. – М.: Mashinostroyeniye–1. 2006. – 444 s.

Polyakov Roman Nikolaevich

Orel State University
Candidate of technical Sciences, associate Professor of the
Department «Mechatronics, mechanics and robotics»
E-mail: romanpolak@mail.ru

Bondarenko Maxim Eduardovich

Orel State University
Postgraduate student of the Department «Mechatronics,
mechanics and robotics»
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

УДК 519.115

В.Ф. БУЛАВИН, Т.Г. БУЛАВИНА, В.В. ЯХРИЧЕВ

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Математическим аппаратом для исследования служит формула Грина. В работе получено решение для континуального множества элементных матриц жесткости линейного конечного элемента. Континуальная модель конечного элемента содержит в своем составе, как классическое решение, так и ряд универсальных. Верификация результата базируется на принципе аналогий с электрической цепью. Основное отличие полученных соотношений заключается в возможности снять любые ограничения на форму конечных элементов благодаря соответствующему выбору элементной матрицы жесткости и базисной функции. Обусловленность конечно–элементной системы уравнений при использовании универсальных решений улучшается, что повышает в итоге достоверность проводимых расчетов при заданной методологической погрешности. Теоретические выводы сопровождаются контрольным примером.

Ключевые слова: формула Грина, метод конечных элементов, матрица жесткости, аппроксимация, обусловленность системы уравнений.

Введение

Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из ведущих инструментов исследования вопросов механики твердого тела, физические процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

Процесс триангуляции расчетной области поля приводит к появлению шаблонов разнообразной формы, среди которых в зонах развитой геометрии появляются тупоугольные фрагменты или их объемные аналоги в случае 3D–измерения. Хотя в аппарате МКЭ имеются элементы высокого порядка аппроксимации, однако, как правило, в программных продуктах реализованы вычислительные алгоритмы для симплекс–элементов. Тупоугольные линейные фрагменты обуславливают неконтролируемую погрешность решения, что в итоге снижает достоверность результатов инженерного анализа.

Математической моделью конечного элемента (КЭ) является элементная матрица жесткости (МЖ). Современная парадигма МКЭ не оперирует множественностью модели КЭ. Вызовом работы является доказательство существования континуального множества МЖ для симплекс–элемента, где имеются альтернативные возможности, обладающие новыми свойствами, при отсутствии недостатков присущих классической концепции [1,2,3].

Цель работы – найти решения, которые свободны от указанного недостатка и одновременно улучшают вычислительные свойства конечно–элементных уравнений.

Классическая теория

Рассмотрим на плоскости неоднородную область D , ограниченную контуром ∂D , поле в которой описывается через скалярную функцию $\varphi(N)$. Требуется найти решение, удовлетворяющее уравнению

$$\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} \varphi) = -\rho(N); N(x, y) \in D; \varphi|_{\partial D} = \phi(M(\eta, \xi)), \quad (1)$$

где μ – материальная характеристика среды.

Численное решение уравнения (1), например, в проекционной форме может быть получено из условия ортогональности невязки [4] базисным функциям $\overline{\varphi_j}$, т.е. из уравнений:

$$\int_D (\operatorname{div} \mu \operatorname{grad}(u_N) + \rho) \overline{\varphi_j} dD = 0; j = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где $u_N(x, y) = \sum_{j=1}^N a_j \overline{\varphi_j}$ – приближенное решение.

Редукция (2) приводит к системе алгебраических уравнений относительно искомых величин, что дает решение исходной задачи.

Классический подход получения функций формы

Выделим для анализа КЭ в виде треугольника произвольного вида при условии, что узлы располагаются согласно модели Паскаля [4,5,6]. Традиционный подход состоит в использовании полиномиальной функции для приближенного решения. В пределах каждого КЭ для скалярной функции используется аппроксимация вида:

$$\bar{\varphi}(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 xy + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 + \dots,$$

где коэффициенты α_k определяются через значения полевой функции в узлах шаблона.

Для линейного КЭ (рисунок 1) аппроксимация вида

$$\bar{\varphi}(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (3)$$

дает для базисной функции и функций формы результат в виде:

$$\bar{\varphi}(x, y) = N_i \varphi_i + N_j \varphi_j + N_m \varphi_m,$$

$$N_i = \left(1 - \frac{x}{c} - \frac{c_2 \times y}{c \times h_c}\right); \quad N_j = \left(\frac{x}{c} - \frac{c_1 \times y}{c \times h_c}\right), \quad N_m = \frac{y}{h_c}; \quad N_i + N_j + N_m = 1.$$

Классическое определение элементной МЖ может быть осуществлено из (2) или, например, из минимума энергетического функционала [4,5,6]. Во всех случаях результат в базисе (x, y) имеет вид:

$$k = \mu S \times \begin{vmatrix} \left(\frac{I}{c^2} + \frac{c_2^2}{c^2 \times h_c^2}\right) \left(\frac{c_1 \times c_2}{c^2 \times h_c^2} - \frac{1}{c^2}\right) \left(-\frac{c_2}{c \times h_c^2}\right) \\ \left(\frac{c_1 \times c_2}{c^2 \times h_c^2} - \frac{1}{c^2}\right) \left(\frac{c_1^2}{c^2 \times h_c^2} + \frac{1}{c^2}\right) \left(-\frac{c_1}{c \times h_c^2}\right) \\ \left(-\frac{c_2}{c \times h_c^2}\right) \quad \left(-\frac{c_1}{c \times h_c^2}\right) \quad \left(\frac{1}{h_c^2}\right) \end{vmatrix},$$

где c_1 и c_2 – отрезки, на которые делит высота h_c сторону длина которой «с»;

S – площадь треугольного симплекс-элемента.

Синтез линейных базисных функций на основе формулы Грина

Рассмотрим вопрос построения базисных функций с помощью интегрального соотношения – формулы Грина:

$$(2\pi)\varphi(N) = \int_{\partial D} \frac{\partial \varphi(M)}{\partial n} \ln\left(\frac{1}{R_{NM}}\right) dl - \int_{\partial D} \varphi(M) \frac{\partial}{\partial n} \ln\left(\frac{1}{R_{NM}}\right) dl + \int_D \frac{\rho(M)}{\mu} \ln\left(\frac{1}{R_{NM}}\right) dS; \quad (4)$$

$$R_{NM} = \sqrt{(\eta - x)^2 + (\xi - y)^2}; \quad N(x, y) \in D.$$

Примем локальную систему координат как показано на рисунке 1 и рассмотрим построение конечно-элементной схемы на базе соотношения (4). Допустим, что среда в пределах КЭ является однородной и изотропной.

Аппроксимируя скалярную функцию вдоль сторон треугольника линейными зависимостями (при соблюдении условия $\oint_{\partial D} \text{grad}_\ell(\varphi) d\ell = 0$, ℓ – касательное направление

вдоль контура), примем $\text{grad}_n(\varphi) = \text{const}$ (n – направление внешней нормали к контуру) на каждом из ребер. Выполним интегрирование в квадратурах контурных интегралов, с использованием трех локальных систем координат, ассоциированных со сторонами треугольника.

Логистика преобразований направлена на формирование соотношений, представляющими, с одной стороны, разностный аналог фундаментального тождества:

$$\int_{\partial D} \left(-\mu \frac{\partial \varphi(M)}{\partial n}\right) dl = \begin{cases} 0 & \text{при } \rho = 0 \\ q & \text{при } \rho \neq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

а с другой стороны подчинена требованиям выполнения этих соотношений при любых значениях величин $\ln(r_i)$, $\ln(r_j)$ и $\ln(r_m)$ (рисунок 1). Окончательно приходим к результату (без учета распределенных поверхностных источников поля в контуре КЭ) в виде комбинации трех инвариантных решений:

$$2\pi\bar{\varphi}(N) = \left[\left(-\frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial n} \right) \Big|_c \cdot y + \frac{\varphi_j - \varphi_i}{c} \cdot x + \varphi_i \right] \cdot \gamma + \left[\left(-\frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial n} \right) \Big|_b \cdot \xi_b + \frac{\varphi_m - \varphi_j}{b} \cdot \eta_b + \varphi_j \right] \cdot \beta + \\ + \left[\left(-\frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial n} \right) \Big|_a \cdot \xi_a + \frac{\varphi_i - \varphi_m}{a} \cdot \eta_a + \varphi_m \right] \cdot \alpha, \quad (6)$$

где γ , β , α – углы, под которыми из точки $N(x,y) \in D$ видны отрезки интегрирования (рисунок 1).

Переход от базиса (x,y) к базисам (η_b, ξ_b) , связанного со стороной треугольника «b», и (η_a, ξ_a) , связанного со стороной треугольника «a», осуществляется через матрицы перехода и обратные.

Значения производных $\left(-\frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial n} \right) \Big|_c$, $\left(-\frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial n} \right) \Big|_b$, $\left(-\frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial n} \right) \Big|_a$ на контуре КЭ найдем, подставив

в (6) координаты узловых точек.

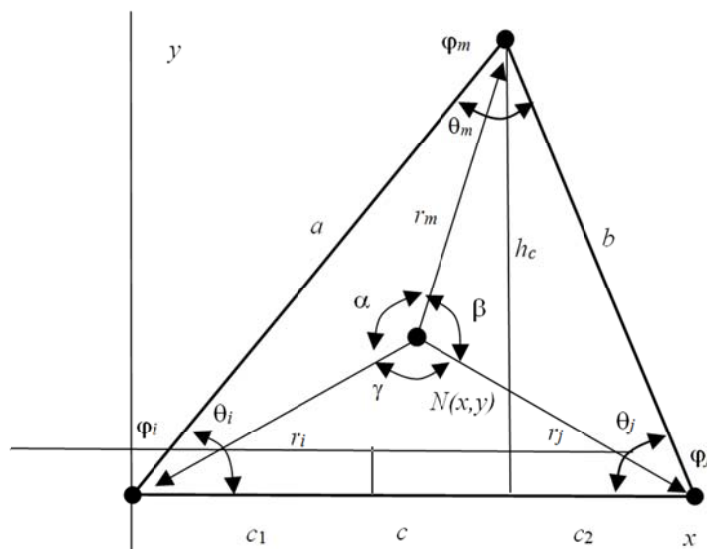


Рисунок 1 – Модель КЭ в виде симплекс-элемента

Решение (6) удовлетворяет условию основной теоремы теории потенциала – теоремы о среднем. Действительно, подставив в итоговое соотношение координаты центра окружности, приходим к тождественному результату.

Погрешность результата

Линейная аппроксимация скалярной функции на контуре КЭ (погрешность $O(h^2)$) приводит к линейной зависимости от координат решения во всех точках области КЭ. Выполнение операций интегрирования в квадратурах повышает эту оценку на один пункт. Таким образом, можно утверждать, что погрешность результата (6) оценивается как $O(h^3)$, где $h = \max(a,b,c)$. Однако линейная базисная функция, представленная в (6) своими инвариантами, имеет погрешность $O(h^2)$.

Учет источников поля

Наличие поверхностных источников поля приводит к необходимости решения дополнительно краевой задачи:

$$(2\pi)\varphi(N) = \int_{\partial D} \frac{\partial \varphi(M)}{\partial n} \ln\left(\frac{1}{R_{NM}}\right) dl + \int_D \frac{\rho(M)}{\mu} \ln\left(\frac{1}{R_{NM}}\right) dS; \quad \varphi|_{\partial D} = 0; \\ R_{NM} = \sqrt{(\eta - x)^2 + (\xi - y)^2}; \quad N(x, y) \in D. \quad (7)$$

Приближенное решение (7), в рамках линейного распределения скалярной функции, может быть найдено при аппроксимации подынтегральных выражений усредненными значениями (с погрешностью $O(h)$ относительно производной скалярной функции):

$$(2\pi)\varphi(N) \approx \ln(r_i) \left[\left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_c c - \lambda_1 \frac{\rho}{2\mu} h_c c \right] + \ln(r_j) \left[\left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_b b - \lambda_2 \frac{\rho}{2\mu} h_b b \right] + \\ + \ln(r_m) \left[\left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_a a - \lambda_3 \frac{\rho}{2\mu} h_a a \right].$$

Для произвольной точки $N(x, y) \in D$ тривиальный ответ $\varphi(x, y) = 0$ может быть получен, если принять решение в виде:

$$\left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_c = \lambda_1 \frac{\rho}{2\mu} h_c; \quad \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_b = \lambda_2 \frac{\rho}{2\mu} h_b; \quad \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_a = \lambda_3 \frac{\rho}{2\mu} h_a, \quad (8)$$

где λ_i – весовые коэффициенты, такие что $\lambda_i > 0$; $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$.

Весовые коэффициенты λ_i из (8) должны быть согласованы с положением точки $N(x, y)$. Выполнить последнее требование можно, если воспользоваться L – координатами [4,5,6], и принять

$$\lambda_1 = \frac{y}{h_c} = L_3; \quad \lambda_2 = \frac{\xi_b}{h_b} = L_1; \quad \lambda_3 = \frac{\xi_a}{h_a} = L_2.$$

Окончательный результат следует рассматривать как решение для симплекс–элемента на основе формулы Грина. Структура соотношения (6) показывает, что, силу произвольного выбора точки $N(x, y)$, её следует рассматривать как суперпозицию инвариантных решений, в трех локальных системах координат, связанных со сторонами КЭ. Таким образом, подпространство линейных базисных функций симплекс–элемента представлено тремя базисными функциями из (6), коэффициенты которых определяются из граничных условий [4,5,6].

Конечно–элементная практика расчетов при математическом описании состояния каждого КЭ строится на базе использования только одной из трех базисных функций.

Континуальная матрица жесткости симплекс–элемента

В логистике решения уравнений (4), а также в последующих преобразованиях составной частью является формулировка справедливых для любых значений $\ln(r_i)$, $\ln(r_j)$ и $\ln(r_m)$ соотношений

$$\left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_c \cdot x - \frac{(\varphi_j - \varphi_i)}{c} y + \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_a \cdot (a - \eta_a) + \frac{(\varphi_i - \varphi_m)}{a} \cdot \xi_a - \frac{\rho}{\mu} \Delta S_i = 0; \\ \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_b \cdot \eta_b - \frac{(\varphi_m - \varphi_j)}{b} \xi_b + \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_c \cdot (c - x) + \frac{(\varphi_j - \varphi_i)}{c} \cdot y - \frac{\rho}{\mu} \Delta S_j = 0; \\ \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_a \cdot \eta_a - \frac{(\varphi_i - \varphi_m)}{a} \xi_a + \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \Big|_b \cdot (b - \eta_b) + \frac{(\varphi_m - \varphi_j)}{b} \xi_b - \frac{\rho}{\mu} \Delta S_m = 0, \quad (9)$$

которые пропорциональны в линейном приближении разностному аналогу интегрального тождества (5) для трех подобластей ΔS_i , ΔS_j , ΔS_m , с диагоналями r_i , r_j , r_m и общей точкой $N(x, y) \in D$ (рисунок 2).

Выражения (9) определяют баланс потоков скалярной функции между внешними границами, а также границами сопряжения трех подобластей с учетом распределенных источников поля внутри КЭ, обеспечивая свойство консервативности для сечений ΔS_i , ΔS_j , ΔS_m .

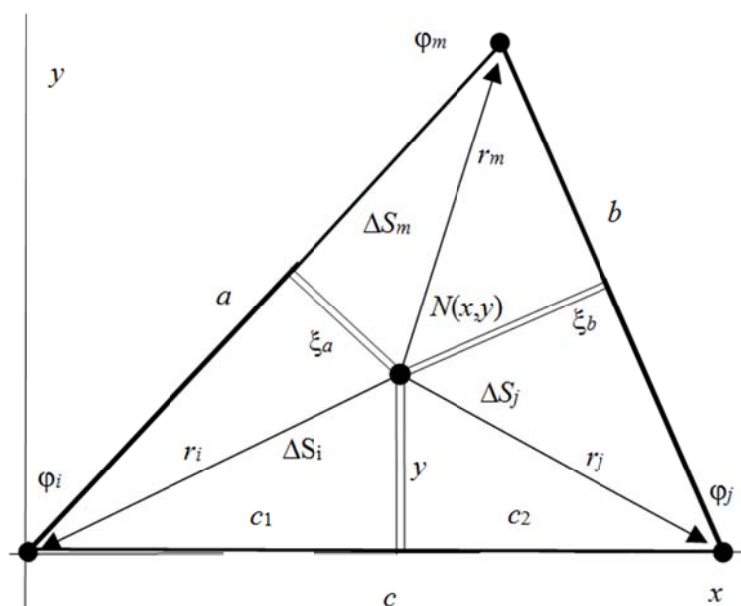


Рисунок 2 – Контрольные сечения в КЭ с центральной точкой $N(x, y)$

Соотношения (9), на основании принципа аналогий с электрическими цепями [7], позволяют сгенерировать концептуальную модель КЭ для симплекс–элемента. Матрица жесткости при этом имеет вид:

$$k = \mu \begin{vmatrix} \left(\frac{y}{c} + \frac{\xi_a}{a} \right) & \left(-\frac{y}{c} \right) & \left(-\frac{\xi_a}{a} \right) \\ \left(-\frac{y}{c} \right) & \left(\frac{\xi_b}{b} + \frac{y}{c} \right) & \left(-\frac{\xi_b}{b} \right) \\ \left(-\frac{\xi_a}{a} \right) & \left(-\frac{\xi_b}{b} \right) & \left(\frac{\xi_a}{a} + \frac{\xi_b}{b} \right) \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Найденный результат позволяет сформулировать теорему:

- конечно–элементное решение уравнения (1) приводит множеству решений для матрицы жесткости линейного симплекс–элемента, причем мощность этого множества определяется как континуум.

Доказательство высказанного положения опирается как на факт непрерывной зависимости элементов МЖ от координат, так и то, что все точки $N(x, y) \in D$ КЭ образуют множество, мощность которого определяется как континуум. При этом, поскольку в качестве точки $N(x, y) \in D$, относительно которой формируются уравнения баланса, может служить любая, кроме узловых, то и число МЖ также образует множество мощностью континуум.

Структура соотношения (10) свидетельствует о том, что такая форма легко может быть получена при использовании в процессе анализа L – координат [4,5,6].

Рассмотрим частные случаи предложенного концептуального решения. Для этого на множестве точек $N(x, y) \in D$ выделим подмножество (мощность которого также определяется как континуум), лежащее на отрезке OH (рисунок 3), являющимся частью прямой Эйлера. Выбор связан с тем обстоятельством, что этот отрезок является геометрическим местом характерных точек треугольника: ортоцентра – точка H (пересечение высот треугольника); центра тяжести элемента – точка G (пересечение медиан

треугольника); центра окружности Эйлера (или окружности девяти точек) – точка P ; центра окружности, описанной вокруг треугольника – точка O .

К множеству точек отрезка OH может быть добавлена еще одна характерная точка (точка Q) – центр окружности, вписанной в треугольник. В общем случае, для произвольного по форме КЭ, она не лежит на прямой Эйлера и на рисунке не показана.

Исследуем решение (10) в указанных случаях. Принимая для $N(x, y) \in D$ координаты точек O, P, G, H и Q приходим к результату для МЖ симплекс–элемента как k_O, k_P, k_G, k_H, k_Q . Эти соотношения представляются в базисах трех локальных систем координат.

Анализ результатов показывает, что форма k_O хотя и отличается по виду от классического выражения, но полностью совпадает с ним по содержанию. Поскольку точка O для тупоугольного КЭ лежит за контуром шаблона, тождество (5) не может быть применено к сечениям $\Delta S_i, \Delta S_j, \Delta S_m$, а значит классическая МЖ в этом случае не существует, как не имеющая физического смысла, хотя формально может быть вычислена классическими технологиями. Это является одной из двух причин, указывающих на невозможность использования таких фрагментов в классической интерпретации МКЭ.

Форма k_H не может быть распространена на КЭ произвольной формы (только для остроугольных шаблонов). Решение $k_P = 0,5(k_O + k_H)$, в виду удвоенного числа арифметических операций и необходимости выполнения дополнительной проверки по условиям применимости, не имеет практического значения и может рассматриваться в качестве методической.

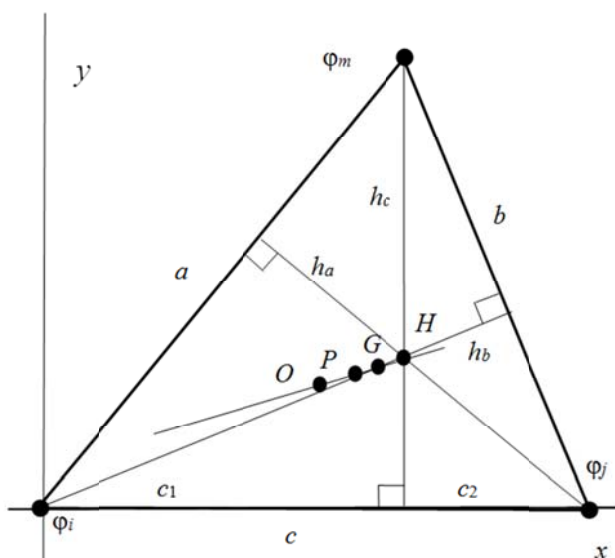


Рисунок 3 – Характерные точки в треугольном шаблоне на отрезке прямой Эйлера

Элементные матрицы жесткости k_G и k_Q имеют приоритетное значение по сравнению с предыдущими, поскольку не связаны никакими ограничениями по форме КЭ и могут быть рекомендованы в практику расчетов в качестве универсальных.

