

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК. 629.113.004.67
doi: 10.28983/asj.y2024i12pp164-174

Повышение точности воспроизводства заданной формы поршневых колец путем учета кинематических особенностей копировального узла станка HCFX-2

Дмитрий Анатольевич Никитин¹, Павел Дмитриевич Никитин¹, Василий Васильевич Чекмарев¹, Феликс Яковлевич Рудик¹, Людмила Владимировна Никитина²

¹Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, г. Саратов, Россия

²Федеральное государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Медицинский колледж», г. Москва, Россия

e-mail: nilppr@rambler.ru

Аннотация. В настоящее время в Российской Федерации сложилась ситуация зависимости отрасли поршневого двигателестроения от зарубежных производителей и технологий. Закрытие ряда предприятий, производивших поршневые кольца, а также зависимость от импортных заготовок и копиров привели к перебоям в производстве ДВС различных наименований. На сегодняшний день все компетенции как по изготовлению поршневых колец, так и по изготовлению средств производства для их выпуска в РФ авторы считают утраченными, и их скорейшее восстановление является актуальной задачей, требующей безотлагательного решения. В результате в РФ сложилась проблемная ситуация, заключающаяся в противоречии между потребностью отечественного машиностроения в качественных поршневых кольцах с одной стороны и отсутствием независимого от импортных поставок отечественного производителя – с другой. Отмечается, что в настоящее время не выпускаются отечественные станки для производства поршневых колец. Из-за отсутствия на рынке других возможностей для формообразования поршневых колец ООО «ППК» пришлось закупить токарно-фрезерные станки HCFX-2 производства Yuhuan CNC Machine Tool Co., LTD (КНР). Но, как показали исследования кинематики узлов станка, обеспечивающих копирную обработку, в кинематической цепи имеется ряд неточностей, приводящих к определенной погрешности получаемого профиля поверхности поршневых колец. Авторами произведена доработка методики расчета профиля образцовых копиров. В результате проведенных работ авторами построен и реализован в виде программы на языке C++ алгоритм расчета профиля копира (кулачка) для токарно-фрезерного станка HCFX-2. Анализ результатов расчета подтвердил их абсолютную достоверность. Авторы считают, что данный алгоритм можно рекомендовать к широкому использованию.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; поршневые кольца; механическая обработка; работоспособность; надежность

Для цитирования: Никитин Д. А., Никитин П. Д., Чекмарев В. В., Рудик Ф. Я., Никитина Л. В. Повышение точности воспроизводства заданной формы поршневых колец путем учета кинематических особенностей копировального узла станка HCFX-2 // Аграрный научный журнал. 2024. № 12. С. 164–174. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp164-174>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Improving the accuracy of reproduction of a given shape of piston rings by taking into account the kinematic features of the copying unit of the HCFX-2 machine

Dmitry A. Nikitin¹, Pavel D. Nikitin¹, Vasily V. Chekmarev¹, Felix Ya. Rudik¹, Ludmila V. Nikitina²

¹Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia

²Federal State Educational Establishment of Professional “Medical College”, Moscow, Russia

e-mail: nilppr@rambler.ru.

Abstract. Currently, the Russian Federation has a situation of dependence of the piston engine industry on foreign manufacturers and technologies. The closure of a number of enterprises that produced piston rings, as well as



the dependence of imported blanks and copiers, led to interruptions in the production of internal combustion engines of various designation. To date, all competencies for both the manufacture of piston rings and the manufacture of means of production for their release in our country are considered lost, and their early restoration is an urgent task that requires prompt solutions. As a result, a problematic situation has developed in the Russian Federation, consisting in a contradiction between the need of domestic engineering for high-quality piston rings, on the one part, and the lack of a domestic manufacturer independent of imports, on the other part. It is noted that currently machines for the production of piston rings are not available in the Russian Federation. In this regard, PPK LLC had to purchase HCFX-2 turning and milling machines manufactured by Yuhuan CNC Machine Tool Co., LTD (China) for forming piston rings. But, as studies of the kinematics of the machine components providing copier processing have shown, there are a number of inaccuracies in the kinematic chain, leading to a certain error in the resulting surface profile of the piston rings. The authors have refined the methodology for calculating the profile of reference copiers. As a result, the authors built and implemented in the form of C++ program an algorithm for calculating the profile of a copier (cam) for the HCFX-2 turning and milling machine. The analysis of the calculation results confirmed their absolute reliability. The authors believe that this algorithm can be recommended for widespread use.

Keywords: internal combustion engine; piston rings; machining; efficiency; reliability

For citation: Nikitin D. A., Nikitin P. D., Chekmarev V. V., Rudik F. Ya., Nikitina L. V. Improving the accuracy of reproduction of a given shape of piston rings by taking into account the kinematic features of the copying unit of the HCFX-2 machine. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(12):164–174. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i12pp164-174>.

Введение. В настоящее время в Российской Федерации в связи с постоянно нарастающим объемом санкций со стороны стран коллективного запада сложилась крайне тревожная ситуация высокой зависимости отрасли поршневого двигателестроения от зарубежных производителей и технологий. При этом практически все ключевые производители двигателей внутреннего сгорания (ДВС), такие как ПАО «Звезда», АО «ТрансМашХолдинг», АО «Синара-Транспортные Машины», АО «АвтоВАЗ», ПАО «КАМАЗ», ПАО «Автодизель» и др. при комплектовании производимых двигателей используют детали цилиндропоршневой группы зарубежных производителей. Возобновление производства этих деталей в стране является крайне актуальной задачей, входящей в концепцию развития отечественного поршневого двигателестроения и требующей скорейшего решения.