На практике тупоугольные КЭ неизбежно появляются при аппроксимации криволинейных границ расчетной области поля, и лишь небольшое их число по сравнению с «нормальными» элементами скрывает неадекватность для них классической математической модели [8,9]. Погрешность итогового результата при этом оказывается неконтролируемой.

При указанном алгоритме в четырех последних случаях МЖ симплекс–элемента имеют неклассическую форму, как по виду, так и по содержанию. Результаты можно объединить в практически реализуемое семейство моделей КЭ. Далее приведен тестовый пример, в котором реализован альтернативный подход, основанный на концепции континуальной МЖ и призванный иллюстрировать открывающиеся возможности.

Учет точечных источников поля

При наличии точечных источников поля в области КЭ последние естественным образом учитываются в подобластях ΔS_i , ΔS_j , ΔS_m и их вклад будет присутствовать в соотношениях (9). При совпадении координат точки $N(x, y) \in D$ с координатами точечного источника его величина может быть «разнесена» по сечениям ΔS_i , ΔS_j , ΔS_m пропорционально их площадям. Аналогичным образом следует поступить и в случае, когда координаты точечного источника совпадают с границей двух смежных подобластей, приняв во внимание только их площади. Указанный алгоритм отличается от классической технологии МКЭ и дает другие результаты.

При построении конечно-элементных (как и конечно-разностных) соотношений все балансные методы затрудняют оценку погрешности итогового результата. В контексте предложенного подхода подчеркивается как связь формулы Грина и фундаментального тождества (5), так и то, что сами соотношения (9) возникают в результате интегрирования (4) и (7), при этом сложностей в оценке их погрешности не возникает.

Выбор линейной базисной функции

Триангуляция области поля с границами сложной конфигурации приводит к появлению КЭ разнообразных форм. Если для остроугольных и прямоугольных треугольников частные решения $\bar{\varphi}_k$ равноценны, то использование тупоугольных шаблонов практика прикладных расчетов не рекомендует [4–6,8,9], объясняя это большой погрешностью. Однако именно такие шаблоны чаще всего получаются при аппроксимации криволинейных границ.

Дадим простую иллюстрацию того, что эта проблема решается путем рационального выбора базисной функции КЭ и МЖ [1,2,3]. Для рисунка 4,а в локальной системе координат, связанной со стороной треугольника «с», линейную базисную функцию из (6) запишем в виде:

$$\bar{\varphi}(x, y) = \left(1 - \frac{x}{c} - \frac{c_2 \times y}{h_c \times c}\right) \times \varphi_i + \left(\frac{x}{c} - \frac{c_1 \times y}{h_c \times c}\right) \times \varphi_j + \left(\frac{y}{h_c}\right) \times \varphi_m = \left(\frac{\varphi_m - \varphi^*}{h_c}\right) y + \left(\frac{\varphi_j - \varphi_i}{c} x + \varphi_i\right),$$

где обозначено $\varphi^* = \frac{\varphi_j - \varphi_i}{c} \cdot c_1 + \varphi_i$.

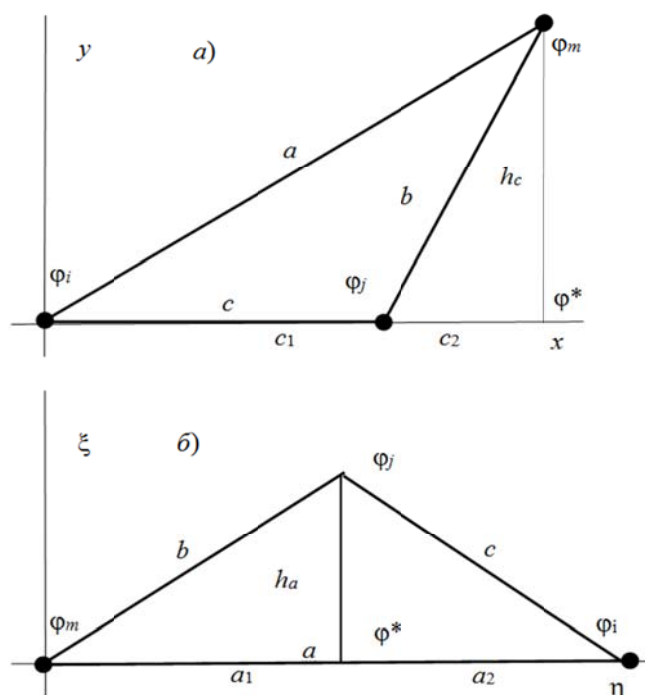


Рисунок 4 – Пример корректного выбора базисной функции

Однако значение φ^* лежит вне контура треугольника и не является элементом линейной оболочки рассматриваемого КЭ, что в свою очередь нарушает условие финитности базисной функции. Эта величина может быть найдена только из соседнего шаблона. Иначе, эта аппроксимация, удовлетворяя исходному уравнению (4) и краевым условиям, не является при этом решением задачи о распределении полевой функции на КЭ. Следовательно, в системе координат (x,y) для симплекс–элемента не может быть построена финитная базисная функция [1,2,3].

Сказанное выше является второй причиной, препятствующей использованию тупоугольных фрагментов в классической интерпретации МКЭ. Таким образом, такой выбор частного решения из (6) не возможен, так как приводит к *неконтролируемой* погрешности.

Ситуация разрешима если воспользоваться частным решением из (6) в локальной системе координат, связанной со стороной «а», (рисунок 4,б). Здесь в осях (η,ξ) финитная функция выглядит следующим образом:

$$\bar{\varphi}(\eta,\xi) = \left(\frac{\varphi_j - \varphi^*}{h_a} \right) \xi + \left(\frac{\varphi_i - \varphi_m}{a} \cdot \eta + \varphi_m \right); \quad \varphi^* = \frac{\varphi_i - \varphi_m}{a} \cdot a_1 + \varphi_m.$$

В последнем случае все величины, входящие в определение базисной функции, принадлежат линейной оболочке треугольника.

Окончательно рекомендации по возможности использования тупоугольных фрагментов в методе конечных элементов можно сформулировать следующим образом [1,2,3]:

- для тупоугольных КЭ базисная функция должна быть выбрана в локальной системе координат, связанной с самой длинной из сторон КЭ;
- градиенты следует вычислять из указанной базисной функции;
- в качестве центральной точки $N(x,y)$, относительно которой рекомендуется вычислять МЖ, следует выбрать либо центр тяжести, либо центр вписанной в КЭ окружности, которые всегда лежат внутри контура КЭ при любой его форме.

Высказанные замечания позволят в процессе реализации МКЭ снять любые ограничения по форме КЭ и тем самым расширить его возможности. Методологическая погрешность решения, при выполнении указанных замечаний, всегда будет сохраняться на уровне $O(h^2)$, где $h=\max(a,b,c)$.

Верификация концепции континуальной матрицы жесткости

Вызовы статьи требуют сравнительной оценки на тестовом примере концептуальной и классической реализаций МКЭ и анализа итоговых результатов. План вычислительного эксперимента включает получение аналитического решения совместно с расчетами на основе классической реализации МКЭ, выступающими в качестве контрольных значений. В противопоставление этим данным ставятся решения на основе концепции о континуальности матрицы жесткости.

В качестве контрольного материала использована задача о кручении цилиндрического стержня некругового сечения, для которого в [8] приведено «ручное» решение. Расчетная модель в виде 1/8 части исходной области показана на рисунке 5,а. На рисунке 5,б представлены два варианта конечно–элементной сетки: стандартный в виде прямоугольных треугольников (сплошные линии) и нестандартный (пунктирные линии). Особенностью второго разбиения является наличие трех тупоугольных фрагментов. Шаблоны такого вида всегда встречаются при автоматическом разбиении расчетной области поля сложной геометрии.

Искусственно усложненная ситуация во втором варианте, при наличии трех тупоугольных фрагментов (элементы 1, 3 и 4), ставит целью проверки концепции континуальной МЖ в экстремальных условиях. Вывод по статье не позволяет использовать классическую МЖ для указанных КЭ, а, следовательно, провести расчет в целом. Авторы

тем самым стремятся показать, что наличие тупоугольных фрагментов не является препятствием для проведения расчетов, при условии альтернативных решений.

Стратегия численного анализа строится при условии определения элементных МЖ относительно сечений с центральной точкой $N(x, y) \in D$, лежащей на отрезке прямой Эйлера [1,2,3]. Следует отметить, что в литературе по МКЭ имеется масса иллюстраций, когда в конечно-элементной сетке присутствуют «плохие» элементы (в основном на границах расчетной области). Указанное обстоятельство снижает достоверность решения (с точки зрения погрешности).

Помимо условия близости к контрольным цифрам, в качестве критерия вычислительных свойств конечно-элементных уравнений выступает число обусловленности глобальной МЖ. Этот параметр рассчитывается из соотношения: $cond(A) = \lambda_{max} / \lambda_{min}$, здесь A – глобальная МЖ, λ – собственное значение.

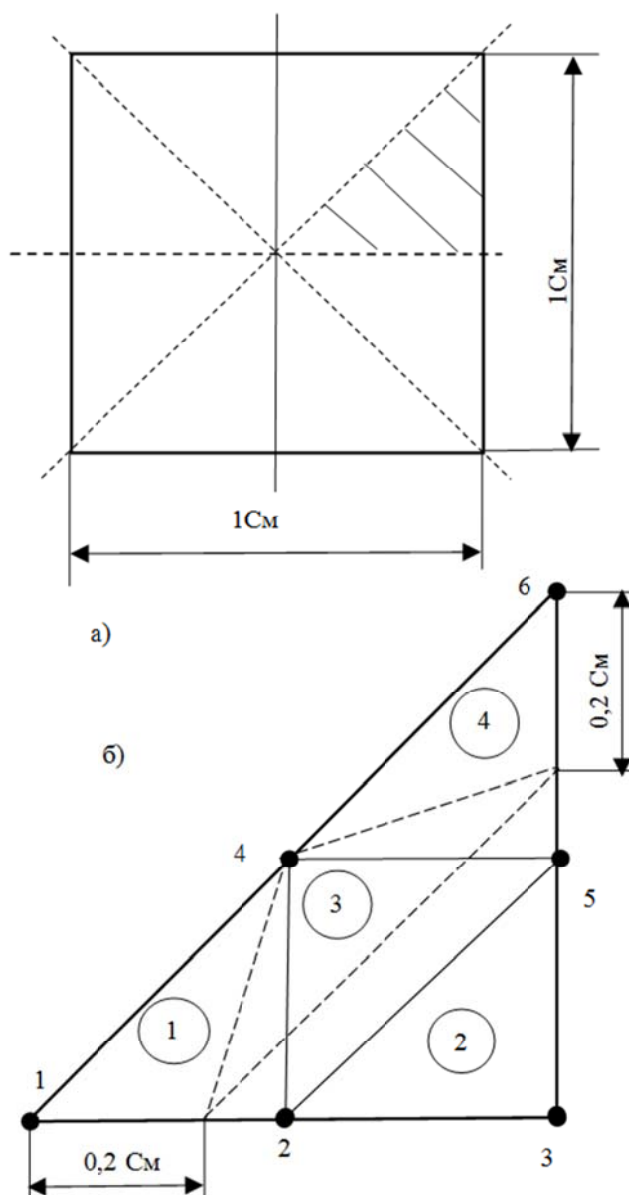


Рисунок 5 – Тестовая задача (а) и примеры конечно-элементной сетки (б)

Функция напряжений $\varphi(x, y)$ подчиняется дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + 2G\theta = 0; \quad \varphi_{\partial D} = 0,$$

где $G=0,8 \times 10^7$ [Н/См²] – модуль сдвига материала;

$$\theta = \frac{\pi}{180} \times \frac{1}{100} [\text{рад/См}] - \text{угол закручивания на единицу длины.}$$

Все исходные данные взяты из [8]. Итоговые результаты вычислительного эксперимента на стандартной сетке приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета тестовой задачи (вариант 1)

Номер узла	Точное решение	Решение из [8]	Решение при построении МЖ для точки O	Решение при построении МЖ для точки P	Решение при построении МЖ для точки G	Решение при построении МЖ для точки H	Решение при построении МЖ для точки Q
	1	2	3	4	5	6	7
φ_1	205,6	218,04	196,4	218,12	210,12	–	213,62
φ_2	160,0	159,9	152,72	141,8	147,27	–	144,9
φ_4	126,4	123,56	119,99	141,8	132,32	–	136,44
Число обусловленности глобальной МЖ							
	–	10,89	10,89	6,31	7,51	–	6,9

Комментарии к таблице 1

Различие результатов в столбцах 2 и 3 носит принципиальный характер: при одинаковых элементных и глобальной МЖ имеет место несовпадение правых частей конечно–элементной системы уравнений. Причина этого кроется в принципе их формирования. *Каковы бы не были доводы в пользу классического подхода и как бы убедительно они не звучали, их нельзя противопоставить фундаментальной теореме поля (5), которая требует иного решения, приводя к консервативному результату.*

Итоговые результаты вычислительного эксперимента на нестандартной сетке приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета тестовой задачи (вариант 2)

Номер узла	Точное решение	Решение из [8]	Решение при построении МЖ для точки O	Решение при построении МЖ для точки P	Решение при построении МЖ для точки G	Решение при построении МЖ для точки H	Решение при построении МЖ для точки Q
	1	2	3	4	5	6	7
φ_1	205,6	132,0	–	253,6	184,77	–	197,04
φ_2^*	176,9	92,16	–	192,89	137,37	–	147,1
φ_4	126,4	65,68	–	187,04	120,64	–	137,94
Число обусловленности глобальной МЖ							
	–	2,09	–	6,18	5,74	–	5,85

Комментарии к таблице 2

Решение в столбце 2 получено по классической технологии МКЭ. Этот результат вступает в противоречие, как на этапах формирования, так и окончательном виде с формулой Грина и интегральным тождеством (5) и приводится здесь по принципу «как

есть». Неконтролируемая погрешность, обусловленная некорректностью математической модели КЭ в классической постановке, является фактором недостоверности результата в случае тупоугольного фрагмента [9,10]. Отсутствие результата в 3 столбце также означает, что для тупоугольного шаблона точка O лежит за контуром КЭ и для элементов 1, 3 и 4 МЖ не существует.

Результаты анализа показывают, что обусловленность конечно–элементной системы уравнений при альтернативной технологии в формировании математической модели КЭ оказывается заметно лучше во всех проведенных расчетах. Предложенный алгоритм образования сечений рассматривается в качестве пилотного и должен быть апробирован на других примерах, возможно, с дальнейшей модификацией. В целом, как указывает автор [8, стр.92], «четырёх элементов мало для получения приемлемой точности решения, но достаточно для иллюстрации».

Заключение

1. Математический аппарат формулы Грина дает возможность получить семейство решений для МЖ симплекс–элементов, которые имеют нестандартные формы. Общее число таких решений образует континуальное множество.

2. Алгоритм формирования континуальной МЖ основан на теореме теории поля.

3. Возможность применения тупоугольных линейных КЭ определяется рациональным выбором базисных функций. Использование таких фрагментов упрощает стратегию автоматического разбиения области поля на КЭ и позволяет точнее аппроксимировать границы сложной конфигурации.

4. Альтернативные элементные МЖ, вычисленные либо относительно центра тяжести треугольника, либо центра окружности, вписанной в треугольник, дают универсальный результат, что позволит в процессе реализации метода конечных элементов снять любые ограничения по форме КЭ при контролируемой погрешности.

5. Свойства конечно–элементных уравнений серьезно улучшаются при использовании альтернативных решений для МЖ.

6. Распространение концепции континуальной матрицы жесткости к трехмерным полям для КЭ типа тетраэдр предполагается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавин, В. Ф. Континуальные схемотехнические модели в методе конечных элементов / В. Ф. Булавин // Электричество. – 2015. – №1. – С. 39–51.
2. Булавин, В. Ф. Метод конечных элементов: альтернативные решения для матрицы жесткости / В. Ф. Булавин, М.Е. Благовестова // Изв. вузов Электромеханика. – 2017. – №1. – С. 5–13.
3. Булавин, В. Ф. Метод конечных элементов: нестандартные решения для матрицы жесткости / В. Ф. Булавин, В.В. Яхричев // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №4(7). – С.28–32.
4. Ильин, В. П. Методы и технологии конечных элементов / В. П. Ильин. – Новосибирск: Изд. Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, 2007. – 371 с.
5. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
6. Марчук, Г. И. Введение в проекционно–сеточные методы / Г. И. Марчук, В. И. Агошков. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
7. Шакиров, М. А. Теоретические основы электротехники. Новые идеи и принципы. Схемоанализ и диакоптика. Декомпозиционные алгоритмы / М. А. Шакиров. – СПб.: Издательство С.–Петербургского университета, 2001. – 212 с.
8. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
9. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 543 с.
10. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А.А.Алямовский. – СПб.: БХВ–Петербург, 2012. – 448 с.: ил.

Булавин Вячеслав Федорович
Вологодский государственный
университет
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технология
машиностроения»
Тел. +7-951-733-86-69
E-mail: bulavin35@mail.ru

Булавина Тамара Георгиевна
Вологодский государственный
университет
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технология
машиностроения»
Тел. +7-921-120-18-31
E-mail: tamara.bulavina.53@mail.ru

Яхричев Виктор Васильевич
Вологодский государственный
университет
Старший преподаватель кафедры
«Технология машиностроения»
Тел. +7-921-231-19-36
E-mail: yahrichev@yandex.ru

V.F. BULAVIN, T.G. BULAVINA, V.V. YAHRICHEV

ENGINEERING ANALYSIS AND NEW TECHNOLOGIES IN THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract. *Mathematical apparatus for the study is Green's formula. In this paper we obtain the solution for the continuum of a plurality of element stiffness matrices linear finite element. The continuum model the finite element contains in its composition as a classical solution, and a number of universal. Verification of the result is based on the principle of the analogy with electrical circuit. The main difference of the obtained relationships is the ability to remove any restrictions on the shape of finite elements by means of a suitable choice of the element stiffness matrix and basis functions. The conditionality of the finite element system of equations when using universal solutions improves, which increases the reliability of the calculations performed for a given methodological error. Theoretical insights are accompanied by a control sample.*

Keywords: *Green formula, finite element method, the stiffness matrix, the approximation, the conditionality of the system of equations.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bulavin, V. F. Continuum Circuit Engineering Models in the Finite Element Method / V. F. Bulavin. // Electricity, – 2015. – №1. – P. 39–51.
2. Bulavin, V. F. Finite element method: an alternative solution for the stiffness matrix / V.F. Bulavin, M.E. Blagovestova // Proceedings of the universities Electromechanics, – 2017. – № 1. – P. 5–13.
3. Bulavin, V. F. Finite element method: innovative solutions for the stiffness matrix / V. F. Bulavin, V.V. Yahrichev // Modern materials, equipment and technologies. – 2016. – № 4(7). – p.28–32.
4. Ilyin, V.P. Methods and technology for finite element / V.P. Ilyin. –Novosibirsk: Publisher Institute of computational mathematics and mathematical Geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences, 2007, – 371 p.
5. Norrie, D. An introduction to finite element Analysis / D. Norrie, G. de Vries. Trans. from Eng.–M.: Mir, 1981.–304 p.
6. Marchuk, G.I. Introduction to projection–grid methods / G.I. Marchuk, V.I. Agoshkov.–M.: Science, 1981.– 416 p.
7. Shakirov M.A. Theoretical foundations of electrical engineering. New ideas and principles. Schemanames and diakoptical. Decomposition algorithms. – SPb.: Publishing house S.–Petersburg University, 2001, – 212 p.
8. Segerlind, L. Application of the finite element method/L. Segerlind. Trans. from Eng.–M.: Mir,1979. –392 p.
9. Zenkevich, O.K. Finite element method in engineering / O.K. Zenkevich. – M.: Mir, 1975. – 543 p.
10. Alyamovskii, A.A. SolidWorks Simulation. How to solve practical problems / A.A. Alyamovskii. – SPb.: BXV– Petersburg, 2012. – 448 p.

Bulavin Vyacheslav Fedorovich
Vologda state University
Ph.D, «Mechanical Engineering»
Ph.: +7-951-733-86-69
E-mail: bulavin35@mail.ru

Bulavina Tamara Georgievna
Vologda state University
Ph.D, «Mechanical Engineering »
Ph.: +7-921-120-18-31
E-mail: tamara.bulavina.53@mail.ru

Yahrichev Victor Vasilyevich
Vologda state University
senior lecturer «Mechanical
Engineering»
Ph.: +7-921-231-19-36
E-mail: yahrichev@yandex.ru

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 62–529

С.Ф. ЯЦУН, А.А. БАРЫБИН, Б.В. ЛУШНИКОВ, Е.Н. ПОЛИТОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЫБОПОДОБНОГО РОБОТА В СРЕДЕ MATLAB/ SIMULINK/SIMMECHANICS

Аннотация. В статье представлены результаты компьютерного моделирования автономного подводного робота, основанного на бионических принципах движения, реализованного в среде MATLAB/Simulink/SimMechanics. Разработанная программа позволяет исследовать влияние различных параметров конструкции робота и факторов окружающей среды на его кинематические и динамические характеристики.

Ключевые слова: подводные плавающие роботы, бионические принципы движения, робот–рыба, моделирование.

Введение

Эволюция обеспечила оптимальные конструктивные особенности многих животных, в том числе и рыб, которые имеют достаточно высокую эффективность в их ареале обитания. Особенности таких конструкций могут повлиять на развитие робототехники в области автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [1]. Например, механика движения рыбы может быть использована при конструировании АНПА бионического типа [2–5].

Основными задачами АНПА являются: разведка ресурсов, мониторинг технического состояния других подводных объектов, гидросферы, а также проведение аварийно–спасательных работ.

Главным преимуществом использования рыбоподобной конструкции является относительная бесшумность и скрытность подводного аппарата. Из недостатков можно отметить сложность управления таких типов роботов. Данные роботы и их модели разрабатываются с целью оценки и выявления новых преимуществ и недостатков такого вида механизмов, а также изучения особенностей поведения робота в водной среде, разработанных с использованием механики рыб и других морских обитателей [1–16].

В представленной работе описана разработка модели рыбы–робота в среде MATLAB/Simulink/SimMechanics, показаны некоторые результаты моделирования данного робота, а также проведен сравнительный анализ результатов моделирования, полученных в представленной и предыдущих работах [16–17].

Основная часть

Конструктивно робот разделён на три основные части (рисунок 1): 1) «тело» (основная часть робота), 2) предхвостье, 3) хвостовой плавник [18–22]. В дальнейшем все выше перечисленные части робота будем считать плоскими недеформируемыми пластинами.

Положение робота в пространстве будет определяться координатами центра масс «тела» робота ($X; Y; Z$), и углами α и θ его поворота вокруг осей Y и Z соответственно. Установившееся значение угла крена вокруг оси X будем принимать равным нулю вследствие обеспечения безусловной остойчивости робота, в результате действия момента, создаваемого силой тяжести и силой Архимеда.

При моделировании все составляющие компоненты вычислительного комплекса были скомпонованы в отдельные подсистемы для облегчения читаемости программы. Основная программа компьютерного моделирования робота–рыбы представлена на рисунке 2.

Основным исполнительным механизмом робота является привод хвостового плавника, который представляет собой кривошипно–коромысловый механизм (рисунок 3), для которого приняты следующие размеры [18–22]: межосевое расстояние $OO_1=0,05$ м; длина кривошипа $OA=0,01$ м; угол хода хвоста–коромысла $\varphi=60^\circ$.

На рисунке 4, а представлена модель рычажного механизма привода хвостового плавника в пакете MATLAB/Simulink/SimMechanics, а на рисунке 4, б – подсистема «Задание движения кривошипа».

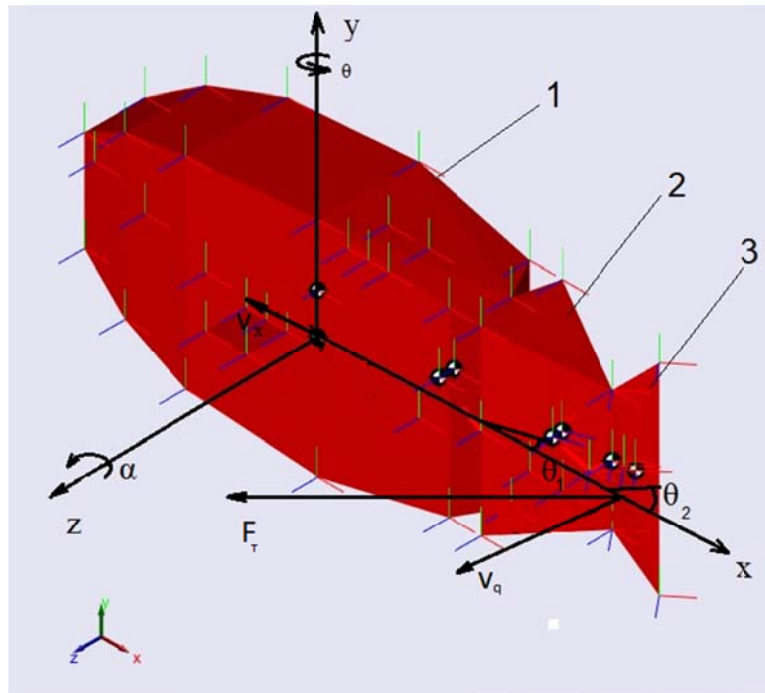


Рисунок – 1 Визуальная модель робота–рыбы в среде MATLAB/ Simulink/SimMechanics

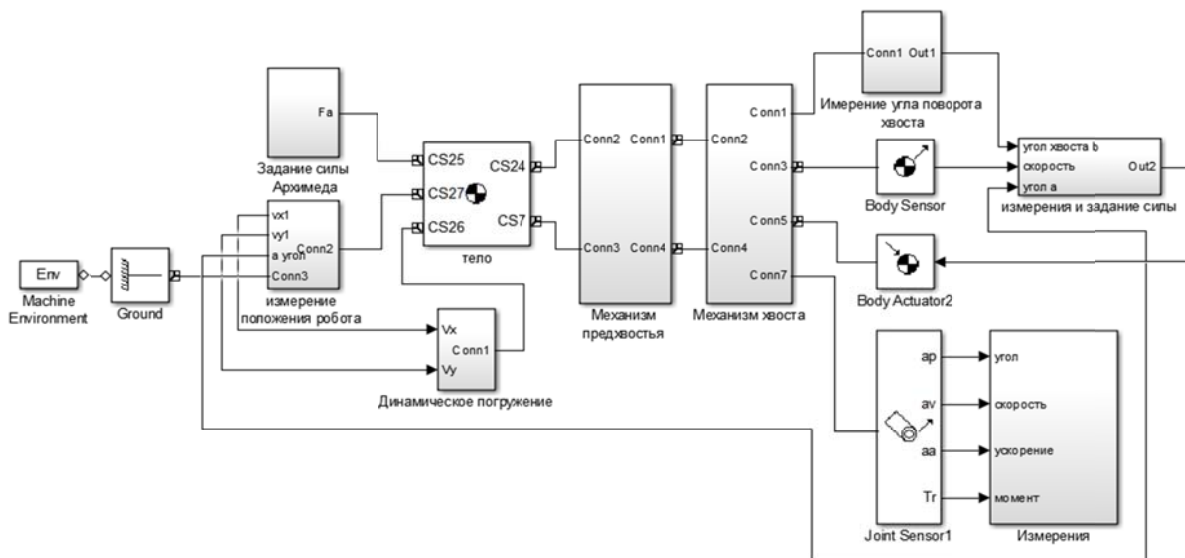


Рисунок 2 – Основная блок–схема программы модели робота–рыбы

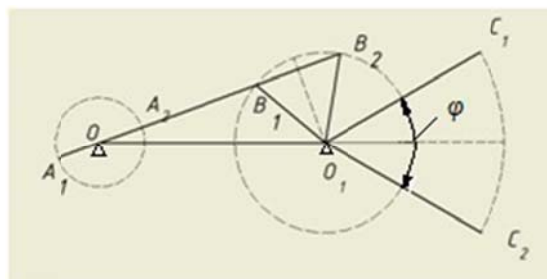


Рисунок 3 – Рычажный механизм привода хвостового плавника

Движение робота происходит благодаря силе тяги, возникающей при колебательном движении хвостового плавника. Используя положения аэродинамической теории крыла, подъёмную (тяговую) силу, действующую на движущуюся плоскую пластину, можно определить согласно следующему выражению [5]:

$$\vec{F}_T = \pi \rho S (\vec{v}_q \times \vec{l}_e) \times \vec{v}_q, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды (воды);

S – площадь поверхности пластины;

\vec{v}_q – вектор скорости точки пластины, находящейся на расстоянии четверти её длины от оси вращения;

\vec{l}_e – единичный вектор, расположенный в плоскости пластины и определяемый координатами: $[\cos \alpha * \cos \theta_2; \sin \alpha; \cos \alpha * \sin \theta_2]^T$.

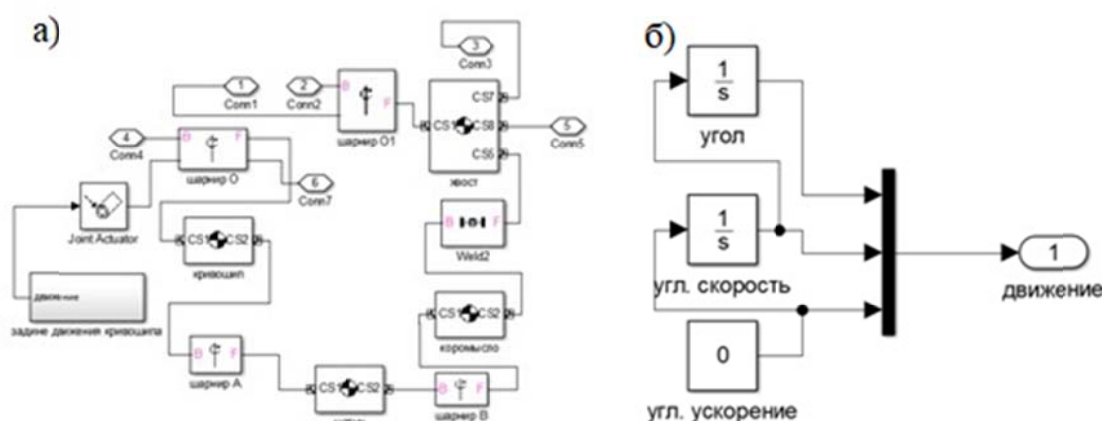


Рисунок 4 – Блок-схемы подсистем:

а) «Механизм привода хвоста», б) «Задание движения кривошипа»

В результате двойного векторного произведения проекции вектора силы тяги \vec{F}_T на оси X , Y и Z будут иметь следующий вид:

$$F_{Tx} = \pi \rho S ((\vartheta_y (\vartheta_x \sin \alpha - \vartheta_z \cos \alpha \cos \theta_2) - (\vartheta_z (\vartheta_z \cos \alpha \cos \theta_2 - \vartheta_x \cos \alpha \sin \theta_2))), \quad (2)$$

$$F_{Ty} = \pi \rho S ((\vartheta_x (\vartheta_x \sin \alpha - \vartheta_z \cos \alpha \cos \theta_2) - (\vartheta_z (\vartheta_y \cos \alpha \cos \theta_2 - \vartheta_x \cos \alpha \sin \theta_2))), \quad (3)$$

$$F_{Tz} = \pi \rho S ((\vartheta_y (\vartheta_z \sin \alpha - \vartheta_z \cos \alpha \cos \theta_2) - (\vartheta_x (\vartheta_z \cos \alpha \cos \theta_2 - \vartheta_x \cos \alpha \sin \theta_2))). \quad (4)$$

По полученным уравнениям была построена подсистема «Задание силы тяги» (рисунок 5):

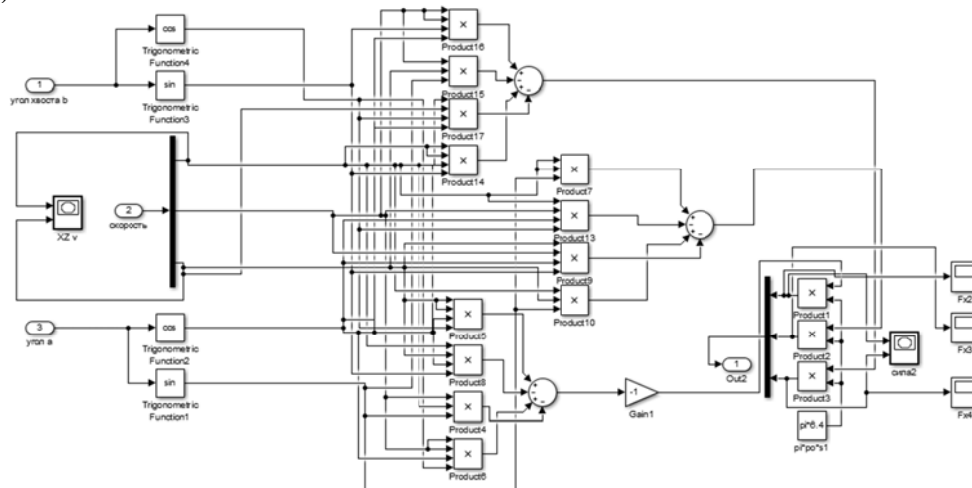


Рисунок 5 – Блок-схема подсистемы «Задание силы тяги»

В приводе предхвостья также используется кривошипно–коромысловый механизм, поэтому модель данного звена имеет аналогичный вид и отличается от модели хвоста лишь координатами и массой звеньев. В качестве допущения примем, что силы тяги создаваемые предхвостием и «телом» робота пренебрежимо малы.

В конструкции робота–рыбы предусмотрены два механизма погружения: статический и динамический.

Для статического погружения робота внутри «тела» находится поршень для забора воды, в результате чего изменяется водоизмещение, вследствие этого изменяется и сила Архимеда, что заставляет рыбу погружаться или всплывать на поверхность. Блок–схема подсистемы «Задание силы Архимеда» показана на рисунке 6.

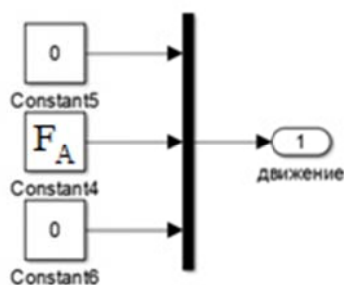


Рисунок 6 – Блок–схема подпрограммы «Задание силы Архимеда»

Динамическое погружение обеспечивается при помощи боковых плавников. Сила динамического погружения реализована в подсистеме «Динамическое погружение», представленной на рисунке 7, и соответствует следующим уравнениям [5]:

$$F_{\text{дп}}^x = \pi \rho S \vartheta \sin \alpha \sin \gamma, \quad (4)$$

$$F_{\text{дп}}^y = \pi \rho S \vartheta \sin \alpha \cos \gamma, \quad (5)$$

где γ – угол поворота боковых плавников относительно тела робота.

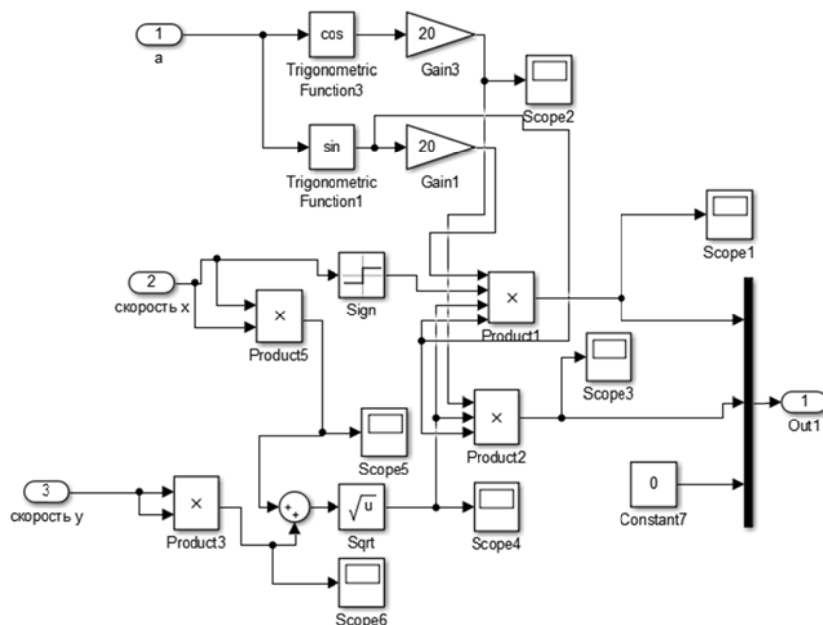


Рисунок 7 – Блок–схема подпрограммы «Сила динамического погружения»

Находясь в водной среде, робот испытывает силы и моменты от лобового сопротивления, которые пропорциональны скорости и проекции площади на плоскость, перпендикулярную к направлению движения тела. Эти воздействия были реализованы в

подпрограмме «Измерение положения робота» (рисунок 8). Также в данной подсистеме можно определить скорость, положение и ускорение центра масс робота относительно любой из осей.

На рисунке 9 показана схема подсистемы «Измерение угла поворота хвоста». В данной подсистеме измеряются законы изменения угла, угловой скорости, углового ускорения хвоста в зависимости от времени, которые будут применены при расчете сил действующих на хвостовой плавник.

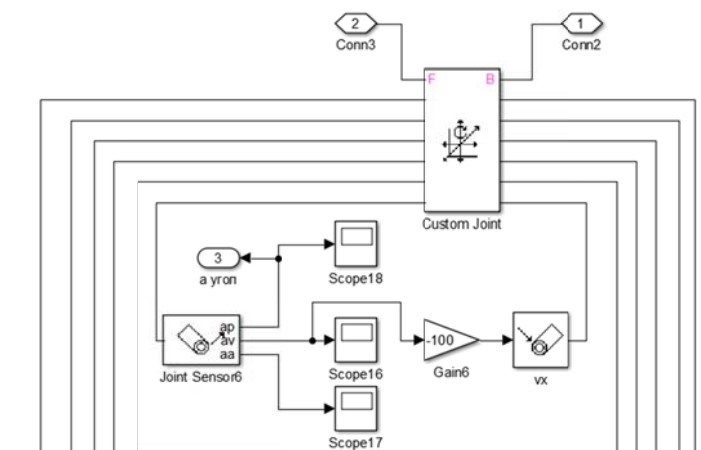


Рисунок 8 – Блок-схема подпрограммы «Измерение положения робота»

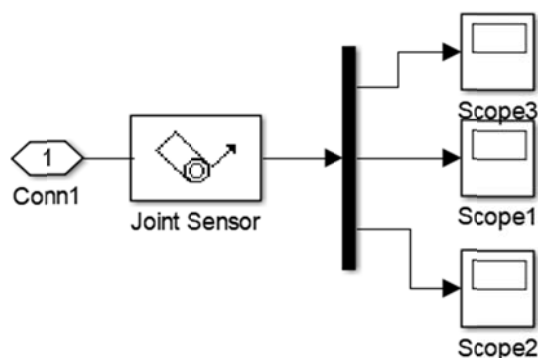


Рисунок 9 – Блок-схема подпрограммы «Измерение угла поворота хвоста»

На рисунке 10 показаны законы изменения угла, угловой скорости и углового ускорения хвоста, которые были получены в результате моделирования при частоте колебаний хвостового плавника 4 Гц.

На рисунке 11 показан годограф вектора абсолютной скорости точки на хвостовом плавнике, в которой приложена сила тяги. По данному рисунку можно сделать вывод о том, что проекция средней скорости центра масс рыбы на ось X составляет 0,15 м/с.

На рисунке 12 представлена проекция годографа вектора тяговой силы на горизонтальную плоскость, создаваемой движением хвостового плавника.

Годограф вектора силы тяги имеет несимметричное расположение относительно горизонтальной оси X, это обусловлено несимметричным законом изменения угла поворота хвостового плавника. Как видно из рисунка, проекция силы относительно вертикальной оси Y также несимметрична, что будет обеспечивать передвижение робота вперед вдоль собственной продольной оси симметрии.

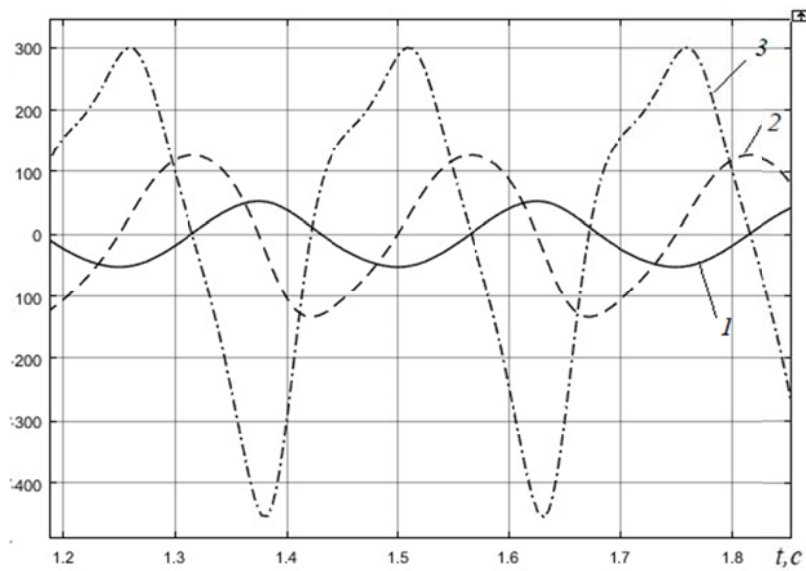


Рисунок 10 – Угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение хвоста:
1– угол $\varphi(\text{рад}) \cdot 10$, 2– угловая скорость $\omega(\text{рад/с}) \cdot 100$, 3– угловое ускорение (рад/с^2)

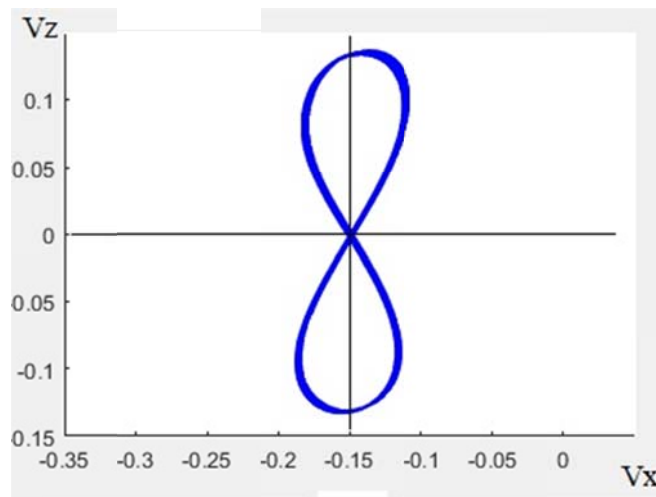


Рисунок 11 – Годограф вектора \vec{V}_q абсолютной скорости точки приложения тяговой силы на хвостовом плавнике

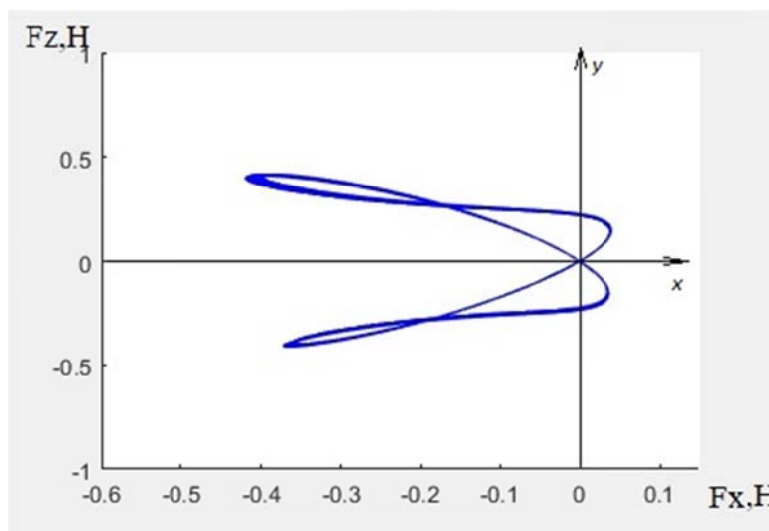


Рисунок 12– Годограф вектора тяговой силы хвостового плавника при движении «тела» робота-рыбы

Из анализа годографов (рисунки 11–12) видно, что их форма качественно соответствует тем, которые были получены при моделировании колебательного движения хвостового плавника в работах [16–17].