Одним из ключевых элементов цилиндропоршневой группы любой поршневой машины являются поршневые кольца [4, 12], изготовление которых до середины 1990-х гг. осуществлялось на следующих специализированных заводах страны: Мичуринский автоагрегатный завод (признан банкротом в 2004 г.); Мичуринский завод им. Ленина (признан банкротом в 2004 г.); Ставропольский завод поршневых колец (ОАО СТАПРИ, на грани банкротства); Лебединский завод поршневых колец (Украина, практически не функционирует); Макинский завод поршневых колец им. В. И. Ленина (северный Казахстан, прекратил существование); Клинцовский завод поршневых колец (Брянская область, на грани банкротства).

Кроме того, собственное производство поршневых колец имели такие производители тракторов, автомобилей и автотракторных ДВС, как Ярославский моторный завод (ЯМЗ, прекратил собственное производство поршневых колец), ПАО «КАМАЗ» (сохранило небольшой объем собственного производства в виде совместного предприятия с компанией Тенеко, полностью зависимое от импортных заготовок и копиров), АО «АвтоВАЗ» (перешел на комплектацию ЦПГ кольцами производства Federal Mogul), Объединение ИЖМАШ (прекратило выпуск поршневых колец), АМО ЗИЛ, Горьковский автозавод (прекратил выпуск поршневых колец).

При этом научное сопровождение производства поршневых колец (расчет формы поршневых колец в свободном состоянии, технологической оснастки для их изготовления, отработка и запуск технологий изготовления) у всех вышеперечисленных производителей (кроме АО «АвтоВАЗ», работавшего до последнего времени под патронажем японской корпорации Riken) осуществлялось двумя научными центрами: Одесским конструкторско-технологическим институтом по поршневым кольцам (ОКТИПК) и лабораторией поршневых и уплотнительных колец при Саратовском институте механизации сельского хозяйства (сегодня – Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова). Более того, на станкостроительных заводах России (Красный Пролетарий) и Беларуси (Гомельский станкостроительный завод, ОАО «СтанкоГомель») выпускалась вся необходимая линейка станков для изготовления поршневых колец. В частности, для формообразования поршневых колец производились и широко использовались токарно-копировальные полуавтоматы МК6026 и МК6026-01 (рисунок 1). На сегодняшний день все компетенции как по изготовлению поршневых колец,



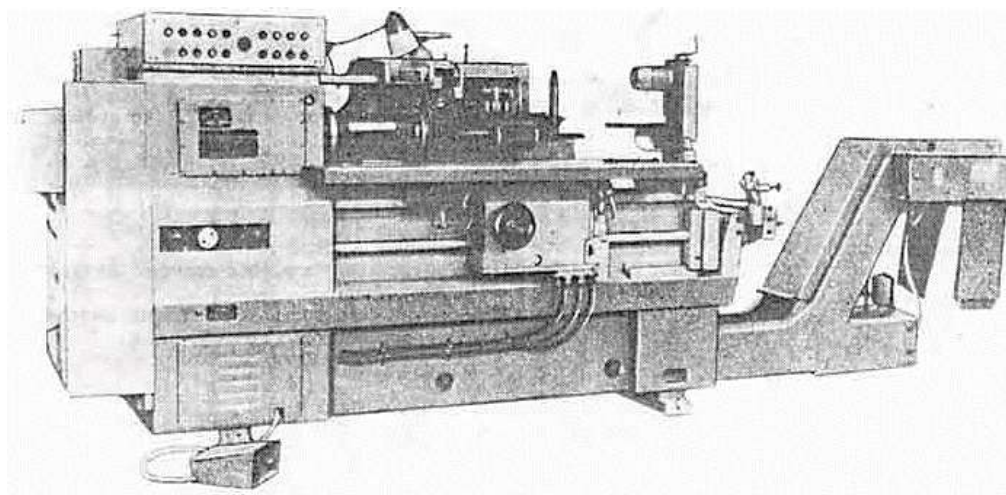


Рисунок 1 – Токарно-копировальный полуавтомат МК6026-01

Figure 1 – Semiautomatic copying lathe MK6026-01

так и по изготовлению средств производства для их выпуска в нашей стране можно считать утраченными, а их скорейшее восстановление – актуальной задачей, требующей безотлагательного решения. В результате в РФ сложилась проблемная ситуация, заключающаяся в противоречии между потребностью отечественного машиностроения в качественных поршневых кольцах с одной стороны и отсутствием независимого от импортных поставок отечественного производителя – с другой.

Материалы и методы. Для обеспечения работоспособности цилиндропоршневой группы в соответствии с современными требованиями ЕЭК ООН к чистоте выхлопных газов необходимо, чтобы форма колец в свободном состоянии соответствовала расчетной, обеспечивающей полное прилегание и приспособляемость кольца к гильзе цилиндра и надежное контактно-силовое взаимодействие этих компонентов [2, 3, 11, 12, 14, 17, 20]. Для технологического обеспечения воспроизводства расчетной формы поршневых колец в свободном состоянии все производители используют токарно-копировальные станки [8, 15, 16]. Копировальные узлы токарно-копировальных полуавтоматов МК6026 имеют кинематическую схему, представленную на рисунке 2. Форму копира для воспроизведения требуемой формы поршневых колец зачастую рассчитывали через отношения плеч качающегося суппорта и двуплечего рычага по следующей формуле:

$$\Delta R_{\text{коп}(\varphi)} = \Delta_{\text{кол}(\varphi)} \frac{bd}{ac}, \quad (1)$$

где $\Delta R_{\text{коп}(\varphi)}$ – приращение радиус-вектора копира в точке с угловой координатой φ , мм; $\Delta_{\text{кол}(\varphi)}$ – приращение радиус-вектора кольца в точке с угловой координатой φ , мм; a , b , c и d – плечи рычагов качающегося суппорта и двуплечего рычага, мм.