На рисунке 13 показан график зависимости проекции средней скорости центра масс робота на ось X от частоты колебаний хвостового плавника. Как видно из анализа данного графика, изменение частоты колебаний хвостового плавника ведет к нелинейному росту средней скорости центра масс робота, причем график имеет вид кривой «насыщения». Это вызвано увеличением силы вязкого сопротивления, которая пропорциональна скорости движения робота.

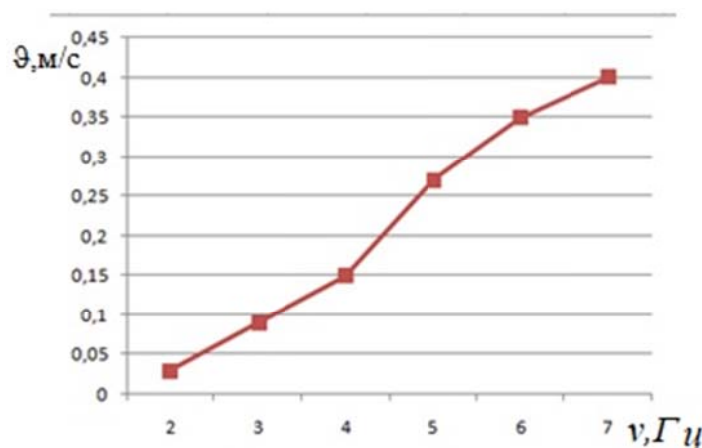


Рисунок 13 – График зависимости проекции средней скорости центра масс робота на ось X от частоты колебаний хвостового плавника

На рисунке 14 представлена траектория центра масс робота в вертикальной плоскости при повороте боковых плавников на 30° от горизонтальной оси за 15 секунд. В результате чего возникает сила сопротивления, вертикальная проекция которой действует вверх, и которая приводит к динамическому всплытию робота. По рисунку видно, что за расчетное время центр масс робота «всплыл» на 2,5 см, переместившись горизонтально на 10 см.

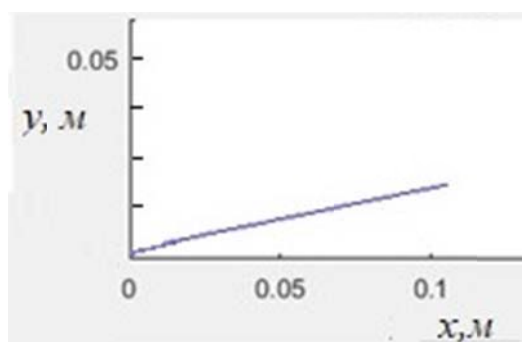


Рисунок 14 – Траектория центра масс робота в вертикальной плоскости при повороте боковых плавников на 30°

На рисунке 15 показана траектория движения центра масс рыбоподобного робота в плоскости XZ . Относительно оси Z наблюдается небольшое смещение (0,8 мм), это также обусловлено несимметричным законом изменения угла поворота хвостового плавника, а также наблюдаются небольшие колебания с амплитудой 0,5 мм, которые обусловлены периодическим действием силы тяги в проекции на ось Z . За это время робот достигает своей максимальной скорости при данных параметрах, а расстояние, пройденное за это время, составляет более 1,8 метра.

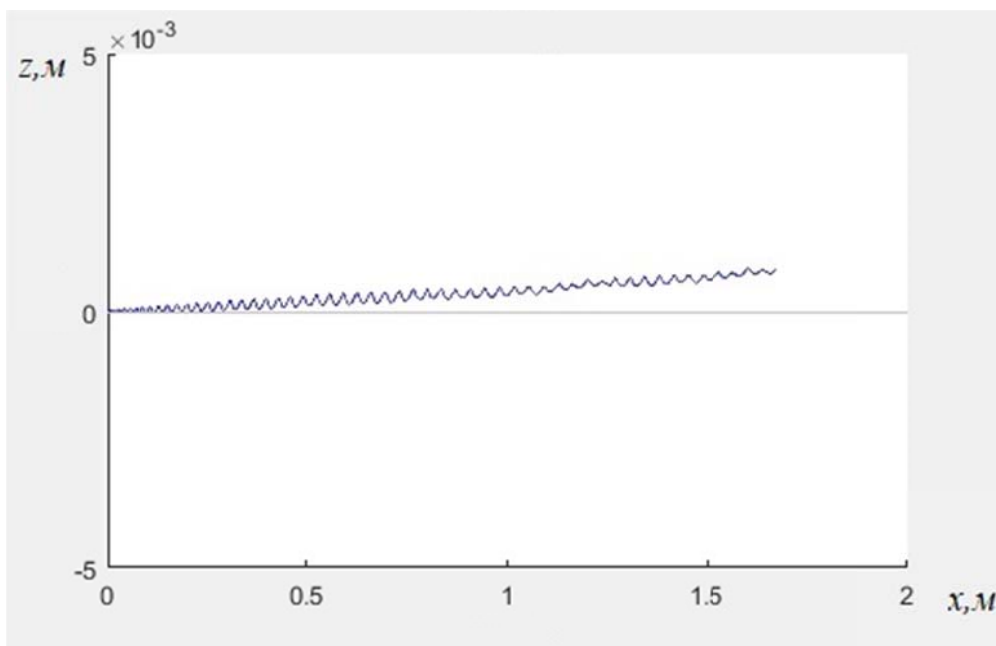


Рисунок 15 – Траектория движения центра масс рыбоподобного робота в плоскости XZ за 15 секунд

На рисунке 16 изображен график изменения проекция скорости «тела» рыбоподобного робота на ось X. На основании данного графика можно убедиться в том, что средняя скорость «тела» рыбоподобного робота в проекции на ось X равна 0,15 м/с.

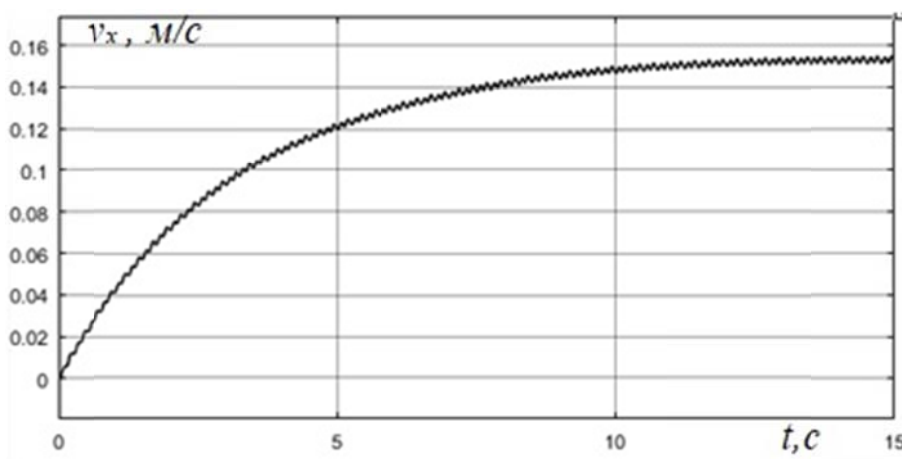


Рисунок 16– График проекции скорости центра масс рыбоподобного робота на ось X

Таким образом, результаты, полученные при моделировании движения робота–рыбы, свидетельствуют об адекватном поведении исследуемой системы и подтверждают правильность разработанной модели и функционирования вычислительного комплекса для ее решения.

Заключение

В статье описана структура модели и ее основных подсистем, обеспечивающих компьютерное моделирование подводного необитаемого аппарата, основанного на бионических принципах движения. Представлены результаты моделирования робота–рыбы, реализованного в программе MATLAB/ Simulink/SimMechanics. Полученные законы изменения координат, скоростей, ускорений и сил, а также траекторий движения качественно соответствуют результатам, полученным в предыдущих работах. Значения различных констант уравнений и коэффициентов сопротивлений должны быть найдены для каждой модели индивидуально, исходя из конструктивных особенностей робота, а также различных условий эксплуатации реального объекта. Разработанная модель позволяет

визуализировать движение моделируемого объекта, за счет анимационных возможностей, обеспечиваемых пакетом MATLAB/SimMechanics. Программа может быть использована для оптимизации конструкции и приводов робота и его системы управления по различным критериям качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров, А.Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом / А.Ю. Бочаров // Подводные исследования и робототехника. 2006. – № 2. – С. 36–52.
2. Kelly, S.D. Modeling and experimental investigation of carangiform locomotion for control / S. D. Kelly, R. J. Mason, C. T. Anhalt et al. // Proc. of the 1998 Amer. Cont. Conf. 1998. – P. 1271–1276.
3. Lachat, D. BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator / D. Lachat, A. Crespi, A.J. Ijspeert // 2006 1st IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomachronics, Proceeding of a meeting held 20–22 February 2006, Pisa, Italy. – 2006. – P. 643–648.
4. Mason, R.J. Experiments in carangiform robotic fish locomotion / R. J. Mason, J. W. Burdick // Proc. of the 2000 ICRA. 2000. – P. 428–435.
5. Morgansen, K.A. Nonlinear Control Methods for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion / K.A. Morgansen, V. Duindam, R.J. Mason, J.W. Burdick // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2001. – P. 427–434.
6. Yuh, J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey // Autonomous Robots. 2000. – Vol. 8. – № 1. – P. 7–24.
7. EunJung K. Design and dynamic analysis of fish robot: PoTuna / K. EunJung, Y. Youngil // Robotics and Automation, 2004. Proceedings of 2004 IEEE International Conference ICRA '04. 2004. – P. 488–492.
8. Long W. Motion control of a robot fish based on CPG / W. Long, W. Shuo, C. Zhiqiang, T. Min, Z. Chao, S. Haiquan, S. Zhizhong // IEEE International Conference on Industrial Technology – Hong Kong (14–17 Dec. 2005). 2005. – P. 1263–1268.
9. Ветчанин, Е.В. Модель безвинтового подводного робота / Е.В. Ветчанин, Ю.Л. Караваев, А.А. Калинин, А.В. Клековкин, Е.Н. Пивоварова // Вестник удмуртского университета. математика. механика. компьютерные науки. 2015. – т. 25. – Вып. 4. – с. 544 – 553.
10. Киселев, Л.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций / Л.В. Киселев, А.В. Медведев // Подводные исследования и робототехника. 2012. – № 1 (13). – С. 24–35.
11. Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы / М.Д. Агеев // Системы и технологии. М.: Наука. 2005. – 400 с.
12. Филаретов, В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов / В.Ф. Филаретов, А.В. Лебедев, Д.А. Юхимец. М.: Наука, 2005. 272 с.
13. Kelasidi, E., Liljebäck P., Pettersen K.Y., Gravdahl J.T. Experimental investigation of efficient locomotion of underwater snake robots for lateral undulation and eel-like motion patterns / E. Kelasidi, P. Liljebäck, K.Y. Pettersen, J.T. Gravdahl // Robotics and Biomimetics. – 2015. – 2(8). – P. 1–27.
14. Porez, M. Improved lighthill fish swimming model for bio-inspired robots: Modeling, computational aspects and experimental comparisons / M. Porez, F. Boyer, A.J. Ijspeert // Int J Robot Res. 2014. – 33(10). – P. 22–41.
15. Liu, J. Novel mechatronics design for a robotic fish / J. Liu, I. Dukes, H. Hu // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Canada. 2005. – pp. 807–12.
16. Лушников, Б.В. Компьютерное моделирование динамики движения бионического плавающего робота в горизонтальной плоскости / Б.В. Лушников, С.Ф. Яцун, Е.Н. Политов, Е.С. Тарасова // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. ч. 2 / редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск. 2012. – с. 111–117.
17. Лушников, Б.В. Компьютерное моделирование динамики бионического плавающего робота / Б.В. Лушников, С.Ф. Яцун, Е.Н. Политов, Е.С. Тарасова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. – Т. 12. – №4(3). – С.562–567.
18. Подводный плавающий робот с бионическим принципом движения Пат. на полезную модель № 124656 Российская Федерация U1 МПК В62D57/00, заявл. 05.06.2012; опубл. 10.02.2013. / Лушников Б.В., Яцун С.Ф., Савин С.И., Казарян К.Г., Мальчиков А.В., Тарасов Е.С., Политов Е.Н., Яцун А.С.
19. Лушников, Б.В. Оптимизация параметров конструкции бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Б.В. Лушников, С.Ф. Яцун, Е.Н. Политов, Е.С. Тарасова // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2011. – Т. 13. – №4(4). – С. 1193–1196.
20. Лушников, Б.В., Савин С.И., Казарян К.Г., Яцун А.С., Мальчиков А.В. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. Ч. 2 / редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. Гос. Ун-т. Курск. 2012. – С. 107–111.

21. Лушников, Б.В. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в техносфере / Б.В. Лушников, Е.Н. Политов, Е.С. Тарасова, К.Г. Казарян // Электронный журнал Cloud of Science. 2014. – Т.1. – № 1. – С. 61–77

22. Лушников, Б.В. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Б.В. Лушников, С.И. Савин, К.Г. Казарян, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. ч. 2 / редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск. – 2012. – с. 107–111.

Яцун Сергей Федорович

ЮгоЗападный государственный университет
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой механики, мехатроники и робототехники
Email: teormeh@inbox.ru

Барыбин Алексей Алексеевич

ЮгоЗападный государственный университет
студент 3 курса ЕНФ кафедры механики, мехатроники
и робототехники
8(960)6926119
Email: alex.barybin1998@yandex.ru

Лушников Борис Владимирович

ЮгоЗападный государственный университет
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
механики, мехатроники и робототехники
79103124778
Email: bvl_61@inbox.ru

Политов Евгений Николаевич

ЮгоЗападный государственный университет
кандидат технических наук, доцент кафедры
механики, мехатроники и робототехники
89606857579
Email: politovyevgeny@rambler.ru

S.F. YATSUN, A.A. BARYBIN, B.V. LUSHNIKOV, E.N. POLITOV

**SIMULATION OF FISH-LIKE ROBOT
IN THE MATLAB / SIMULINK / SIMMECHANICS**

Abstract. *The article presents the results of computer simulation of an autonomous underwater robot based on bionic principles of motion realized in the MATLAB / Simulink / Simmechanics environment. The developed program allows to investigate the influence on the kinematic and dynamic characteristics of the robot of various parameters: robot design and environmental factors.*

Keywords: *underwater floating robots, bionic principles of motion, robot-fish, modeling.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bocharov, A.YU. Sovremennye tendencii v razvitii miniaturnykh podvodnykh apparatov i robotov za rubezhom / A.YU. Bocharov // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2006. – № 2. – С. 36–52.
2. Kelly, S.D. Modeling and experimental investigation of carangiform locomotion for control / S. D. Kelly, R. J. Mason, C. T. Anhalt et al. // Proc. of the 1998 Amer. Cont. Conf. 1998. – P. 1271–1276.
3. Lachat D. BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator / D. Lachat, A. Crespi, A.J. Ijspeert // 2006 1st IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomachtronics, Proceeding of a meeting held 20–22 February 2006, Pisa, Italy. –2006. – P.643–648.
4. Mason, R.J. Experiments in carangiform robotic fish locomotion / R. J. Mason, J. W. Burdick // Proc. of the 2000 ICRA. 2000. – P. 428–435.
5. Morgansen, K.A. Nonlinear Control Methods for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion / K.A. Morgansen, V. Duindam, R.J. Mason, J.W. Burdick // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2001. – P. 427–434.
6. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey // Autonomous Robots. 2000. – Vol. 8. – № 1. – P. 7–24.
7. EunJung K. Design and dynamic analysis of fish robot: PoTuna / K. EunJung, Y. Youngil // Robotics and Automation, 2004. Proceedings of 2004 IEEE International Conference ICRA '04. 2004. – R. 488–492.
8. Long W. Motion control of a robot fish based on CPG / W. Long, W. Shuo, C. Zhiqiang, T. Min, Z. Chao, S. Haiquan, S. Zhizhong // IEEE International Conference on Industrial Technology – Hong Kong (14–17 Dec. 2005). 2005. – R. 1263–1268.
9. Vetchanin E.V. Model' bezvintovogo podvodnogo robota / E.V. Vetchanin, YU.L. Karavaev, A.A. Kalinkin, A.V. Klekovkin, E.N. Pivovarova // Vestnik udmurtskogo universiteta. matematika. mekhanika. komp'yuternye nauki. 2015. – t. 25. – Vyp. 4. – s. 544 – 553.
10. Kiselev L.V. Sravnitel'nyj analiz i optimizaciya dinamicheskikh svojstv avtonomnykh podvodnykh robotov razlichnykh proektov i konfiguracij / L.V. Kiselev, A.V. Medvedev // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2012. – № 1 (13). – S. 24–35.
11. Ageev M.D. Avtonomnye podvodnye roboty / M.D. Ageev // Sistemy i tekhnologii. M.: Nauka. 2005. – 400 s.

12. Filaretov V.F., Lebedev A.V., YUhimec D.A. Ustrojstva i sistemy upravleniya podvodnyh robotov / V.F. Filaretov, A.V. Lebedev, D.A. YUhimec. M.: Nauka, 2005. 272 s.
13. Kelasidi E., Liljebäck P., Pettersen K.Y., Gravdahl J.T. Experimental investigation of efficient locomotion of underwater snake robots for lateral undulation and eel-like motion patterns / E. Kelasidi, P. Liljebäck, K.Y. Pettersen, J.T. Gravdahl // *Robotics and Biomimetics*. – 2015. – 2(8). – P. 1–27.
14. Porez M. Improved lighthill fish swimming model for bio-inspired robots: Modeling, computational aspects and experimental comparisons / M. Porez, F. Boyer, A.J. Ijspeert // *Int J Robot Res*. 2014. – 33(10). – P. 22–41.
15. Liu J. Novel mechatronics design for a robotic fish / J. Liu, I. Dukes, H. Hu // *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Canada. 2005. – pp. 807–12.
16. Lushnikov B.V. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki bionicheskogo plavayushchego robota v gorizont'al'noj ploskosti / B.V. Lushnikov, S.F. YAcun, E.N. Politov, E.S. Tarasova // *Upravlyaemye vibracionnye tekhnologii i mashiny: sb. nauch. st.: v 2 ch. ch. 2 / redkol.: S.F. YAcun (otv. red.) [i dr.]; YUgo-Zap. gos. un-t. Kursk*. 2012. – s. 111–117.
17. Lushnikov B.V. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki bionicheskogo plavayushchego robota / B.V. Lushnikov, S.F. YAcun, E.N. Politov, E.S. Tarasova // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2010. – T. 12. – №4(3). – S.562–567.
18. Podvodnyj plavayushchij robot s bionicheskim principom dvizheniya Pat. na poleznuyu model' № 124656 Rossijskaya Federaciya U1 MPK B62D57/00, zayavl. 05.06.2012; opubl. 10.02.2013. / Lushnikov B.V., YAcun S.F., Savin S.I., Kazaryan K.G., Mal'chikov A.V., Tarasov E.S., Politov E.N., YAcun A.S.
19. Lushnikov B.V. Optimizaciya parametrov konstrukcii bionicheskogo plavayushchego robota dlya monitoringa prirodnyh i tekhnogennyh ob"ektov v gidrosfere / B.V. Lushnikov, S.F. YAcun, E.N. Politov, E.S. Tarasova // *Izv. Samar. nauch. centra RAN*. 2011. – T. 13. – №4(4). – S. 1193–1196.
20. Lushnikov B.V., Savin S.I., Kazaryan K.G., YAcun A.S., Mal'chikov A.V. Bionicheskij plavayushchij robot dlya monitoringa prirodnyh i tekhnogennyh ob"ektov v gidrosfere // *Upravlyaemye vibracionnye tekhnologii i mashiny: sb. nauch. st.: v 2 ch. CH. 2 / redkol.: S.F. YAcun (otv. Red.) [i dr.]; YUgo-Zap. Gos. Un-t. Kursk*. 2012. – S. 107–111.
21. Lushnikov B.V. Bionicheskij plavayushchij robot dlya monitoringa prirodnyh i tekhnogennyh obektov v tekhnosfere / B.V. Lushnikov, E.N. Politov, E.S. Tarasova, K.G. Kazaryan // *EHlektronnyj zhurnal Cloud of Science*. 2014. – T.1. – №1. – S. 61–77
22. Lushnikov B.V. Bionicheskij plavayushchij robot dlya monitoringa prirodnyh i tekhnogennyh obektov v gidrosfere / B.V. Lushnikov, S.I. Savin, K.G. Kazaryan, A.S. YAcun, A.V. Mal'chikov // *Upravlyaemye vibracionnye tekhnologii i mashiny: sb. nauch. st.: v 2 ch. ch. 2 / redkol.: S.F. YAcun (otv. red.) [i dr.]; YUgo-Zap. gos. un-t. Kursk*. – 2012. – s. 107–111.

Yatsun Sergey Fedorovich

South West State University
 Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the
 Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics
 Kursk, street 50 let Otyabrya 94
 8 (4712) 222626
 teormeh@inbox.ru

Barybin Alexey Alekseevich

South West State University
 3rd year student of the Faculty of Mechanics,
 Mechatronics and Robotics
 8 (960) 6926119
 alex.barybin1998@yandex.ru

Lushnikov Boris Vladimirovich

South West State University
 Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
 Associate Professor of the Department of Mechanics,
 Mechatronics and Robotics
 Kursk, street 50 let Otyabrya 94
 79103124778
 bvl_61@inbox.ru

Politov Evgeny Nikolaevich

South West State University
 Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of
 the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics
 89606857579
 politovyevgeny@rambler.ru

ФОРМАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Аннотация. В работе приведены принципы формализации концептуальной модели повышения точности бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ). Обоснована последовательность определения целевых функций и оптимизируемых параметров с формированием моделей, основанных на использовании ионно–плазменных и лазерных технологий (ИПЛТ), посредством декомпозиции гироскопа до узлов и функциональных элементов с выявлением критериев оценки и показателей точности на каждом уровне. Определены технологические аспекты и признаки использования ИПЛТ для создания функциональных элементов, связанные с изменением геометрии и состояния объекта и обусловленные протеканием структурно–фазовых превращений модифицируемого поверхностного слоя материала. Представлена совокупность и методы расчета химических взаимодействий, обеспечивающих структурно–фазовые превращения. На примере ротора БЭСГ обоснована эффективность комплексного использования моделей ИПЛТ для решения многоцелевых задач, связанных с формированием оптических параметров ротора и минимизацией различия электрофизических свойств базовой поверхности ротора и поверхности растрового рисунка.

Ключевые слова: гироскоп, ротор, системное моделирование, целевая функция, оптимизируемые переменные, растровый рисунок, оптические характеристики, ионно–плазменные и лазерные технологии.

Введение

Бурный рост промышленности и науки приводит к ситуации, когда создание каких-либо новых технологий и технических объектов становится невозможным без интенсивного применения научных методов поиска технических решений. Одним из таких аспектов научного исследования является метод системного моделирования, без которого не обходится ни одна конструкторская и ни одна исследовательская работа [1], и в ходе которого можно выделить концептуальную модель и схемы моделирующих алгоритмов для исследуемого объекта. Концептуальная или обобщенная модель, как правило, имеет избыточное число переменных, что усложняет интерпретацию результатов, поэтому весьма важным аспектом системного моделирования является формализация концептуальной модели с декомпозицией, как самого объекта, так и сочетаний управляющих факторов, что позволяет перейти к более наглядным и простым структурам моделей.

Постановка задачи

Примером эффективного применения методов системного анализа для решения задач создания бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ), который используется в системах ориентации орбитальных космических аппаратов [2], является разработка информационно–логической модели (ИЛМ) технологического проектирования процесса изготовления основного узла БЭСГ – сферического ротора [3]. В ИЛМ выделены основные параметры ротора – динамические, геометрические, оптические, а также сгруппированы характеристики элементов ротора, непосредственно влияющие на эти параметры. К указанным характеристикам можно отнести его моменты инерции и дисбаланс, контраст и равномерность контраста. ИЛМ включает последовательное формирование требований к узлам и элементам БЭСГ и синтез результатов, обеспечиваемых использованием ионно–плазменных и лазерных технологий (ИПЛТ). Вместе с тем система, определяющая процесс создания и повышения точности БЭСГ, является более сложной структурой, в которой существует множество взаимосвязей, часть из которых может быть и неочевидного характера. Это требует выявления комплексных системных подходов, которые могут базироваться на формализации концептуальной модели процесса, что позволит, в конечном счете, определить логические обоснованные механизмы использования ИПЛТ, в том числе и для решения многоцелевых задач.

Цель работы заключалась в формализации концептуальной модели процесса создания и повышения точности БЭСГ с формированием моделей использования ИПЛТ.

В работе решались следующие задачи:

- выбор принципов и условий последовательной формализации концептуальной модели с переходом от содержательного описания процесса создания БЭСГ к совокупности моделей, основанных на ИПЛТ;
- выявление для целевых функций элементов БЭСГ управляемых переменных в задачах оптимизации.

Формализация концептуальной модели на основе использования ИПЛТ

В общем виде процесс создания изделия можно представить как переход объекта из исходного состояния X в требуемое конечное состояние Y в результате воздействия внешних факторов, представляющие собой оператор перехода P , который, по сути, является функцией, описывающей конкретное воздействие, или системы выражений:

$$\{P: X \rightarrow Y\}, \quad (1)$$

Указанную систему можно рассматривать как концептуальную модель, формализация которой, связанная с выводом аналитического вида целевых функций, позволит, выявить технические решения процесса создания конкретного объекта.

Формализация модели, определяемой системой выражений (1), связана с формированием структурной схемы корреляции показателей точности, где уровни этих показателей определены на основе декомпозиции и выявления иерархической структуры изделия, его элементов, а также параметров, характеризующих точность на каждом уровне. Можно считать, что точность гироскопа, как выходной параметр, является функцией внутренних параметров, формируемых в результате декомпозиции концептуальной модели. Для выполнения указанной последовательной формализации можно сформулировать следующие положения:

- декомпозиция объекта, каким в данном случае является БЭСГ, до узлов, деталей и функциональных элементов с выявлением корреляции показателей точности;
- определение для этих узлов, деталей и функциональных элементов целевых функций, согласованных с целевой функцией концептуальной модели.

Точность гироскопа обеспечивается с одной стороны, точностью определения углового положения ротора, а с другой – минимизацией уводящих моментов. Для БЭСГ угловое положение ротора полностью определяется точностью функционирования оптоэлектронной системы съема информации (ОСС) [4]. Выбирая в качестве целевой функции точность гироскопа и определяя его как первый уровень декомпозиции, на втором, иерархически подчиненном уровне, можно представить такие узлы гироскопа, как ОСС и ротор, показатели точности узлов и критерии оценки этих показателей.

Точность ОСС определяется чувствительностью оптического измерителя, связанной с точностью наносимого на ротор рисунка, а контролируемыми показателями точности ОСС можно считать кривые нелинейности, пространственные карты отражения поверхности ротора, и сигнал с оптического датчика в экваториальной зоне ротора [4]. Другой характеристикой чувствительности ОСС является контраст рисунка K , обусловленный нормированной разностью коэффициентов отражения базовой R_b поверхности ротора и нанесенного рисунка R_r ,

$$K = \frac{R_b - R_r}{R_b + R_r}. \quad (2)$$

Ротор БЭСГ можно представить как узел, содержащий такие элементы, как сферическая бериллиевая основа, покрытие нитрида титана и растровый рисунок. Основными техническими характеристиками, определяющими точность ротора и влияющими на уводящие моменты, для сферической заготовки являются дисбаланс, форма и моменты инерции, а для покрытия и рисунка – оптический контраст (выражение (2)). Таким

образом, техническими характеристиками покрытия и рисунка являются значения коэффициентов отражения R_b и R_r , а контраст K можно определить как параметр ротора и показатель чувствительности ОСС. Процесс формирования контраста K обеспечивается согласованным использованием моделей формирования R_b при нанесении покрытия на основу ротора и R_r при лазерном маркировании рисунка.

Принимая точность БЭСГ в качестве основного оптимизируемого показателя или критерия оценки, можно представить систему целевых функций F_i в виде:

$$\{F_i = F(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)\}, \quad (3)$$

где $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ – аргументы, подлежащие оптимизации и являющиеся управляемыми параметрами.

При этом указанные аргументы, в зависимости от уровня детализации, относятся к гироскопу, его узлам или функциональным элементам, определяя соответствующие показатели точности. Для каждого из узлов БЭСГ аргументы целевой функции $F_{\text{узн}}$ относятся к функциональным элементам этих узлов, обуславливая точность их выполнения. Очевидно, что на следующем этапе представления целевой функции $F_{\text{ф.эл.}}$ для функциональных элементов целесообразно оперировать аргументами, которые определяют технические характеристики этих элементов и являются конкретными параметрами, которые необходимо оптимизировать.

Процесс оптимизации аргументов на уровне формирования функциональных элементов можно представить как выявление технологических решений на основе использования ИПЛТ [3]. При этом использование ИПЛТ наиболее эффективно в отношении сферического ротора, являющегося основным узлом БЭСГ, с формированием динамических (дисбаланс и моменты инерции) и оптических характеристик, причем наибольший интерес представляют оптические характеристики, поскольку, как указывалось, они во многом определяют точность ОСС, ротора и, как следствие, гироскопа. Выделяя для ротора подобные или определяемые выявленными взаимосвязями и формальным показателям технологические признаки формирования функциональных элементов, создаваемых в результате воздействия ИПЛТ, можно показать, что на этом уровне оптимизируемые аргументы связаны с изменением геометрии и состояния материала и обусловлены протеканием структурно–фазовых превращений.

Таблица 1. – Воздействие методов ИПЛТ на ротор БЭСГ

№ п/п	Реакция	Механизм	Формируемый параметр
1.	$Me(mв) \rightarrow [Me(ж)] \rightarrow Me(г)$	Удаление материала, (сублимация, испарение)	Момент инерции, дисбаланс
2.	$Me(г) \rightarrow [Me(ж)] \rightarrow Me(mв)$	Добавление материала (конденсация)	
3.	$2kMe + mO_2 \rightarrow 2Me_kO_m$ $2pMe_kO_m + (ks-pl)O_2 \rightarrow 2kMe_pO_s$	Образование оксидов	Оптические параметры
4.	$2aMe^n + bN_2 \rightarrow 2Me_a^n N_b$ $2dMe_a^n N_b + (c-ab)N_2 \rightarrow 2Me_{ad}^n N_c$	Образование нитридов	Оптические параметры и однородность свойств поверхности
5.	$Me_x^n + Me_y^{очн} \rightarrow [Me^n]_x [Me^{очн}]_y$ $Me_x^n + Me_y^{очн} \rightarrow \{Me_x^n Me_y^{очн}\}$	Образование твердых растворов и интерметаллидов	

Наглядно это можно представить в виде таблицы 1, в которой на примере ротора БЭСГ приведены виды возможных реакций, их механизмы и формируемые параметры функциональных элементов. В таблице 1 обозначены: Me и Me^n – материалы основы ротора и покрытия, $a, b, c, d, f, k, l, m, p, s, x$ и y – стехиометрические коэффициенты. Как указывалось [3],

динамические характеристики ротора – моменты инерции и дисбаланс – связаны с перераспределением массы материала по его поверхности и формируются за счет удаления или добавления материала, а оптические параметры создаются посредством модификации поверхностного слоя материала покрытия. Рассматривая компоненты химических реакций в таблице 1 как термодинамические фазы, можно выделить фазовые переходы, к которым относятся реакции 1 и 2.

Применяя, например, к реакции $Me(mv) \rightarrow Me(z)$ понятия термодинамики, можно показать, что тепловой эффект этой реакции равен энтальпии сублимации. Реакции №№ 3–5 можно рассматривать как очевидные реакции замещения и соединения [5].

Объективными критериями оценки условий протекания этих процессов, которые являются термически активируемыми [6], является термодинамический анализ, обусловленный расчетом энергии Гиббса ΔG_T^0 в соответствии с выражением:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dt - T \cdot \int_{298}^T 1/T \Delta C_p dt + RT \ln P_g^{-k}, \quad (4)$$

где C_p – теплоемкость, ΔH_{298}^0

ΔS_{298}^0 – изменение стандартных значений энтальпии и энтропии системы,

T – температура процесса,

R – универсальная газовая постоянная и P_g парциальное давление участвующего в реакции компонента g газовой среды.

С другой стороны, при создании функциональных элементов ротора методами ИПЛТ точность каждого элемента определяет кинематика ротора относительно потока высокоэнергетических частиц, и в качестве переменных аргументов при формировании целевой функции на этой стадии можно выделить множества сочетаний факторов процесса ИПЛТ $\{\Phi_{\text{иплт}}\}$ и параметров кинематики $\{\Phi_{\text{кинем}}\}$.

Тогда концептуальную модель для процессов, основанных на ИПЛТ, которые переводят объект из состояния X в состояние Y , можно представить в виде совокупности (кортежа) разнородных множеств и отношений между ними, где состояние объекта Y определяется подмножествами M и G , обусловленными изменением либо материала (M), либо геометрии (G), либо и материала и геометрии объекта ($M \cap G$):

$$\{P: X \rightarrow Y\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \forall x \in X \mid P(x) = y, y \in G, G \subseteq Y \right\} = F_G(\{\Phi_{\text{иплт}}\}_G, \{\Phi_{\text{кинем}}\}_G) \\ \vee \\ \left\{ \forall x \in X \mid P(x) = y, y \in M, M \subseteq Y \right\} = F_M(\{\Phi_{\text{иплт}}\}_M, \{\Phi_{\text{кинем}}\}_M) \\ \vee \\ \left\{ \forall x \in X \mid P(x) = y, y \in Y, Y = M \cap G \right\} = F_{G,M}(\{\Phi_{\text{иплт}}\}_{G,M}, \{\Phi_{\text{кинем}}\}_{G,M}) \end{array} \right\} \quad (5)$$

Основным этапом формализации являются определение сочетаний в множествах M и G , характеризующих технологические аспекты процесса формирования функциональных элементов. Раскрывая содержание множества $\{\Phi_{\text{иплт}}\}$, можно выделить такие управляемые факторы в задаче оптимизации, как температуру, скорость и время обработки, парциальное давление и энергию Гиббса для химических реакций.

Множество $\{\Phi_{\text{кинем}}\}$ очевидным образом включает факторы, определяющие ориентацию и перемещение ротора относительно ионного потока или лазерного луча [7].

Таким образом, процесс формирования функциональных элементов на роторе связан с совместным использованием моделей, определяющих кинематику ротора, и моделей, описывающих структурно-фазовые изменения модифицируемых слоев.

Моделирование процессов формирования растрового рисунка на основе структурно-фазовых изменений модифицируемого слоя.

При создании оптических характеристик, определяемых коэффициентом контрастности K , коэффициент отражения базовой R_b поверхности ротора формируется на

стадии нанесения покрытия [3,7], а коэффициент отражения рисунка R_r – при лазерном маркировании [5,6] покрытия нитрида титана TiN . В зависимости от парциального давления азота при напылении магнетронным методом образуется нитрид титана формулы TiN_x , где область гомогенности лежит в пределах содержания азота от 29,6 до 53,7%, что соответствует химическому составу от $TiN_{0,42}$ до $TiN_{1,16}$, а цвет изменяется от светло–золотисто–желтого до темно–золотисто–желтого [8]. Формирование покрытия формулы TiN_x , где x лежит в пределах 0,6–0,7, приближает его цвет к светло–золотисто–желтому, увеличивая R_b . Моделирование процесса связано с расчетом по выражению (4) энергии Гиббса ΔG_T^0 взаимодействия $2Ti + xN_2 \rightarrow 2TiN_x$ с использованием значений энтальпии ΔH_{298}^0 и энтропии ΔS_{298}^0 для соединений TiN_x , где $x < 1$, которые приближенно можно определить, используя метод химического подобия и исходя из того, что энтропия сложного вещества складывается из энтропии, связанной с массой соединения и межчастичным взаимодействием [9].

В процессе лазерного маркирования, осуществляемого в воздушной среде, преимущественно будет протекать окисление нитрида титана $2TiN_x + 2O_2 = 2TiO_2 + xN_2$, с получением требуемого значения коэффициента отражения рисунка R_r . В данном случае, предполагая, что контраст K увеличивается экспоненциально с увеличением мощности W лазера, моделирование процесса, помимо расчета энергии Гиббса, можно представить как выбор оптимальной аппроксимирующей функции [10]. На первом этапе используется непараметрическая аппроксимация, в результате которой можно получить зависимость $K \approx K_{max} - Ae^{-W/W_0}$, где K_{max} – максимально достижимое значение контрастности (определяется характером взаимодействия материала с лазерным излучением), W_0 – мощность, при которой K уменьшается в e раз, и A – константа, конкретизирующая характер зависимости $K \propto e^{-W/W_0}$. Поскольку лазерная маркировка TiN_x при $x < 1$, позволяет получить одинаковые значения контрастности при меньшей мощности лазера W , что связано с более высокими значениями коэффициента отражения R_b , можно предположить, что для каждого состава TiN_x в зависимости от величины x будет изменяться параметр A . На втором этапе осуществляется параметрическая аппроксимация, когда осуществляется количественное обозначение параметров модели. В конечном счете, для конкретного варианта это позволяет определить значения K_{max} , W_0 и константы A .

Более эффективным техническим решением, позволяющим на стадии лазерного маркирования решать многоцелевые задачи, является модель лазерного маркирования с обеспечением минимальной разницы электропроводности базовой поверхности и растра.

Для перспективных конструкций БЭСГ, когда основные требования по форме, моментам инерции и дисбалансу ротора обеспечены, однородность электрофизических свойств поверхности ротора может иметь большое значение для повышения точности гироскопа, что обусловлено негативным влиянием неоднородности свойств поверхности на динамику ротора в электростатическом подвесе вследствие тормозящих моментов.

Для представленного выше варианта выполнения растра в виде оксидного слоя титана, разница в электрофизических свойствах весьма существенна, например, для TiN и оксида TiO_2 удельное сопротивление отличается на несколько порядков.

Вместе с тем, в системе TiN_x для соединений с различным содержанием азота, например $TiN_{0,6}$ и $TiN_{0,9}$, удельное сопротивление может отличаться всего на 10–15% [11]. При этом цветовая гамма указанных соединений отвечает условию получения требуемой контрастности растра. Для управления коэффициентом R_b и минимизации различия в электрофизических свойствах наиболее эффективно обеспечение в процессе лазерного маркирования условий протекания взаимодействия $TiN_x + N_2 = TiN_y$, где $x < y$, т.е. структурно–фазового перехода нитрида титана из одного нестехиометрического состояния в другое. Указанными условиями в данном случае являются проведение процесса лазерного

маркирования в среде избыточного давления азота.

Термодинамический расчет энергии Гиббса ΔG_T^0 для реакции $TiN_{0,6} + 0,2N_2 = TiN$ показывает, что это взаимодействие разрешено в интервале температур (298–1000)К, что говорит о принципиальной возможности использования предложенного технического решения.

Заключение

В рамках проведенных теоретико–прикладных исследований представлена последовательная формализация концептуальной модели процесса повышения точности БЭСГ, основанная на декомпозиции, как самого объекта, так и оптимизируемых переменных. Предложены методы выявления целевых функций и управляемых переменных в задачах оптимизации на различных уровнях процесса формализации. Обоснована эффективность как совместного, так и согласованного использования математических и термодинамических моделей для расширения возможностей применения ИПЛТ при формировании оптических характеристик ротора БЭСГ. Определены перспективы использования моделей, основанных на структурно–фазовых переходах в модифицируемом материале для решения многоцелевых задач повышения точности БЭСГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
2. Ландау, Б.Е. Электростатический гироскоп со сплошным ротором // Гироскопия и навигация. – 1993. – №1 – С. 6–12.
3. Юльметова О.С., Ландау Б.Е., Щербак А.Г. Системный анализ процесса создания ротора шарового гироскопа на основе использования ионно–плазменных и лазерных технологий // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12–1. – С. 163–168.
4. Дюгуров С.М., Ландау Б.Е.. Сравнительный анализ систем съема угловой информации бескарданных электростатических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 1997. – № 2(17). – С. 33–44.
5. A Scherbak, O Yulmetova. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optical read–out systems // Optics & Laser Technology. – 2018. – 101. – С. 242–247.
6. Юльметова, О.С., Щербак А.Г., Юльметова Р.Ф. Анализ химических взаимодействий при лазерном маркировании растрового рисунка на узлах гироприборов // Научно–технический вестник ИТМО. – 2011. – № 5(75). – С. 91–95.
7. Васильков, С.Д., Юльметова О.С. и др., Математическое моделирование ориентации деталей в процессе магнетронного напыления тонкопленочных покрытий на сферические поверхности// Металлообработка. – 2014. – № 1(79). – С.13–16.
8. Юрьев, Ю.Н., Михневич К.С., Кривобоков В.П., Сиделёв Д.В., Киселева Д.В., Новиков В.А. Свойства пленок нитрида титана, полученных методом магнетронного распыления // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – №4–3. – С.672–676
9. Рябухин, А.Г. Расчет энтропии кристаллических оксидов титана // Вестник ЮУрГУ, сер. «Металлургия». – 2006. – № 10. – С. 3–6.
10. Щербак, А.Г., Юльметова О. С., Вейко В. П. и др. Управление контрастностью растрового рисунка при лазерной маркировке: моделирование технологического процесса// Изв. вузов. Приборостроение. –2015. – № 6(58). – С. 485–491
11. Пат. 2189998 Российская Федерация, МПК C08L 79/08, C08K 3/10, C09D 5/24. Электропроводящая композиция/ Перов Э.И., Вагин В.В., Ишков А.В., Шуваева И.Г.; заявитель и патентообладатель Алтайский государственный университет. – № 2000106217/04.; заявл. 13.03.2000; опубл. 10.05.2002 Бюл. № 13. – 10 с.