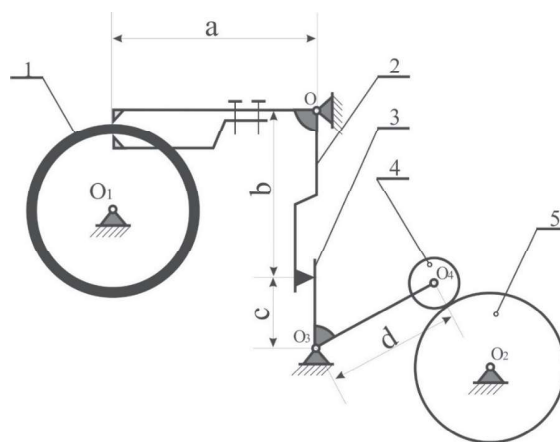


Рисунок 2 – Кинематическая схема копировального узла токарно-копировального полуавтомата МК6026: 1 – пакет заготовок колец; 2 – качающийся суппорт; 3 – двуплечий рычаг; 4 – следящий ролик; 5 – копир

Figure 2 – Kinematic diagram of the copying unit of the semiautomatic copying lathe MK6026:

1 – a package of ring blanks; 2 – a swinging caliper; 3 – a double-arm lever; 4 – a tracking roller; 5 – a copier



В настоящее время, как отмечено выше, данные станки не выпускаются. Из-за отсутствия на рынке других возможностей ООО «ППК» для формообразования поршневых колец закупило токарно-фрезерные станки HCFX-2 (рисунок 3) производства Yuhuan CNC Machine Tool Co., LTD (КНР).



Рисунок 3 – Токарно-фрезерный станок HCFX-2

Figure 3 – HCFX-2 turning and milling machine

Копировальный узел состоит из качающегося суппорта, на котором посредством бортштанг размещаются обточной и расточной резцы, двулучевого рычага, на котором размещен следящий ролик, и копира (кулачка).

Кинематическая схема копировального узла данного станка представлена на рисунке 4, а общий вид ее элементов на рисунках 5 и 6.

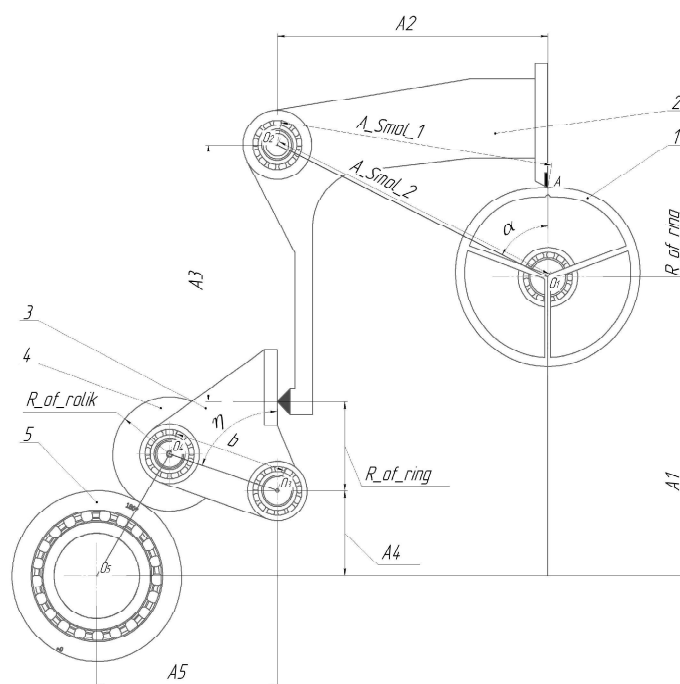


Рисунок 4 – Кинематическая схема копировального узла токарно-фрезерного станка HCFX-2:

1 – пакет заготовок колец; 2 – качающийся суппорт; 3 – двулучевой рычаг; 4 – следящий ролик; 5 – копир

Figure 4 – Kinematic diagram of the copying unit of the HCFX-2 turning and milling machine:

1 – a package of ring blanks; 2 – a swinging caliper; 3 – a double-arm lever; 4 – a tracking roller; 5 – a copier

Вышеуказанные станки комплектуются «стандартными» копирами для изготовления колец в диапазоне номинальных диаметров 100–200 мм (как заявлено производителем) с требуемыми параметрами распределения радиального давления по периметру кольца, упругостью и овальностью. Однако опыт авторов свидетельствует, что требуемую форму поршневого кольца можно получить с единственного копира, рассчитанного под конкретное кольцо [13], что соответствует выводам, представленным в [2, 3].





Рисунок 5 – Фрагмент качающегося суппорта

Figure 5 – A fragment of a swinging caliper

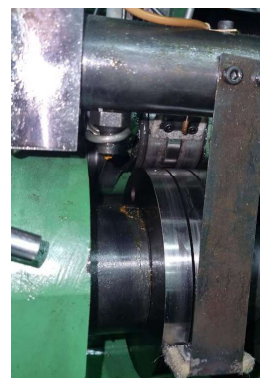


Рисунок 6 – Копир со следящим роликом

Figure 6 – A copier with a tracking roller

Для расчета формы копира использование формулы (2) является неприемлемым, т.к. в ней имеется ряд методических допущений, вносящих серьезные погрешности в расчеты. Целью настоящей работы является создание алгоритма расчета формы копира для данного станка, исключая методические погрешности.

Проблемам воспроизводства расчетной формы поршневых колец и расчету профиля копиров и копировальных узлов посвящено множество публикаций [1, 4–7, 9, 10].

Для расчета формы копира необходимо знать закон перемещения двуплечего рычага (3) (см. рисунок 4), а для этого необходимо знать закон перемещения качающегося суппорта (2). В свою очередь, закон перемещений качающегося суппорта можно вычислить, зная закон перемещения режущей кромки резца.

Построим последовательный алгоритм расчета в обратном порядке.

Для определения закона перемещений качающегося суппорта в виде зависимости угла его отклонения от начального положения от угла поворота шпинделя станка воспользуемся рисунком 7, на котором изображен фрагмент копировального узла, содержащий пакет обрабатываемых колец и качающийся суппорт.

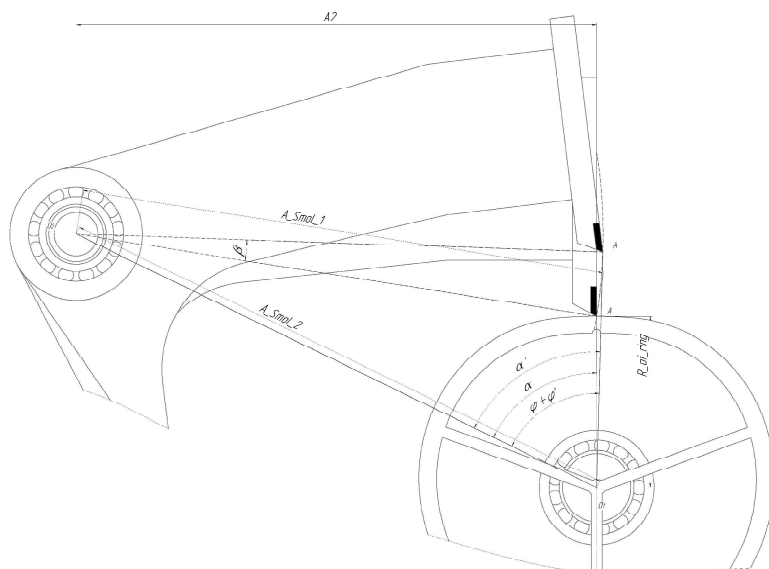


Рисунок 7 – Схема к определению закона движения качающегося суппорта

Figure 7 – Diagram for determining the law of motion of a swinging caliper

В качестве исходных данных используем форму наружной поверхности кольца в виде таблично заданной функции угловой координаты $R_of_ring(\varphi)$.

В начальный момент обточной резец находится в точке кольца $A_{(\varphi=0)}$, соответствующей угловой координате кольца 0° . При этом угол отклонения качающегося суппорта от номинального положения $\beta = 0$. При обработке точки кольца $A_{(\varphi)}$ с угловой координатой φ° резец должен переместиться в точку $A_{(\varphi)'}$. В этом случае пакет колец повернется не на φ° , а на угол $\varphi + \varphi'^\circ$. Определить угол φ' можно как разность углов:



$$\varphi' = \alpha - \alpha', \quad (2)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{|O_2A_{(0)}|^2 + |O_1O_2|^2 - |O_1A_{(0)}|^2}{2|O_2A_{(0)}||O_1O_2|}\right); \quad (3)$$

$$\alpha' = \arccos\left(\frac{|O_2A_{(\varphi)'}|^2 + |O_1O_2|^2 - |O_1A_{(\varphi)'}|^2}{2|O_2A_{(\varphi)'}||O_1O_2|}\right). \quad (4)$$

Зная угол φ' , на который повернется шпиндель станка для обработки точки кольца с угловой координатой φ , и радиусы вектора кольца $R_{of_ring(0)}$ и $R_{of_ring(\varphi)}$, можно определить основные равнобедренного треугольника $O_2A_{(0)}A_{(\varphi)}$:

$$|A_{(0)}A_{(\varphi)}| = \sqrt{|O_2A_{(\varphi)'}|^2 + |O_2A_{(0)}|^2 - 2 \cdot |O_2A_{(\varphi)'}||O_2A_{(0)}|}. \quad (5)$$

Тогда угол отклонения качающегося суппорта $\beta(\varphi + \varphi')$ определится по следующей зависимости:

$$\beta(\varphi + \varphi') = \arccos\left(\frac{|A_{(0)}A_{(\varphi)}|}{2|O_1A_{(0)}|}\right). \quad (6)$$

Таким образом, мы получили две зависимости: зависимость угла поворота шпинделя от угловой координаты кольца и закон перемещений качающегося суппорта от угла поворота шпинделя станка.