Юльметова Ольга Сергеевна

НИУ ИТМО, г. Санкт–Петербург

197101, г. Санкт–Петербург, Кронверкский пр., д. 49

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник

АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", г. Санкт–Петербург

Тел.: 89117287732

E–mail: olga@yulmetova.ru

O.S. YULMETOVA

FORMALIZATION OF THE CONCEPTUAL MODEL FOR THE PROCESS OF INCREASING THE ACCURACY OF THE ELECTROSTATIC GYROSCOPE

Abstract. *The article describes principles of the formalization of the conceptual model for increasing the accuracy of electrostatic gyroscope. The sequence of determination of objective functions and parameters of optimization with the formation of models based on the use of ion-plasma and laser technologies (IPLT) is presented. The sequence is formed by means of decomposition of the gyroscope to nodes and functional elements with the identification of evaluation criteria and accuracy indicators at each level. Technological aspects for use of IPLT during creation of functional elements are determined. It was revealed that technological formation of each element is connected with the change of the geometry or properties of material and can be described by structural-phase transformations of the modified surface layer of the material. The set and methods for calculation of chemical interactions providing structure-phase transformations are presented. The effectiveness of the integrated use of IPLT models for solving multi-purpose problems associated with the formation of optical parameters of the rotor and minimizing the difference in its electrophysical properties was shown.*

Keywords: *gyroscope, rotor, system modeling, objective function, optimized parameters, raster image, optical characteristics, ion-plasma and laser technologies.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sovetov B. Ya. Modelirovanie sistem: ucheb. dlya vyzov / B. Ya. Sovetov, S.A. Yakovlev. – M.: Visch. shk., 2001. – 343 s.
2. Landay B.E. Electrostatichesky giroscop so sploshnim rotorom // Giroscopiya i navigatsiya. – 1993. – №1 – S. 6–12.
3. Yulmetova O. S., Landay B. E., Scherbak A.G. Sistemnyy analiz processa sozdaniya rotora sharovogo giroscopa na osnove ispolzovaniya ionno-plasmennih i lasernih technology. // Fundamentalnie issledovaniya. – 2017. – № 12–1. – S. 163–168.
4. Dyugurov S.M. Landay B. E. Sravnitelnyy analiz sistem sema yglovoi informatsii bescardannih electrostaticheskikh giroscopov // Giroscopiya i navigatsiya. – 1997. – № 2(17). – S. 33–44.
5. A Scherbak, O Yulmetova. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optical read-out systems // Optics & Laser Technology. – 2018. – 101. – S. 242–247.
6. Yulmetova O. S., Scherbak A.G., Yulmetova R. F. Analis himicheskikh vsaimodeistvii pri lasernom markirovanii rastrovogo risunka na uzlah giropriborov // Nauchno-Technicheskii vestnik ITMO. – 2011. – № 5(75). – S. 91–95.
7. Vasilkov S. D., Yulmetova O. S. i dr. matematicheskoe modelirovanie orientatsii detalej v protsesse magnetronnogo napileniya tonkoplennoknih pokritij na sfericheskie poverhnosti. // Metalloobrabotka. – 2014. – № 1(79). – S.13–16.
8. Yurev Yu. N., Michnevich K.S. i dr. Svoistva plenok nitrida titana, polychennih metodom magnetronnogo raspileniya // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2014. – №4–3. – S.672–676
9. Ryabuhin A. G. Raschet entropii kristallicheskih oksidov titana // Vestnik YuUrGU, ser. «Mettalurgiya». – 2006. – № 10. – S. 3–6.
10. Scherbak A.G., Yulmetova O. S., Veiko V.P. i dr. Upravlenie kontrastnostyu rastrovogo risunka pri lasernoi markirovke: modelirovanie technologicheskogo protsesssa. // Izv. vuzov Priborostroenie. – 2015. – № 6(58). – S. 485–491.
11. Pat. 2189998 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C08L 79/08, C08K 3/10, C09D 5/24. Electroprovodyashaya kompozitsiya / Perov E. I., Vagin V. V., Ishkov A. V., Shuvaeva I. G.; zayavitel i patentoobladatel Altaisky gosudarstvennyy universitet. – № 2000106217/04; zayavl. 13.03.2000; opubl. 10.05.2002. Byul. № 13. – 10 s.

Yulmetova Olga Sergeevna

NIIT ITMO, St. Petersburg

197101, St. Petersburg, Kronverksky Prospect, 49

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

JSC Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg

Tel: 89117287732

E-mail: olga@yulmetova.ru

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 629.7.018

Е.С. ЕФРЕМОВА

ИМИТАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ И КОНТРОЛЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ САМОЛЁТА

Аннотация. Рассматривается задача имитации параметров движения самолета относительно окружающей воздушной среды, особенности построения, алгоритмы формирования выходных сигналов и варианты реализации имитатора воздушных сигналов самолета для контроля функционирования и наземной отработки комплексов бортового оборудования на этапе производства.

Ключевые слова: самолет, комплексы бортового оборудования, контроль функционирования, воздушные сигналы, имитация, вихревая система, алгоритмы, функциональная схема имитатора.

Введение.

В состав комплексов бортового оборудования самолетов и других объектов авиационной техники входят системы измерения высотно-скоростных параметров, определяющих их движение относительно окружающей воздушной среды и получивших название воздушных сигналов [1, 2]. Поэтому на этапе производства при наземной отработке и контроле функционирования комплексов бортового оборудования самолетов возникает необходимость имитации реальных режимов полета по воздушным сигналам [3, 4].

При имитации воздушных сигналов самолета необходимо обеспечивать синхронное формирование выходных сигналов по барометрической высоте H , истинной воздушной скорости V_B , числу Маха M , приборной скорости $V_{пр}$, истинному углу атаки α , температуре наружного воздуха T_H , плотности окружающей среды ρ_H на высоте полета H . Для формирования указанных воздушных сигналов по традиционным алгоритмам [5, 6] имитатор должен включать задатчики большого числа входных информативных сигналов реальной бортовой системы воздушных сигналов: полное P_H и статическое $P_{ст}$ давления на заданной высоте полета H , температура T_T заторможенного набегающего воздушного потока, местные углы атаки α_M на правом и левом бортах фюзеляжа, угол скольжения β .

При этом имитатор системы воздушных сигналов самолета должен обеспечивать выдачу цифровых (кодовых) или при необходимости и аналоговых сигналов, пропорциональных барометрической высоте, истинной воздушной скорости, температуре наружного воздуха, числу Маха, приборной скорости, истинному углу атаки и другим воздушным сигналам на характерных этапах и режимах полета самолета с техническими и метрологическими характеристиками, близкими к характеристикам имитируемых бортовых систем воздушных сигналов.

Все это затрудняет создание полномасштабного имитатора бортовых систем воздушных сигналов, усложняет его конструктивную схему, повышает стоимость изготовления и эксплуатации.

Основная часть.

Ниже раскрывается возможность создания сравнительно простого унифицированного имитатора выходных сигналов системы воздушных сигналов самолета для наземной отработки и контроля функционирования комплексов бортового оборудования, построенного на основе разработанной в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н. Туполева-КАИ оригинальной вихревой системы воздушных сигналов самолета [7, 8].

На рисунке 1 приведена схема, определяющая функциональные и конструктивные

особенности вихревой системы воздушных сигналов самолета.

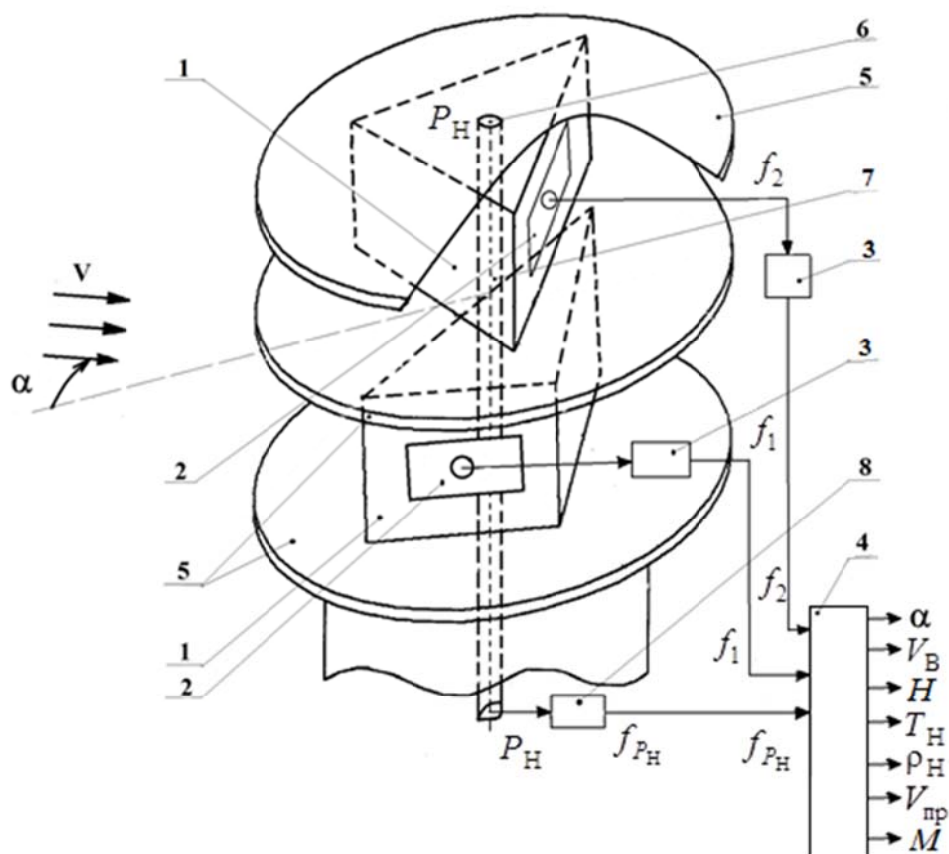


Рисунок 1 – Конструктивно-функциональная схема вихревой системы воздушных сигналов

Основным конструктивным элементом рассматриваемой системы воздушных сигналов является вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, который содержит два клиновидных тела 1, расположенных ортогонально друг к другу и своими основаниями встречно набегающему воздушному потоку, вектор скорости V которого равен по величине и обратный по знаку вектору V_B истинной воздушной скорости самолета, т.е. $V = -V_B$. На тыльных поверхностях клиновидных тел расположены приемники 2 пульсаций давлений, выходы которых подключены к устройствам 3 регистрации частот f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами. Выходы устройств 3 регистрации частот вихреобразования подключены ко входу устройства обработки 4.

При работе в бортовых условиях вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости устанавливается на самолете таким образом, чтобы общая ось клиновидных тел 1 была перпендикулярна плоскости изменения измеряемого аэродинамического угла α , а рабочие сечения клиновидных тел, с ортогонально расположенными основаниями, находились в плоскости изменения контролируемого аэродинамического угла α .

При изменении аэродинамического угла α клиновидные тела 1 будут находится к направлению вектора скорости V набегающего воздушного потока под разными углами $\varphi_1 = \varphi_0 + \alpha$ и $\varphi_2 = \varphi_0 - \alpha$, где $2\varphi_0$ – угол установки оснований клиновидных тел, что приводит к изменению частот f_1 и f_2 вихреобразования за телами.

Приемники, расположенные за клиновидными телами, воспринимают пульсации давлений на тыльных поверхностях клиновидных тел, которые регистрируются пневмозлектрическими преобразователями 2, установленными внутри клиновидных тел 1. Выходные сигналы пневмозлектрических преобразователей 2 поступают на входы устройств

регистрации частот 3, которые измеряют частоты f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами 1.

Частоты f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами с характерным размером l , основания которых расположены ортогонально друг к другу под углом $2\varphi_0 = 90^\circ$, будут определяться соотношениями вида [9]:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin(\varphi_0 + \alpha)} = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin \varphi_0 \cos \alpha + \cos \varphi_0 \sin \alpha} = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\cos \alpha + \sin \alpha}; \\ f_2 &= \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin(\varphi_0 - \alpha)} = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin \varphi_0 \cos \alpha - \cos \varphi_0 \sin \alpha} = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\cos \alpha - \sin \alpha}. \end{aligned} \quad (1)$$

Измеренные частоты f_1 и f_2 поступают на вход устройства обработки 4, выполненного в виде вычислителя, на выходе которого формируются значения аэродинамического угла α и истинной воздушной скорости V_B в соответствии с уравнениями [7, 8]

$$\alpha = \arctg \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2}; \quad V_B = \frac{l}{\sqrt{2}Sh} \frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}, \quad (2)$$

где f_1 и f_2 – частоты вихреобразования за клиновидными телами;

Sh – число Струхала;

α и V_B – измеряемый аэродинамический угол и истинная воздушная скорость.

При конструктивной реализации вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости клиновидные тела располагаются на одной оси друг над другом. С целью обеспечения измерения в трехмерном набегающем потоке и устранения влияния другого аэродинамического угла β самолета, перпендикулярно общей оси клиновидных тел установлены струевыпрямители, выполненные в виде тонких дисков 5, расположенных на верхних и нижних основаниях обоих клиновидных тел 1 и выделяющих в набегающем воздушном потоке зоны вихреобразования клиновидных тел. Это снижает влияние скоса набегающего потока в плоскости, перпендикулярной плоскости измерения, а, следовательно, уменьшает погрешности, обусловленные этим скосом потока.

Для расширения функциональных возможностей вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости и обеспечения измерения других высотно–скоростных параметров – барометрической высоты H , температуры T_H наружного воздуха на высоте полета H , плотности воздуха ρ_H на высоте H , приборной скорости $V_{пр}$, числе Маха M и других связанных с ними параметров, на верхней или нижней поверхности одного струевыпрямителя 5, например, верхнего, установлен отверстие–приемник 6 статического давления P_H набегающего воздушного потока, который через пневмопровод 7 связан со входом пневмоэлектрического преобразователя (датчика) 8 абсолютного давления преимущественно с частотным выходным сигналом. Выход пневмоэлектрического преобразователя (датчика) 9 в виде частоты f_{P_H} , пропорциональной статическому давлению P_H набегающего воздушного потока, подключен ко входу устройства обработки 4. Устройство обработки 4 выполнено в виде вычислителя, реализующего предложенные [9] алгоритмы определения всех высотно–скоростных параметров движения самолета относительно окружающей воздушной среды, в том числе:

1. По воспринимаемому статическому давлению P_H набегающего воздушного потока в соответствии со стандартными зависимостями, соответствующими ГОСТ 4401–81 [10], абсолютная высота полета в диапазоне $[-200 \text{ м} < H < 11000 \text{ м}]$ определяется по формуле

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right], \quad (3)$$

где $T_0 = 288,15 \text{ К}$ и $P_0 = 101325 \text{ Па}$ – абсолютная температура и давление на высоте $H=0$;

$\tau=0,0065$ К – температурный градиент;

$R=29,27125$ м/К – газовая постоянная.

2. Используя ГОСТ 5212–74 [11], истинную воздушную скорость V_B , измеренную вихревым датчиком, можно представить в виде

$$V_B = \sqrt{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_{\Pi}}{P_H} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right]} = \sqrt{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_{\text{дин}}}{P_H} + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (4)$$

где $g = 9,80665$ м/с² – ускорение силы тяжести;

$P_{\Pi} = P_H + P_{\text{дин}}$ – полное давление набегающего воздушного потока;

$P_{\text{дин}} = \frac{\rho_H V_B^2}{2}$ – динамическое давление (скоростной напор) набегающего воздушного потока;

$k=1,4$ – показатель адиабаты воздуха.

3. Плотность воздуха ρ_H на высоте H можно представить как [12]

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_H}{P_0 T_0}, \quad (5)$$

где $\rho_0 = 1,225$ кг/м³ = $0,125$ кг/с²/м⁴ – массовая плотность воздуха на высоте $H=0$.

4. Подставив в выражение (4) значения параметров V_B и P_H , измеряемых вихревым датчиком, получим соотношение вида

$$T_H = \frac{V_B^2}{2gR \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(1 + \frac{\rho_0}{2P_0 T_0} T_H V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (6)$$

которое устанавливает неявную, но однозначную связь измеряемой вихревым датчиком истинной воздушной скорости V_B с абсолютной температурой T_H на высоте H .

5. Определяя из соотношения (6) абсолютную температуру T_H , по зависимости (5) можно определить плотность воздуха ρ_H на высоте H .

6. В соответствии с ГОСТ 5212–74 [11] можно определить (вычислить) приборную скорость полета, т.е. истинную воздушную скорость V_B , приведенную к нормальным условиям на уровне $H=0$, по формуле

$$V_{\text{ип}} = \sqrt{2gRT_0 \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(1 + \frac{\rho_0}{2P_0} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (7)$$

7. Число Маха M , характеризующее отношение истинной воздушной скорости V_B к скорости звука $a_H = \sqrt{kgRT_H}$ на высоте H , для дозвуковых скоростей полета будет определяться уравнением

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_H}{2P_0 T_0} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (8)$$

Таким образом, воспринимая и измеряя частоты f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами и абсолютное статическое давление P_H набегающего воздушного потока, по зависимостям (2) – (8) в вычислителе 4 определяются все высотно–скоростные параметры полета – воздушные сигналы самолета, существенно расширяя функциональные возможности вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

По сравнению с известными системами воздушных сигналов вихревая система воздушных сигналов имеет ряд существенных преимуществ:

- Обеспечивает одновременное измерение всех высотно–скоростных параметров, определяющих движение самолета относительно окружающей воздушной среды.
- Измерение всех высотно–скоростных параметров движения самолета осуществляется с помощью одного неподвижного многофункционального малогабаритного приемника потока, практически не искажающего аэродинамику самолета и не влияющего на его аэродинамические характеристики.
- Измерение всех высотно–скоростных параметров обеспечивается без существенного усложнения конструктивной схемы вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, а следовательно повышения себестоимости его производства.
- Использование в качестве первичной информации частотно–временных информативных сигналов позволяет снизить погрешности, обусловленные дрейфом нуля и изменением чувствительности элементов измерительной цепи восприятия, преобразования, передачи и обработки информации.
- Получение выходных сигналов по всем высотно–скоростным параметрам самолета в непосредственно цифровой форме упрощает их использование в современных системах отображения информации, системах управления и других технических системах, в том числе в имитаторе.

Указанные достоинства вихревой системы воздушных сигналов определяют перспективы построения на ее основе имитатора системы воздушных сигналов самолета для наземной отработки и контроля функционирования комплексов бортового оборудования.

При построении имитатора на основе вихревой системы воздушных сигналов самолета возможны два варианта.

Для реализации *первого варианта* необходима аэродинамическая труба или эталонная аэродинамическая установка, имитирующие воздушный поток, набегающий на многофункциональный приемник вихревой системы воздушных сигналов. При установке многофункционального приемника в рабочее поле аэродинамической трубы или эталонной аэродинамической установки и задании нормированной скорости воздушного потока на выходе вихревой системы воздушных сигналов будут заданы нормированные значения высотно–скоростных параметров полета самолета, соответствующих барометрической высоте полета, близкой к нулевой высоте. Сформированные вихревой системой воздушных сигналов нормированные значения высотно–скоростных параметров используются при контроле работоспособности бортовых систем самолета при стендовых испытаниях.

Достоинством данного варианта построения имитатора является близость процесса формирования имитируемых высотно–скоростных параметров к реальному процессу работы бортовых систем воздушных сигналов.

К недостаткам данного варианта имитатора можно отнести невозможность имитировать изменения барометрической высоты и необходимость использования сертифицированной аэродинамической трубы или эталонной аэродинамической установки.

При реализации *второго варианта* имитатора системы воздушных сигналов самолета изготавливается экспериментальный образец вихревой системы воздушных сигналов самолета. Проводятся тарировочные испытания каналов аэродинамического угла и истинной воздушной скорости в сертифицированной аэродинамической трубе и определяются зависимости частот вихреобразования f_1 и f_2 от различных (заданных) значений скорости V набегающего воздушного потока и аэродинамического угла α , которые затем используются для имитации бортовой системы воздушных сигналов.

На рисунке 2 приведена схема, раскрывающая функциональный состав такого имитатора системы воздушных сигналов самолета.

Рассматриваемый имитатор системы воздушных сигналов самолета в своем составе

содержит:

- Экспериментальный образец вихревой системы воздушных сигналов с технологическим выходом штуцера для восприятия статического давления окружающей среды и технологическими входами схем регистрации частот вихреобразования f_1 и f_2 генераторов вихрей.

- Генераторы ГС1 и ГС2 прямоугольных или синусоидальных сигналов, имитирующих электрические сигналы с частотами вихреобразования f_1 и f_2 генераторов вихрей в диапазоне реальных частот вихреобразования.