Для получения закона перемещений двулучевого рычага в виде зависимости угла его отклонения от номинального положения воспользуемся рисунком 8. Закон движения двулучевого рычага можно описать с использованием теоремы синусов:

$$\frac{|O_2B|}{\sin(\lambda)} = \frac{|O_3B'|}{\sin(\beta)}. \quad (7)$$

Здесь неизвестно значение $|O_3B'|$, которое определим из треугольника O_2O_3B' :

$$|O_3B'| = \sqrt{|O_2O_3|^2 + |O_2B|^2 - 2|O_2O_3||O_2B|\cos(\beta)}; \quad (8)$$

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{|O_2B|\sin(\beta)}{\sqrt{|O_2O_3|^2 + |O_2B|^2 - 2|O_2O_3||O_2B|\cos(\beta)}}\right). \quad (9)$$

Следующим этапом является построение кривой точек центра ролика (на рисунке 8 обозначена пунктиром) в виде зависимости радиус-вектора траектории центра ролика $|O_5O_4|$ от угла поворота шпинделя, которая определяется по зависимости

$$|O_5O_4| = \sqrt{|O_5O_3|^2 + |O_4O_3|^2 - 2|O_5O_3||O_4O_3|\cos(\eta + \lambda)}. \quad (10)$$

Угловая координата (относительно копира) точки центра вращения ролика определится из треугольника $O_5O_4O_3$:

$$\xi = \arccos\left(\frac{|O_5O_4|^2 + |O_5O_3|^2 - |O_4O_3|^2}{2|O_5O_4||O_5O_3|}\right). \quad (11)$$

Для определения профиля копира (кулачка) воспользуемся утверждением из теории механизмов машин: кривая центра следящего ролика находится на эквидистанте профиля кулачка. Таким образом, построение профиля кулачка сводится к построению эквидистанты кривой точек центра следящего ролика, находящейся от нее на расстоянии, равном радиусу следящего ролика.

Учитывая, что построение эквидистанты требует знания угла наклона перпендикуляра к общей касательной ролика и копира в точке их контакта, нам потребуется знание значения производной кривой точек центра ролика в каждой точке. Учитывая, что кривая в нашем случае задана таблично, лучше воспользоваться декартовыми координатами точек центра вращения следящего ролика:

$$X(\varphi) = |O_5O_4|(\varphi) \cos(\varphi' + \xi); \quad (12)$$

$$Y(\varphi) = |O_5O_4|(\varphi) \sin(\varphi' + \xi). \quad (13)$$



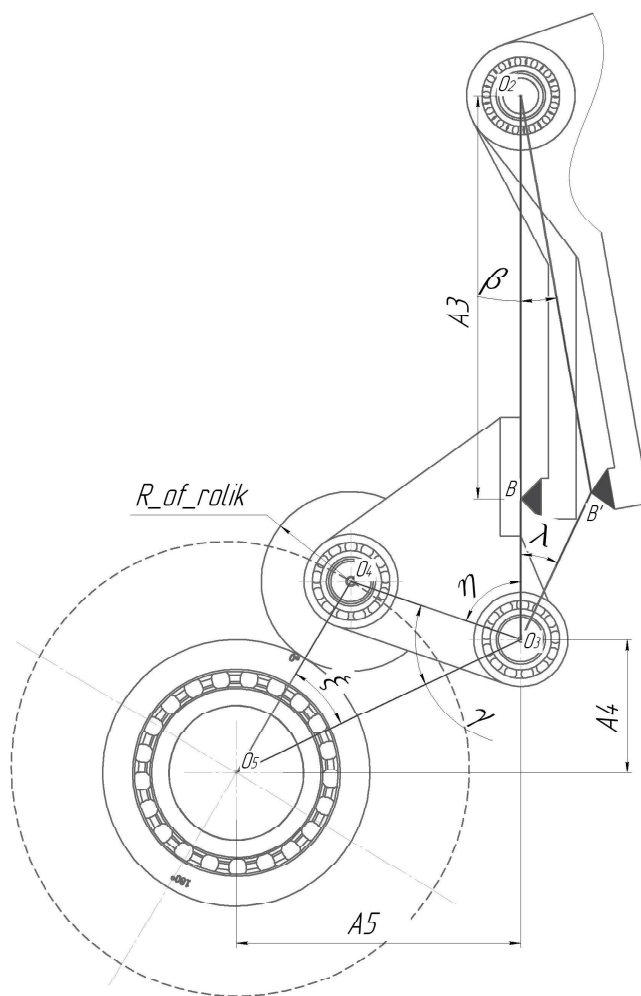


Рисунок 8 – Схема к определению закона движения двулучевого рычага и построению кривой точек центра вращения ролика

Figure 8 – Diagram for determining the law of motion of the double-arm lever and constructing the curve of the points of the center of rotation of the roller

В соответствии со схемой, представленной на рисунке 9, угол наклона касательной (первая производная кривой в точке O_4) определяется следующим образом:

$$v = \arctan \left(\frac{Y(\varphi_{+1}) - Y(\varphi_{-1})}{X(\varphi_{+1}) - X(\varphi_{-1})} \right). \quad (14)$$

Декартовы координаты профиля копира определяются по следующим зависимостям:

$$XD(\varphi) = X(\varphi) + R_{of_rolik} \cos\left(\frac{\pi}{2} - v - \xi\right); \quad (15)$$

$$YD(\varphi) = Y(\varphi) - R_{of_rolik} \sin\left(\frac{\pi}{2} - v - \xi\right). \quad (16)$$

Таким образом, мы получили алгоритм построения профиля копира для копирующего узла станка HCFX-2.

Результаты исследований. Разработанный алгоритм реализован авторами в виде программы на языке C++. В целях проверки достоверности разработанного алгоритма проведена его практическая апробация. Для этого рассчитан копир для верхнего поршневого кольца двигателя КамАЗ-740. Форма кольца рассчитана с использованием методики, изложенной в [18, 19], с учетом упругих свойств чугуна по рекомендациям, изложенным в [6].

Результаты сокращенного расчета представлены в таблице и проиллюстрированы рисунками 10–13.



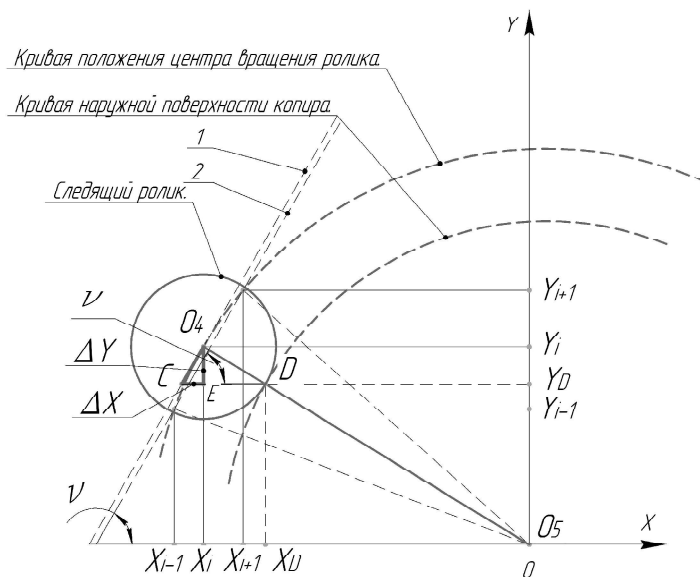


Рисунок 9 – Схема к определению координат точек копира:
 1 – общая касательная к копиру и ролику в точке контакта; 2 – прямая, проходящая через соседние по отношению к искомой точки кривой центра следящего ролика

Figure 9 – A diagram for determining the coordinates of the copier points:
 1 – a common tangent to the copier and the roller at the point of contact, 2 – a straight line passing through the curve of the center of the tracking roller adjacent to the desired point

Результаты расчета

Calculation results

№	Угол кольца	Радиус-вектор кольца	Угол поворота шпинделя	Угол отклонения суппорта	Угол отклонения рычага	Координаты центра ролика		Координаты копира	
						X, мм	Y, мм	X, мм	Y, мм
0	0	62,6845	0	0	0	-99,602	0	-59,6020	0
30	30,156	62,7304	30,1626	0,013619	0,039107	-86,1567	50,082	-51,4951	30,1180
60	60,9586	63,3043	61,0462	0,186814	0,536417	-48,4396	87,868	-28,3279	53,2919
120	121,777	66,2754	122,237	1,08065	3,09833	56,0618	87,429	34,9678	53,4427
150	150,655	65,4829	151,023	0,84253	2,41707	90,3391	49,307	54,2165	32,1268
180	180	62,6845	180	0	0	99,602	0	59,6020	0,0010
210	209,345	65,4829	209,713	0,84253	2,41707	89,0727	-51,56	53,4295	-33,4056
240	238,223	66,2754	238,683	1,08065	3,09833	53,312	-89,132	33,2911	-54,5031
270	268,125	64,8407	268,415	0,649398	1,86372	2,32739	-102,13	3,01214	-62,1364
300	299,041	63,3043	299,129	0,186814	0,536417	-48,9739	-87,572	-28,6365	-53,1275
330	329,844	62,7304	329,851	0,013619	0,039107	-86,1796	-50,043	-51,5085	-30,0951
360	360	62,6845	0	0	0	-99,602	0	-59,6020	0



Рисунок 10 – Углы отклонения качающегося суппорта и двулучевого рычага

Figure 10 – Deflection angles of the swinging caliper and the double-arm lever



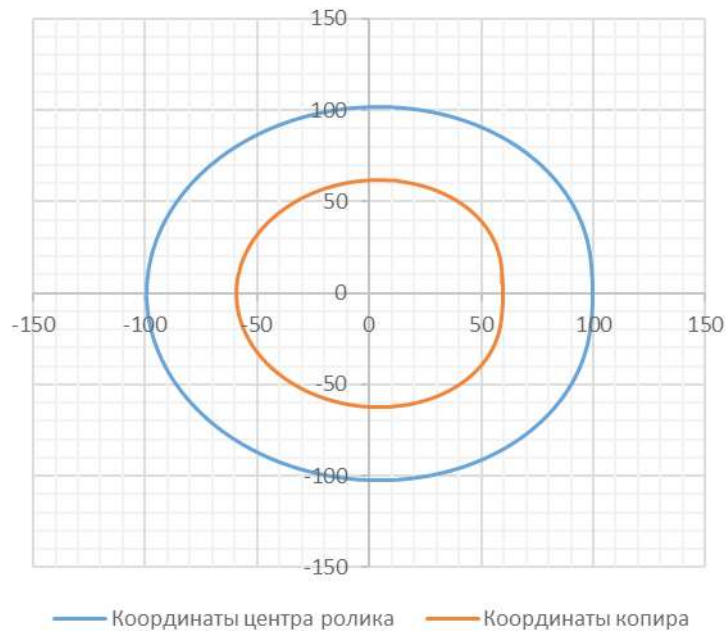


Рисунок 11 – Профили копира и центра следящего ролика

Figure 11 – Profiles of the copier and the center of the tracking roller

Анализ результатов расчета подтверждает неприемлемость использования формулы (1), т.к. отклонения углов качающихся элементов копировального узла в «набегающих» и «сбегающих» ветвях имеют несимметричные относительно оси кольца «замок-спинка» значения, что объясняет особенности кинематической схемы (таблица 1, рисунки 10, 11).