- Задатчик абсолютного давления (ЗАД), имитирующий изменение статического давления на заданной высоте полета.

- Устройство преобразования аналоговых сигналов и сопряжения с PS-совместимыми персональным компьютером (УПАС и С).

- Промышленный ноутбук для обработки первичной информации по заданным алгоритмам и формирования выходных сигналов имитатора по высотно-скоростным параметрам самолета.

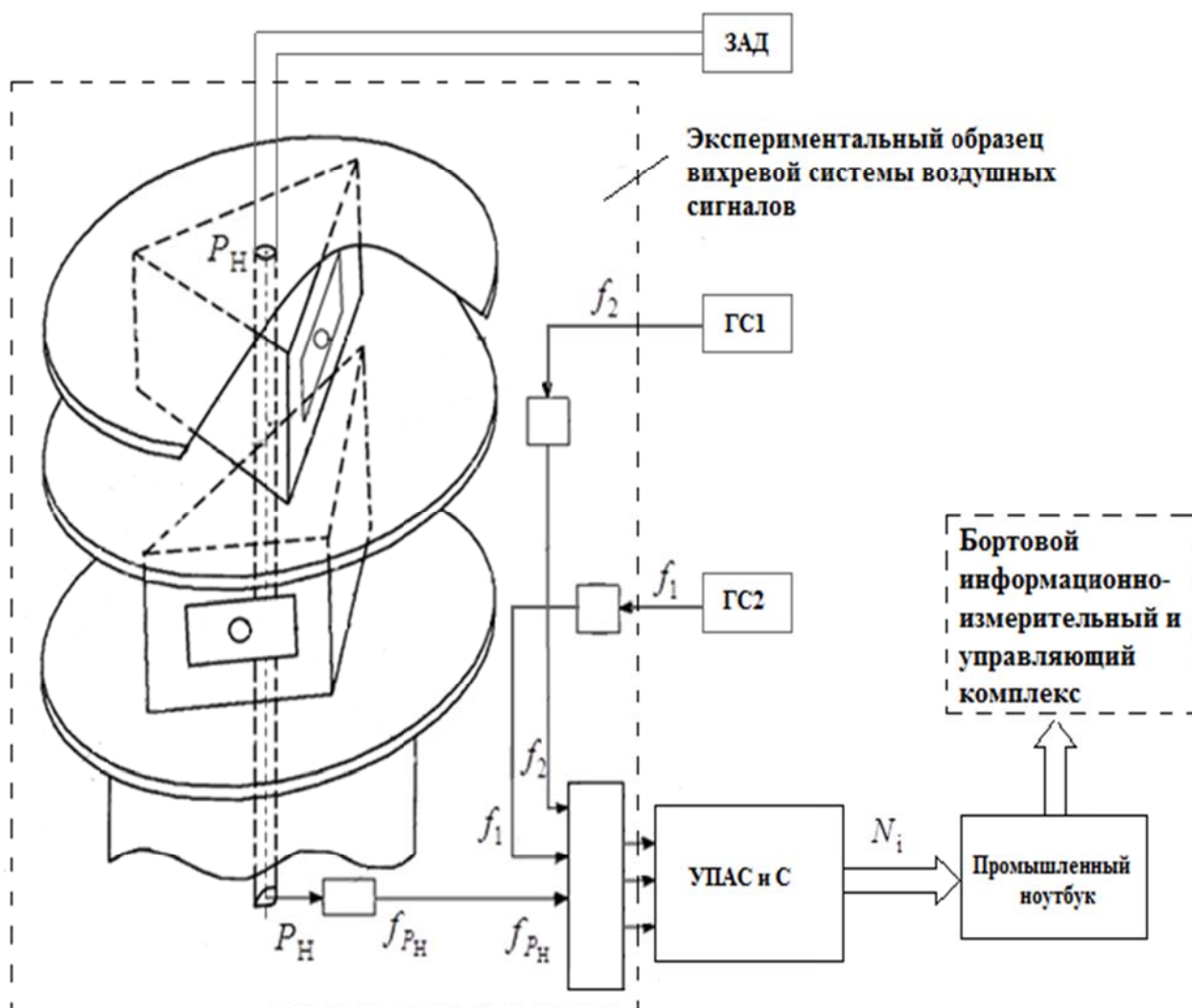


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема имитатора системы воздушных сигналов самолета

Используя полученные экспериментально зависимости частот вихреобразования f_1 и f_2 от скорости V и угла α , с помощью генераторов ГС1 и ГС2 можно задавать определенные значения частот f_1 и f_2 и имитировать заданные значения скорости воздушного потока V и аэродинамического угла α .

Задаваемые от двух эталонных генераторов импульсных или гармонических сигналов ГС1 и ГС2 значения частот вихреобразования f_1 и f_2 подаются на входы схем регистрации частот вихреобразования экспериментального образца вихревой системы воздушных сигналов и на выходе вычислителя в соответствии с уравнением (2) формируются имитируемые значения аэродинамического угла α и истинной скорости V_B .

Для имитации барометрической высоты полета с помощью эталонного задатчика абсолютного давления (ЗАД), выполненного в виде автономной контрольно-поверочной аппаратуры (КПА) задается статическое давление P_H на заданной высоте полета H . К штуцеру, установленному на поверхности верхнего экранирующего диска вихревого датчика с помощью пневмопровода подключается выход задатчика абсолютного давления. При заданном значении давления P_H , используя вычисленные значения аэродинамического угла α и истинной воздушной скорости, по зависимостям (3) – (8) в вычислителе вихревой системы воздушных сигналов определяются все другие имитируемые высотно-скоростные параметры полета самолета. Выходные сигналы вычислителя через устройство УПАС и С поступают на промышленный ноутбук, который осуществляет их индикацию и передачу в бортовой информационно-измерительный и управляющий комплекс.

Таким образом, на выходе имитатора системы воздушных сигналов формируются коды всех имитируемых высотно-скоростных параметров полета самолета, которые используются при наземной отработке и контроле функционирования бортового информационно-измерительного и управляющего комплекса самолета. При этом по сравнению с первым вариантом не требуется сертифицированная аэродинамическая труба или эталонная аэродинамическая установка, это определяет предпочтительность использования данного варианта имитатора системы воздушных сигналов для наземной отработки комплексов бортового оборудования самолетов различного класса и назначения.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию Минобрнауки России № 2014/55 (НИР № 990).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового арготического комплекса: Теория, проектирование, применение / Под ред. доктора техн. наук В.М. Солдаткина. – М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет, 2009. – 760 с.
2. Ефанов В.Н., Токарев В.П. Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы. – М.: Машиностроение, 2010. – 783 с.
3. Контроль функционирования больших систем / Г.П. Шибанов, В.А. Артеменко, В.А. Метешкин, Н.И. Циклинский; под ред. Г.П. Шибанова. – М.: Машиностроение, 1977. – 356с.
4. Майоров А.В., Мусин С.М., Янковский Б.Ф. Выявление причин отказов авиационного оборудования: Справочник. – М.: Транспорт, 1996. – 286 с.
5. Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Д.С. Авиационные приборы и автоматы. – М.: Машиностроение, 1970. – 432 с.
6. Авиационные приборы и измерительные системы / Под ред. В.Г. Воробьева. – М.: Транспорт, 1981. – 391с.
7. Патент РФ на изобретение №2506596, МПК G01P 5/00. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С. Заявл. 16.07.2012. Заявка №2012130111/28. Оpubл. 10.02.2014. – Бюл. №4.
8. Патент РФ на изобретение №2556760, МПК G01P 5/00. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С. Заявл. 21.04.2014. Заявка №2014116035/28. Оpubл. 20.07.2015. – Бюл. №20.
9. Солдаткина Е.С., Солдаткин В.М. Вихревая система воздушных сигналов звукового летательного аппарата // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2014. – №3. – С.110–116.
10. ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во Стандартов, 1981. – 179 с.
11. ГОСТ 5212–74. Таблицы аэродинамическая. Динамические давления и температуры торможения воздуха для скорости полета от 10 до 4000 км/ч. Параметры. – М.: Изд-во Стандартов, 1974. – 239 с.
12. Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 249 с.

Ефремова Елена Сергеевна

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ

Ассистент кафедры «Приборы и информационно–измерительные системы» (ПИИС)

Домашний адрес: 420102, г. Казань, ул. Серова, д.22/24 – 155

Телефон: +7–927–035–11–61

E–mail: w–soldatkin@mail.ru

E.S. EFREMOVA

SIMULATING OF AIR DATA SIGNALS DURING GROUND TESTING AND CONTROLLING FUNCTION OF AVIONICS ONBOARD SYSTEMS OF AIRPLANE

Abstract. *The problem of simulating the motion parameters of airplane relative to the surrounding air environment, features of construction, the algorithms for generating output signals and implementation versions of the simulator of air data signals from airplane to control the functioning and ground testing of avionics onboard systems at the production stage are considered.*

Keywords: *airplane, avionics systems, control of functioning, air data signals, simulation, vortex system, algorithms, functional diagram of the simulator.*

BIBLIOGRAPHY

1. Makarov N.N. Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo argoticheskogo kompleksa: Teoriya, proyektirovaniye, primeneniye / Pod red. doktora tekhn. nauk V.M. Soldatkina. – M.: Mashinostroyeniye / Mashinostroyeniye – Polet, 2009. – 760 s.
2. Yefanov V.N., Tokarev V.P. Aviatsionnyye pribory i izmeritelno–vychislitelnyye komplekсы. – M.: Mashinostroyeniye, 2010. – 783 s.
3. Kontrol funktsionirovaniya bolshikh sistem / G.P. Shibanov, V.A. Artemenko, V.A. Meteshkin, N.I. Tsiklinskiy; pod red. G.P. Shibanova. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 356s.
4. Mayorov A.V., Musin S.M., Yankovskiy B.F. Vyyavleniye prichin otkazov aviatsionnogo oborudovaniya: Spravochnik. – M.: Transport, 1996. – 286 s.
5. Braslavskiy D.A., Logunov S.S., Pelpor D.S. Aviatsionnyye pribory i avtomaty. – M.: Mashinostroyeniye, 1970. – 432 s.
6. Aviatsionnyye pribory i izmeritelnyye sistemy / Pod red. V.G. Vorobyeva. – M.: Transport, 1981. – 391s.
7. Patent RF na izobreteniyе №2506596, MPK G01P 5/00. Vikhrevoy datchik aerodinamicheskogo ugla i istinnoy vozduшной skorosti / Soldatkin V.M., Soldatkina Ye.S. Zayavl. 16.07.2012. Zayavka №2012130111/28. Opubl. 10.02.2014. – Byul. №4.
8. Patent RF na izobreteniyе №2556760, MPK G01P 5/00. Vikhrevoy datchik aerodinamicheskogo ugla i istinnoy vozduшной skorosti / Soldatkin V.M., Soldatkina Ye.S. Zayavl. 21.04.2014. Zayavka №2014116035/28. Opubl. 20.07.2015. – Byul. №20.
9. Soldatkina Ye.S., Soldatkin V.M. Vikhrevaya sistema vozduшnykh signalov dozvukovogo letatel'nogo apparata // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii, 2014. – №3. – S.110–116.
10. GOST 4401–81. Atmosfera standartnaya. Parametry. – M.: Izd–vo Standartov, 1981. – 179 s.
11. GOST 5212–74. Tablitsy aerodinamicheskaya. Dinamicheskiye davleniya i temperatury tormozheniya vozdukhа dlya skorosti poleta ot 10 do 4000 km/ch. Parametry. – M.: Izd–vo Standartov, 1974. – 239 s.
12. Zalmanzon L.A. Protochnyye elementy pnevmaticheskikh priborov kontrolya i upravleniya. – M.: Izd–vo AN SSSR, 1961. – 249 s.

Efremova Elena Sergeevna

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev–KAI

Assistant of department “Devices and information–measurement systems” (DIMS)

Serova str., 22/24 – 155, Kazan, 420102

Ph.number +7–927–035–11–61

E–mail: w–soldatkin@mail.ru

УДК 629.735.45: 551.53

О.И. КУЗНЕЦОВ, В.М. СОЛДАТКИН

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕРТОЛЕТА

Аннотация. *Раскрывается задача контроля и предупреждения опасных эксплуатационных режимов вертолета, критерии эффективности контроля. Используя вероятности пропуска опасной ситуации и ложного срабатывания, при допущении о нормальном законе распределения погрешностей получены соотношения для допустимых среднеквадратических погрешностей измерения контролируемых параметров характерных критических режимов полета вертолета, для алгоритмов канала предупреждения.*

Ключевые слова: *вертолет, опасные режимы эксплуатации, автоматизированная система контроля, контролируемые параметры, допустимые погрешности, анализ, каналы измерения и предупреждения.*

Введение.

Широкое использование гражданских и военных вертолетов обуславливает важность задачи обеспечения безопасной эксплуатации на всех этапах и режимах полета.

Полеты вертолетов происходят в приземном возмущенном слое атмосферы и для обеспечения безопасности в условиях реальной эксплуатации необходимо использовать автоматизированные системы контроля и предотвращения опасных режимов полета, связанных с явлением «подхвата», режимом «вихревое кольцо», самопроизвольное левое вращение и др. [1, 2].

Основная часть.

Особенности аэродинамической компоновки и динамики полета вертолета обуславливают значительное число летных и эксплуатационных ограничений, накладываемых Руководством по летной эксплуатации данного класса вертолета, связанных с ограничениями по прочности конструкции, на коэффициент режима работы и несущую способность несущего винта, на число Маха наступающей лопасти, на параметры маневрирования в вертикальной плоскости [3, 4].

Для обнаружения попадания в опасные нештатные ситуации, предупреждения экипажа и предотвращение критических режимов полета вертолета на его борту должны устанавливаться средства автоматизированного контроля и предупреждения опасных режимов, которые осуществляют контроль текущих значений характерных параметров движения вертолета, формирование их допустимых значений с учетом эксплуатационных и летных ограничений и метеорологических условий, обнаружение нештатных ситуаций, выдачу своевременных предупреждающих сигналов и управляющих «команд-подсказок» экипажу и в систему автоматического управления по выводу вертолета из возникающей опасной ситуации и обеспечение регламентированного Авиационными правилами уровня безопасности полета, т.е. выполнять функции информационно-управляющей системы предотвращения критических режимов вертолета (ИУСПКР) [4, 5].

Несмотря на отдельные особенности ИУСПКР вертолета представляет собой систему автоматизированного контроля. Поэтому для оценки эффективности каналов ИУСПКР вертолета можно применять критерии, принятые в практике исследования систем автоматизированного контроля – вероятность $P_{пр}$ пропуска опасной ситуации и вероятность $P_{лс}$ ложного срабатывания системы [6].

Причиной возникновения особой ситуации в процессе полета является изменение характерного для данного режима полета параметра x_i движения вертолета, определяющего уровень его безопасности. В процессе полета фактическое значение $x_{\phi i}$ параметра x_i в полете может отличаться от номинального значения $x_{ном i}$, в качестве которого можно принять математическое ожидание характерного параметра x_i на данном режима полета. Из-за погрешности Δx_i канала определения (вычисления) параметра x_i с учетом других параметров

движения вертолета полученное (вычисленное) значение $x_{измi}$ характерного параметра x_i может отличаться от номинального значения $x_{номi}$.

Тогда вероятность $P_{пр}^{x_i}$ пропуска опасной ситуации по характерному параметру x_i представляет собой вероятность выхода фактического значения $x_{фi}$ контролируемого характерного параметра x_i на границу $x_{предi}$ регламентированного РЛЭ вертолета предельного значения характерного параметра x_i , соответствующему возникновению аварийной ситуации, в то время как вычисленное значение $x_{измi}$ не превышает порогового значения $x_{пi}$, при котором срабатывает предупреждающая сигнализация, т.е. [7]

$$P_{пр}^{x_i} = P\{x_{предi} < x_{фi} < \infty, -\infty < x_{измi} < x_{пi}\} =$$

$$= \int_{x_{предi} - x_{пi}}^{\infty} d\Delta x_{номi} \int_{-\infty}^{x_{пi} - x_{номi} - \Delta x_i} W_1(\Delta x_{номi}) W_2(\Delta x_i) d\Delta x_i, \quad (1)$$

где $\Delta x_{номi} = x_{фi} - x_{номi}$ – отклонение фактического значения $x_{фi}$ характерного параметра x_i на данном режиме полета от его номинального значения $x_{номi}$;

Δx_i – погрешность канала определения характерного параметра x_i ; $W_1(\Delta x_{номi})$ и $W_2(\Delta x_i)$ – плотности распределения вероятностей $\Delta x_{номi}$ и Δx_i .

Для оценки правильности принятия решения по обнаружению аварийной ситуации по характерному параметру полета x_i используется понятие вероятности $P_{лс}^{x_i}$ ложного срабатывания системы предупреждения критических режимов, как вероятность выхода измеренного значения $x_{измi}$ контролируемого параметра x_i за пределы $x_{предi}$, в то время, как фактическое значение $x_{фi}$ находится в пределах допустимого значения, меньшего порогового значения $x_{пi}$, т.е. [7]

$$P_{лс}^{x_i} = P\{-\infty < x_{фi} < x_{предi}, x_{пi} < x_{измi} < \infty\} =$$

$$= \int_{-\infty}^{x_{предi} - x_{пi}} d\Delta x_{номi} \int_{x_{пi} - x_{фi} - \Delta x_i}^{\infty} W_1(\Delta x_{номi}) W_2(\Delta x_i) d\Delta x_i. \quad (2)$$

Возникшая опасная ситуация рассматривается как произведение двух событий: события, заключающегося в том, что при выходе фактического значения $x_{фi}$ контролируемого параметра x_i в опасную область имеет место аварийная ситуация и событие пропуска опасной ситуации с вероятностью $P_{пр}^{x_i}$. При этом вероятность возникновения аварийной ситуации однозначно определяется значением вероятности пропуска опасной ситуации $P_{пр}^{x_i}$, обусловленной изменением характерного параметра x_i .

Как видно из выражений (1) и (2), для оценки эффективности работы каналов ИУСПКР вертолета необходимо знание законов распределения случайных величин $\Delta x_{номi}$ и Δx_i , что возможно лишь для систем, находящихся в эксплуатации после набора достаточной статистики.

На этапе проектирования и разработки систем предупреждения и предотвращения критических режимов полета вертолета в качестве предварительного критерия оценки эффективности каналов системы предлагается использовать условную вероятность пропуска опасной ситуации $P_{пр}^{усx_i}$ и условную вероятность ложного срабатывания $P_{лс}^{усx_i}$ по характерному параметру x_i вида [7]

$$P_{пр}^{усx_i} = \int_{-\infty}^{x_{предi} - x_{пi}} W_2(\Delta x) d\Delta x; \quad P_{лс}^{усx_i} = \int_{x_{пi} - x_{пi}}^{\infty} W_2(\Delta x) d\Delta x. \quad (3)$$

В этом случае для оценки эффективности каналов ИУСПКР не требуется знания

закона распределения фактических значений $x_{\text{фi}}$ характерного параметра x_i на данном режиме полета вертолета, а лишь на этапе проектирования должна быть принята правдоподобная гипотеза о законе распределения погрешности Δx_i определения характерного параметра x_i , например, гипотеза о нормальном законе распределении погрешности.

Для нормального закона распределения случайной погрешности определения характерного параметра x_i плотность распределения вероятностей $W_2(\Delta x_i)$ принимает вид [7]

$$W_2(\Delta x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta x_i}} e^{-\frac{\Delta x_i^2}{2\sigma_{\Delta x_i}^2}},$$

где $\sigma_{\Delta x_i}$ – среднее квадратическое значение случайной погрешности Δx_i канала определения характерного параметра x_i полета вертолета.

Тогда условные вероятности $P_{\text{пр}}^{\text{ус}x_i}$ и $P_{\text{лс}}^{\text{ус}x_i}$ пропуска опасной ситуации и ложного срабатывания системы предупреждения критических режимов полета вертолета по параметру x_i будут равны

$$P_{\text{пр}}^{\text{ус}x_i} = \int_{-\infty}^{x_{\text{пред}i} - x_{\text{н}i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta x_i}} e^{-\frac{\Delta x_i^2}{2\sigma_{\Delta x_i}^2}} d\Delta x_i = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{x_{\text{пред}i} - x_{\text{н}i}}{\sigma_{\Delta x_i}}\right) - \Phi\left(\frac{-\infty}{\sigma_{\Delta x_i}}\right) \right] = \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_{\text{пред}i} - x_{\text{н}i}}{\sigma_{\Delta x_i}}\right); \quad (4)$$

$$P_{\text{лс}}^{\text{ус}x_i} = \int_{x_{\text{н}i} - x_{\text{п}i}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta x_i}} e^{-\frac{\Delta x_i^2}{2\sigma_{\Delta x_i}^2}} d\Delta x_i = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{\infty}{\sigma_{\Delta x_i}}\right) - \Phi\left(\frac{x_{\text{п}i} - x_{\text{н}i}}{\sigma_{\Delta x_i}}\right) \right] = \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_{\text{п}i} - x_{\text{н}i}}{\sigma_{\Delta x_i}}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(\)$ – табулированная функция Лапласа $\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$;

t – значение в скобках функции $\Phi(\)$ в выражениях (4) и (5); $z = k\sigma_{\Delta x_i}$;

k – число, связывающее предельное значение $\Delta x_{\text{пред}i}$ случайной погрешности определения характерного параметра x_i с допустимым среднеквадратическим значением погрешности равным для нормального закона распределения погрешности $\sigma_{\Delta x_{i\text{дон}}} = \frac{1}{3} \Delta x_{\text{пред}i}$.