В целях проверки точности разработанного алгоритма нами использовался входящий в состав 11-й версии САД-системы Autodesk Inventor Professional модуль Dynamic Simulation, предназначенный для анализа и динамического моделирования различных механизмов и их сочетаний. Результат симуляции показал, что имеющиеся несоответствия не превышают $3 \cdot 10^{-6}$ мм, что соизмеримо с погрешностью округления чисел двойной точности в C++, полностью подтверждает адекватность разработанного алгоритма и не может отрицательно сказаться на промышленном применении рассчитанных копиров.

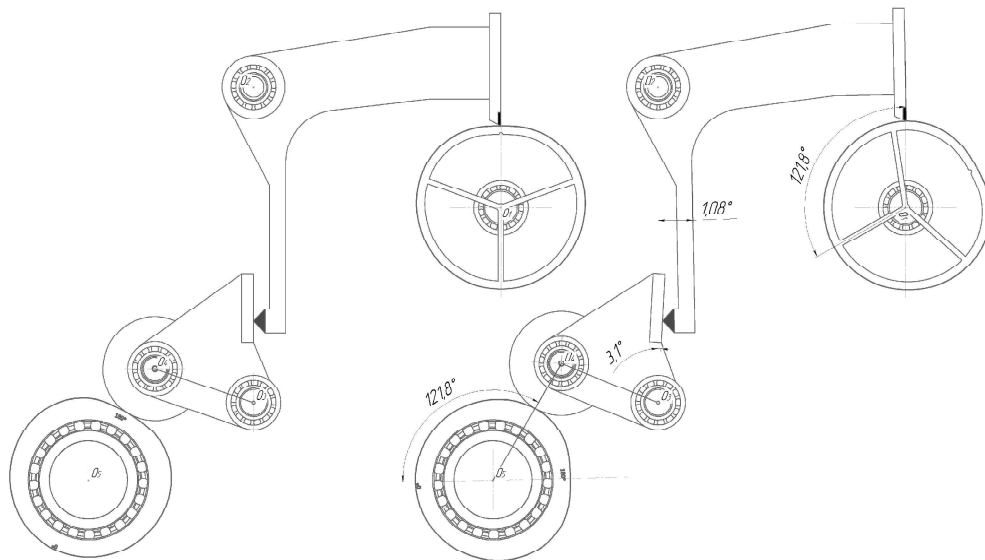


Рисунок 12 – Точное геометрическое построение замкнутой кинематической цепи для точки кольца, соответствующей угловой координате 120°

Figure 12 – Precise geometric construction of a closed kinematic circuit for a ring point corresponding to an angular coordinate of 120°

На рисунке 12 представлено построение кинематической схемы с расчетными формами кольца и копира, выполненное в системе КОМПАС-3D. Построения представлены для



угловой координаты кольца 180° , что соответствует начальному положению всех механизмов станка, и 120° , что соответствует максимальным перемещениям всех звеньев копировального узла станка. Как видно из рисунка 12, кинематическая цепь не содержит разрывов и врезания ее узлов, что однозначно свидетельствует о правильности выполненных расчетов.

Заключение. В результате проведенных работ авторами построен и реализован в виде программы на языке C++ алгоритм расчета профиля копира (кулачка) для токарно-фрезерного станка НСFX-2. Анализ результатов расчета путем динамического моделирования работы копировального узла подтвердил их абсолютную достоверность. На основании вышеизложенного, данный алгоритм можно рекомендовать к широкому применению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ формообразования уплотнительных колец турбокомпрессоров / П. Д. Никитин [и др.] // Научная мысль. 2015. № 3. С. 182–184.
2. Гинцбург Б. Я. Влияние непостоянства модуля упругости материала поршневых колец на эпюры их давления // Вестник машиностроения. 1970. № 10. С. 24–25.
3. Гинцбург Б. Я. Теория поршневого кольца. М.: Машиностроение, 1979, 271 с.
4. Данилов Ю. С., Хохлов А. В. Влияние технологического процесса на параметры поршневых колец // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2005. № 1. С. 34–36.
5. Методика расчета формы поршневых колец для дизелей и газовых двигателей при копирном способе формообразования. РТМ 24.060.36-81. М.: Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по тяжелому и транспортному машиностроению, 1982. 48 с.
6. Никитин Д. А. Повышение ресурса дизелей совершенствованием узлов уплотнения при изготовлении и ремонте: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2013. 39 с.
7. Никитин Д. А., Ерюшев М. В. Результаты производственной апробации копиров, изготовленных с учетом зависимости модуля упругости чугунов от воспринимаемой нагрузки // Организация и управление производством: сб. науч. работ, посвященных 70-летию Л. М. Игнатъева. Саратов, 2008. С. 143–146.
8. Симдянкин А. А. Повышение качества поршневых колец технологическим обеспечением приспособляемости кольца к цилиндру: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Саратов, 1992. 23 с.
9. Устройство для токарной обработки пакетов поршневых или уплотнительных колец: патент № 2179090 С1 Российская Федерация / Ю. С. Данилов [и др.]; заявл. 14.02.2001; опубл. 10.02.2002.
10. Хохлов А. В. Повышение долговечности автотракторных дизелей путем обеспечения оптимальных параметров поршневых колец на основе копирной обработки: 05.20.03: дис. ... д-ра технич. наук. Саратов, 2007. 404 с.
11. Arnold H. Berechnung und praktische Verwendung von offenen, ebenen Ringfedern konstanter und inkonstanter // Starke, Diss. Karlsruhe, 1951.
12. English K. Radial pressures of piston rings on cylinder walls. ATZ. 1940. No. 2.
13. Influence of the Piston Ring Shape in a Free State on the Efficiency of Sealing the Combustion Chamber / D. A. Nikitin et al. // International Conference “2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED 2021)”. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639210.
14. Influence of temperature and geometric parameters of elements in a turbocompressor seal assembly on its operability / D. A. Nikitin et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, November 01, 2019. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/832/1/012084.
15. Piston Ring Handbook. Goetze AG. Burscheid, D-5093, 1989.
16. Piston Ring Manual. Goetze AG. 2008. Federal_Mogul Burscheid GmbH.
17. Prescott J. Applied Elasticity. London: Longmans, Green and Co., 1924. 666 p.
18. Serdecki W. Analysis of relations between the compression ring characteristic parameters // Journal of POLISH CI-MAC. Energetic aspects. 2011. Vol. 6. No. 1. P. 171–180.
19. Serdecki W., Krzymie Ę. P. Dependence of piston ring parameters determination accuracy on the method of calculation // Journal of KONES. 2011. Vol. 18. No. 4. P. 435–441.
20. Yamamoto Kenji, Ochiai Masayuki. Dynamic Contact Analysis of Piston Ring in Distorted Cylinder Bore. Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan. 2019. Vol. 50. No. 1. P. 61–66.

REFERENCES

1. Analysis of the formation of sealing rings of turbochargers / P. D. Nikitin, L. Yu. Evsyukova, S. M. Syakin, D. A. Nikitin. *Scientific Thought*. 2015;(3):182–184. (In Russ.).
2. Ginzburg B. Ya. The influence of the variability of the elastic modulus of the piston ring material on their pressure diagrams. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 1970;(10):24–25. (In Russ.).
3. Ginzburg B. Ya. Theory of the piston ring. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 271 p. (In Russ.).



4. Danilov Yu. S., Khokhlov A. V. Influence of the technological process on the parameters of piston rings. *Bulletin of the Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilova*. 2005;(1):34–36. (In Russ.).
5. Methodology for calculating the shape of piston rings for diesel and gas engines using the copy forming method. RTM 24.060.36-81. Moscow: Central Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Heavy and Transport Engineering, 1982. 48 p. (In Russ.).
6. Nikitin D. A. Increasing the service life of diesel engines by improving seal units during manufacture and repair: Ph.D. thesis. Saratov, 2013. 39 p. (In Russ.).
7. Nikitin D. A., Eryushev M. V. Results of industrial testing of copiers made taking into account the dependence of the elastic modulus of cast iron on the perceived load. *Organization and Production Management: Collection of Scientific Works Dedicated to the 70th Anniversary of L. M. Ignatieva*. Saratov, 2008:143–146. (In Russ.).
8. Simdyankin A. A. Improving the quality of piston rings by technological support for the adaptability of the ring to the cylinder: Ph.D. thesis. Saratov, 1992. 23 p. (In Russ.).
9. Apparatus for turning packs of piston rings or sealing rings: Patent No. 2179090 C1 Russian Federation / Yu. S. Danilov, D. A. Nikitin, A. V. Khokhlov; appl. 02/14/2001; publ. 02/10/2002. (In Russ.).
10. Khokhlov A. V. Increasing the durability of auto-tractor diesel engines by ensuring optimal parameters of piston rings based on carbon processing: Ph.D. thesis. Saratov, 2007. 404 p. (In Russ.).
11. Arnold H. Berechnung und praktische Verwendung von offenen, ebenen Ringfedern konstanter und inkonstanter. *Starke, Diss.* Karlsruhe, 1951.
12. English K. Radial pressures of piston rings on cylinder walls. *ATZ*. 1940;(2).
13. Influence of the Piston Ring Shape in a Free State on the Efficiency of Sealing the Combustion Chamber / D. A. Nikitin, P. D. Nikitin, A. R. Asoyan. *2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 – Conference Proceedings*. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639210.
14. Influence of temperature and geometric parameters of elements in a turbocompressor seal assembly on its operability / D. A. Nikitin, P. D. Nikitin, C. A. Turoverov, A. R. Asoyan. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DSART2019*, Cholpon-Ata, November 01, 2019. BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020:012084. DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012084.
15. Piston Ring Handbook. Goetze AG. Burscheid, D-5093, 1989.
16. Piston Ring Manual. Goetze AG. 2008. Federal_Mogul Burscheid GmbH.
17. Prescott J. Applied Elasticity. London: Longmans, Green and Co., 1924. 666 p.
18. Serdecki W. Analysis of relations between the compression ring characteristic parameters. *Journal of POLISH CIMAC. Energetic Aspects*. 2011;6(1):171–180.
19. Serdecki W., Krzymie Ę. P. Dependence of Piston Ring Parameters Determination Accuracy on the Method of Calculation. *Journal of KONES*. 2011;4(18):435–441.
20. Yamamoto Kenji, Ochiai Masayuki, Dynamic Contact Analysis of Piston Ring in Distorted Cylinder Bore. *Proceedings of the Society of Automotive Engineers of Japan*. 2019;50(1): 61–66.

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 05.06.2024.
The article was submitted 04.04.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 05.06.2024.