Таким образом, используя заданные в техническом задании на разработку информационно–управляющей системы предотвращения критических режимов вертолета допустимые значения вероятностей пропуска опасной ситуации $P_{\text{пр}} \approx P_{\text{пр}}^{\text{ус}}$ и ложного срабатывания $P_{\text{лс}} \approx P_{\text{лс}}^{\text{ус}}$, можно определить допустимые среднеквадратические значения $\sigma_{\Delta x_{i\text{дон}}}$ случайных погрешностей определения характерных параметров x_i критических режимов полета вертолета, позволяющие обоснованно проводить метрологический анализ каналов измерения и предупреждения ИУСПКР.

Как показано в работе [8], характерные параметры x_i критических режимов полета и их граничные значения $x_{\text{гpi}}$ на границах возможных особых ситуаций являются известными функциями и других параметров x_j движения вертолета.

В частности, на границах особых ситуаций, обусловленных летными ограничениями по прочности конструкции, граничные значения характерного параметра такого критического режима – приборная скорость является функцией абсолютной

барометрической высоты H и истинной воздушной скорости вида [8]

$$V_{\text{пр.пр}}^{\text{прочность}} = \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{\tau H}{T_0}\right)^{\frac{1}{\tau R}}}{1 - \frac{\tau}{T_0} H + \frac{\Delta T}{T_0}}}; \quad V_{\text{в.пр}}^{\text{прочность}} = f_1(H, V_{\text{в}}), \quad (6)$$

где ΔT – превышение фактической температуры невозмущенной атмосферы на высоте H по отношению к стандартной атмосфере с абсолютной температурой при $H=0$, равной T_0 , и температурным градиентом по высоте τ ;

$R=29,27$ м/град – газовая постоянная воздуха.

На границах особых ситуаций, обусловленных летными ограничениями на коэффициент режима работы несущего винта, граничные значения приборной скорости определяются выражением [8]

$$V_{\text{пр.пр}}^{\mu} = \sqrt{\left(1 - \frac{\tau}{H_0} H\right)^{\frac{1}{\tau R}-1}}; \quad V_{\text{в.пр}}^{\mu} = f_2(H, V). \quad (7)$$

На границах особых ситуаций, связанных с летными ограничениями на число Маха $M_{\text{л}}$ конца наступающей лопасти, граничные значения приборной скорости будут равны [8]

$$V_{\text{пр.гр}}^{M_{\text{л}}} = \sqrt{kgRT_0} \sqrt{\left(1 - \frac{\tau}{T_0} H\right)^{\frac{1}{\tau R}-1}} M_{\text{л.гр}} - \frac{\omega_{\text{нв}} r_{\text{л}}}{\sqrt{kgRT_0} \sqrt{1 - \frac{\tau}{T_0} H}} = f_3(H, \omega_{\text{нв}}, M_{\text{л}}) \quad (8)$$

где $\omega_{\text{нв}}$ – угловая скорость вращения лопасти несущего винта.

На границах особых ситуаций, обусловленных летными ограничениями на несущую способность несущего винта, граничные значения вертикальной перегрузки определяются как [8]

$$n_{\text{у.гр}}^{\text{нс}} = \rho_0 \frac{\omega_{\text{нв}} r_{\text{л}} F}{2} \left(1 - \frac{\tau}{T_0} H\right)^{\frac{1}{\tau R}-1} m(\omega_z) V_{\text{в.гр}}^{\text{нс}} = f_4(H, \omega_{\text{нв}}, \omega_z, V_{\text{в}}), \quad (9)$$

где $m(\omega_z)$ – коэффициент, определяющий связь отношения коэффициента тяги и коэффициента заполнения несущего винта с коэффициентом режима работы несущего винта, зависящим от угловой скорости ω_z вращения вертолета относительно вертикальной оси z ;

F – ометаемая площадь несущего винта.

Граничные значения вертикальной перегрузки, определяющие летные ограничения на режиме «подхвата», возникающем при интенсивном маневрировании вертолета, определяются выражением вида [8]

$$n_{\text{у.гр}}^{\text{подхват}} = \rho_0 \frac{\omega_{\text{нв}} r_{\text{л}} F}{2} m(\omega_z) \left(1 - \frac{\tau}{T_0} H\right)^{\frac{1}{\tau R}-1} V_{\text{в.гр}}^{\text{подхват}} + \frac{T_{\text{пл}}}{\sigma} = f_5(H, \omega_{\text{нв}}, \omega_z, V_{\text{в}}), \quad (10)$$

где σ – коэффициент заполнения несущего винта;

$T_{\text{пл}}$ – подъемная сила планера вертолета.

Границы летных ограничений по вертикальной скорости $V_{\text{у.гр}}$ на критическом режиме «вихревое кольцо» определяются выражением [8]

$$V_{\text{у.гр}} = V_{\text{в.у}} + k_x \delta_x V_{\text{в.х}} + k_z \delta_z V_{\text{в.з}} = f_6(V_{\text{в.х}}, V_{\text{в.з}}, \delta_x, \delta_z), \quad (11)$$

где $V_{\text{в.х}}, V_{\text{в.у}}, V_{\text{в.з}}$ – продольная, вертикальная и боковая составляющие вектора истинной воздушной скорости вертолета, $V_{\text{у}} = V_{\text{в.у}}$ – вертикальная скорость снижения;

δ_x и δ_z – перемещения ручки циклического шага при продольном и боковом управлении;

k_x и k_z – постоянные коэффициенты.

Полученные модели летных ограничений на характерные параметры критических режимов полета позволяют провести анализ погрешностей их определения в каналах ИУСПКР.

При допущении о некоррелированности погрешностей измерения параметров x_j , входящих в функции f_i () выражений (6–11), среднеквадратическое значение $\sigma_{\Delta x_i}$ погрешности определения (измерения) характерных параметров x_i на различных критических режимах полета вертолета будут определяться как

– для критического режима, обусловленного ограничениями по прочности конструкции

$$\sigma_{\Delta V_{np}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_1}{\partial H}\right)^2 \sigma_{\Delta H}^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial V_B}\right)^2 \sigma_{\Delta V_B}^2 + \sigma_{обр}^2}; \quad (12)$$

– для критического режима, обусловленного ограничениями на коэффициент режима работы несущего винта

$$\sigma_{\Delta V_{np}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_2}{\partial H}\right)^2 \sigma_{\Delta H}^2 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial V_B}\right)^2 \sigma_{\Delta V_B}^2 + \sigma_{обр}^2}; \quad (13)$$

– для критического режима, связанного с летным ограничением на число Маха наступающей лопасти

$$\sigma_{\Delta V_{np}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_3}{\partial H}\right)^2 \sigma_{\Delta H}^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial \omega_{HB}}\right)^2 \sigma_{\Delta \omega_{HB}}^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial M_{л}}\right)^2 \sigma_{\Delta M_{л}}^2 + \sigma_{обр}^2}; \quad (14)$$

– для критического режима, обусловленного летными ограничениями на несущую способность несущего винта

$$\sigma_{\Delta n_y} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_4}{\partial H}\right)^2 \sigma_{\Delta H}^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial \omega_{HB}}\right)^2 \sigma_{\Delta \omega_{HB}}^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial \omega_z}\right)^2 \sigma_{\Delta \omega_z}^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial V_B}\right)^2 \sigma_{\Delta V_B}^2 + \sigma_{обр}^2}, \quad (15)$$

– для критического режима, обусловленного явлением «подхвата» вертолета

$$\sigma_{\Delta n_y} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_5}{\partial H}\right)^2 \sigma_{\Delta H}^2 + \left(\frac{\partial f_5}{\partial \omega_{HB}}\right)^2 \sigma_{\Delta \omega_{HB}}^2 + \left(\frac{\partial f_5}{\partial \omega_z}\right)^2 \sigma_{\Delta \omega_z}^2 + \left(\frac{\partial f_5}{\partial V_B}\right)^2 \sigma_{\Delta V_B}^2 + \sigma_{обр}^2}, \quad (16)$$

– для критического режима «вихревое кольцо»

$$\sigma_{\Delta V_y} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_6}{\partial V_{в.х}}\right)^2 \sigma_{\Delta V_{в.х}}^2 + \left(\frac{\partial f_6}{\partial V_{в.з}}\right)^2 \sigma_{\Delta V_{в.з}}^2 + \left(\frac{\partial f_6}{\partial \delta_x}\right)^2 \sigma_{\Delta \delta_x}^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial \delta_z}\right)^2 \sigma_{\Delta \delta_z}^2 + \sigma_{обр}^2}, \quad (17)$$

где $\sigma_{обр}^2$ – дисперсия погрешности канала обработки ИУСПКР вертолета.

Значения среднеквадратических погрешностей $\sigma_{\Delta x_j}$ измерения параметров x_j рассмотренных критических режимов полета вертолета, входящих в выражениях (12–17) не должны превышать допустимых значений $\sigma_{\Delta x_j, доп}$, которые определяются из условия обеспечения заданных (регламентированных Авиационными правилами) значений вероятностей пропуска опасной ситуации $P_{пр}^{x_i}$ и ложного срабатывания $P_{лс}^{x_i}$ из-за превышения характерного параметра x_i предельного значения $x_{пред i}$.

При известных допустимых значениях $\sigma_{\Delta x_j, доп}$ среднеквадратических погрешностей определения характерных параметров x_i критических режимов вертолета для обоснования требований к среднеквадратическим погрешностям $\sigma_{\Delta x_d}$ измерения параметров x_d , входящих в выражения (12–17), можно использовать следующую методику [9], раскрываемую на

примере критического режима «вихревое кольцо».

В соответствии с выражением (17)

$$\sigma_{\Delta V_{удоп}}^2 \geq \sigma_{\Delta V_{ymax}}^2 = \left(\frac{\partial f_6}{\partial V_{вх}} \right)_{\max}^2 \sigma_{\Delta V_{вх}}^2 + \left(\frac{\partial f_6}{\partial V_{вз}} \right)_{\max}^2 \sigma_{\Delta V_{вз}}^2 + \left(\frac{\partial f_6}{\partial \delta_x} \right)_{\max}^2 \sigma_{\Delta \delta_x}^2 + \left(\frac{\partial f_4}{\partial \delta_z} \right)_{\max}^2 \sigma_{\Delta \delta_z}^2 + \sigma_{обр}^2. \quad (18)$$

Методом последовательного приближения определяются допустимые значения среднеквадратических погрешностей $\sigma_{\Delta x_{j доп}}$ измерения параметров x_j . С этой целью на первом этапе вклад всех членов, входящих в выражение (18) принимается одинаковым и допустимые значения среднеквадратических погрешностей измерения влияющих параметров x_j определяются как

$$\sigma_{\Delta x_{j доп}} \leq \frac{\sigma_{\Delta x_{i доп}}}{\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right)_{\max} \sqrt{N}}, \quad (19)$$

где N – число членов, входящих в правую часть выражений (12–17).

Применительно к критическому режиму «вихревое кольцо» получим

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta V_{вх доп}} &\leq \frac{\sigma_{\Delta V_{удоп}}}{\left(\frac{\partial f_6}{\partial V_{вх}} \right)_{\max} \sqrt{5}}; & \sigma_{\Delta V_{вз доп}} &\leq \frac{\sigma_{\Delta V_{удоп}}}{\left(\frac{\partial f_6}{\partial V_{вз}} \right)_{\max} \sqrt{5}}; \\ \sigma_{\Delta \delta_x доп} &\leq \frac{\sigma_{\Delta V_{удоп}}}{\left(\frac{\partial f_6}{\partial \delta_x} \right)_{\max} \sqrt{5}}; & \sigma_{\Delta \delta_z доп} &\leq \frac{\sigma_{\Delta V_{удоп}}}{\left(\frac{\partial f_6}{\partial \delta_z} \right)_{\max} \sqrt{5}}; & \sigma_{обр} &\leq \frac{\sigma_{\Delta V_{удоп}}}{\sqrt{5}}. \end{aligned} \quad (20)$$

На втором и последующих этапах с учетом реальных среднеквадратических погрешностей $\sigma_{\Delta x_{д}}$ измерения влияющих параметров $x_{д}$ используемых средств измерения осуществляется перераспределением допустимых погрешностей $\sigma_{\Delta x_{д доп}}$ между собой в пределах допустимой среднеквадратической погрешности $\sigma_{\Delta x_{i доп}}$ определения характерных параметров x_i данного критического режима полета вертолета.

Как показывает опыт эксплуатации систем предупреждения и предотвращения критических режимов самолетов и вертолетов [10], алгоритмы срабатывания предупреждения сигнализации о приближении к опасным режимам полета имеют вид

$$x_{i пор}(t) = x_{i доп}(t) - \Delta x_{i ст}(t) - Q_{x_i} \frac{dx_i}{dt}, \quad (21)$$

где $x_{i пор}(t)$ – порог срабатывания канала сигнализации по характерному параметру x_i ;

$\Delta x_{i ст}(t)$ – статическое упреждение срабатывания сигнализации;

Q_{x_i} – коэффициент динамического упреждения сигнализации, учитывающей текущую скорость изменения $\frac{dx_i}{dt}$ характерного параметра x_i .

Величина $\Delta x_{i ст}$ назначается из условий компенсации влияния погрешности определения характерного параметра x_i и погрешности $\Delta x_{i пор}$ задания порогового значения $x_{i пор}$, т.е.

$$\Delta x_{i ст} = K_{x_i} (\Delta x_{i пор} + m_{\Delta x_i} + 3\sigma_{\Delta x_i}), \quad (22)$$

где $m_{\Delta x_i}$ и $\sigma_{\Delta x_i}$ – соответственно систематическая погрешность и среднеквадратическое значение случайной погрешности определения характерного параметра x_i ;

K_{x_i} – коэффициент запаса, учитывающий технологический разброс погрешности задания порога срабатывания сигнализации.

Динамическое упреждение выбирается из условия компенсации времени переходного процесса эргатической системы «ИУСПКР – Экипаж – Система управления – Вертолет» по каналу параметра x_i .

Значение Q_{x_i} определяется для конкретного типа вертолета по каждому каналу сигнализации путем имитационного моделирования и последующей натурной проверки.

Допуск ΔQ_{x_i} на технологический разброс коэффициента упреждения Q_{x_i} определяется из допустимой величины захода вертолета в буферную зону или недоиспользования его летно–технических возможностей по характерному параметру x_i :

$$\Delta Q_{x_i} = \pm K_{\Delta x_i} \frac{x_{i \text{ пред}} - x_{i \text{ пор}}}{Q_{x_i} x_{i \text{ max}}}, \quad (23)$$

где $K_{\Delta x_i}$ – коэффициент, определяющий запас по буферной зоне (допустимый заход в нее или не подход к ней по параметру x_i).

Рассмотренный подход позволяет обосновать требования к каналам упреждающей сигнализации информационно–управляющей системы предотвращения критических режимов вертолета по точностным критериям.

Таким образом, предлагаемые методики метрологического анализа позволяют на этапе проектирования ИУСПКР вертолета оценить эффективность ее работы, обосновать требования к среднеквадратическим погрешностям определения характерных параметров критических режимов полета вертолета, а также к среднеквадратическим погрешностям измерения других параметров движения вертолета, используемых при обнаружении нештатных ситуаций, в каналах формирования упреждающих сигналов предупреждения и информационной поддержки экипажа в нештатных ситуациях.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности Минобрнауки РФ № 2014/55 (НИР № 990).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володко А.М. Безопасность полетов вертолетов. – М.: Транспорт, 1981. – 223с.
2. Браверман А.С., Вайнтриб А.П. Динамика вертолета. Предельные режимы полета. – М.: Машиностроение, 1988. – 280с.
3. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми-8 (издание 4-ое). – М.: Авторитет, 1996. – 554с.
4. Деревянкин В.П., Кузнецов О.И., Солдаткин В.М. Особенности системы предупреждения критических режимов полета вертолета // Известия вузов. Авиационная техника. – 2012. – №3. – С. 54–55.
5. Солдаткин В.М. Методы и средства построения бортовых информационно–управляющих систем обеспечения безопасности полета. – Казань: Изд–во Казан. гос. техн. ун–та, 2004. – 350с.
6. Основы построения автоматизированных систем контроля сложных объектов / Под ред. П.И. Кузнецова. – М.: Энергия, 1969. – 429с.
7. Летные испытания систем пилотажно–навигационного оборудования / Под ред. Е.Г. Харина. – М.: Машиностроение, 1989. – 136с.
8. Деревянкин В.П., Кузнецов О.И., Солдаткин В.М. Построение алгоритмов предупреждения критических режимов полета вертолета с учетом критерия безопасности // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2013. – №4. – С. 247–256.
9. Системотехническое проектирование измерительно–вычислительных систем: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования / Под ред. профессора В.М. Солдаткина. – Казань: Изд–во Казан. гос. техн. ун–та, 2011. – 150с.
10. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: теория, проектирование, применение / Под ред. доктора технических наук В.М. Солдаткина. – М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет, 2009. – 760с.

Солдаткин Владимир Михайлович

Казанский национальный исследовательский
технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ
Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Приборы и информационно–
измерительные системы» (ПИИС)
тел. 8–987–290–81–48
E-mail: nikitin.rf@mail.ru

Кузнецов Олег Игоревич

Казанский национальный исследовательский
технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ
Аспирант кафедры «Приборы и информационно–
измерительные системы» (ПИИС)
тел. +7–987–290–81–48
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

O.I. KUZNETSOV, V.M. SOLDATKIN

**METROLOGICAL ANALYSIS OF THE AUTOMATED SYSTEM
OF CONTROL AND PREVENTION OF DANGEROUS OPERATION
MODES OF THE HELICOPTER**

Abstract. *The task of monitoring and warning of dangerous operating modes of helicopter, criterion of efficiency of control are disclosed. Using the missing probabilities of dangerous situation and false alarms on assumption of normal law of error equations are obtained for allowable root-mean-square error of measurement controlled parameters of characteristic critical flight modes of helicopter for the algorithms channel alerts.*

Keywords: *helicopter, dangerous modes of operating, automated control system, monitored parameters, allowable error, analysis, measurement channels and alarms.*

BIBLIOGRAPHY

1. Volodko A.M. Bezopasnost poletov vertoletov. – M.: Transport, 1981. – 223s.
2. Braverman A.S., Vayntrub A.P. Dinamika vertoletov. Predelnyye rezhimy poleta. – M.: Mashinostroyeniye, 1988. – 280s.
3. Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii vertoletov Mi-8 (izdaniye 4-oye). – M.: Avtoritet, 1996. – 554s.
4. Derevyankin V.P., Kuznetsov O.I., Soldatkin V.M. Osobennosti sistemy preduprezhdeniya kriticheskikh rezhimov poleta vertoletov // Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika. – 2012. – №3. – S. 54–55.
5. Soldatkin V.M. Metody i sredstva postroyeniya bortovykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem obespecheniya bezopasnosti poleta. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2004. – 350s.
6. Osnovy postroyeniya avtomatizirovannykh sistem kontrolya slozhnykh ob"yektov / Pod red. P.I. Kuznetsova. – M.: Energiya, 1969. – 429s.
7. Letnyye ispytaniya sistem pilotazhno-navigatsionnogo oborudovaniya / Pod red. Ye.G. Kharina. – M.: Mashinostroyeniye, 1989. – 136s.
8. Derevyankin V.P., Kuznetsov O.I., Soldatkin V.M. Postroyeniye algoritmov preduprezhdeniya kriticheskikh rezhimov poleta vertoletov s uchetom kriteriya bezopasnosti // Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. – 2013. – №4. – S. 247–256.
9. Sistemotekhnicheskoye proyektirovaniye izmeritelno-vychislitelnykh sistem: Uchebnoye posobiye dlya kursovogo i diplomnogo proyektirovaniya / Pod red. professora V.M. Soldatkina. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2011. – 150s.
10. Makarov N.N. Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: teoriya, proyektirovaniye, primeneniye / Pod red. doktora tekhnicheskikh nauk V.M. Soldatkina. – M.: Mashinostroyeniye / Mashinostroyeniye – Polet, 2009. – 760s.

Soldatkin Vladimir Mihailovich

Kazan national research technical university named after
A.N.Tupolev–KAI
Doctor of technical science, professor, head of department
“Devices and information–measurement systems” (DIMS)
Ph.number +7–987–290–81–48
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Kuznetsov Oleg Igorevich

Kazan national research technical university named after
A.N.Tupolev–KAI
Post-graduate student of department “Devices and
information–measurement systems” (DIMS)
Ph.number +7–987–290–81–48
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 10 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

- Водном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.

- Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустроочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« »). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

- Структура статьи:

УДК;

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;

Текст статьи;

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке ЗА СТАТЬЕЙ**.

- Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «()». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

- Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подрисуточные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисуточной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте <http://oreluniver.ru/public/file/science/journal/fipptt/>

Плата за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес издателя:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. (4862) 75–13–18
<http://oreluniver.ru>
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 34
+7(920)2806645, +7(906)6639898

<http://oreluniver.ru>
E-mail: tlostu@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 27.04.2018 г.
Дата выхода в свет
Формат 60х88 1/8. Усл. печ. л. 9,75.
Цена свободная. Тираж 600 экз.
Заказ _____

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ИП Синяев В.В.
302001, г. Орел, ул. Розы Люксембург, 10а