

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.01

DOI 10.30987/2658-6436-2022-4-29-36

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Михаил Сергеевич Чепчуров¹, Александр Михайлович Сумской², Юлия Алексеевна Жигулина³, Денис Викторович Подпратов⁴

^{1, 3, 4} БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Россия

² Политехнический колледж №8 им. И.Ф. Павлова, г. Москва, Россия

¹ avtpost@mail.ru, ² sumskoiam@yandex.ru, ³ j.zhigulunaaa@mail.ru, ⁴ d.podpryatov@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы, возникающие в процессе эксплуатации технологических агрегатов, в частности, контроля геометрических характеристик крупногабаритных деталей агрегатов. Приводятся основные виды износа поверхностей качения цилиндрических элементов различного технологического оборудования (по ГОСТ 24642-81, ГОСТ 18322-2016). Выделены закономерности износа оборудования из условий эксплуатации и конструкции агрегатов, а также различия искажения формы элемента с потерей круглости. Выявлено, что неравномерный износ поверхности качения цилиндрических деталей технологических агрегатов вызывает искажение формы, с учетом этого, смоделирован профиль условного круглого элемента в поперечном сечении относительно одного центра. В качестве основного дефекта цилиндрических деталей принято появление овальности. Приведена расчётная схема для построения искажения профиля цилиндрического тела, расположенного на двух круглых опорах. Представлен алгоритм вычисления перемещения центра радиусов. Теоретические расчёты и алгоритм подтверждены виртуальной кинематической моделью, отображающей качение не круглого тела на двух роликоопорах. Изложенный в работе метод получения визуальной кинематической модели, на основе аналитического описания качения не круглого тела предлагается использовать в качестве прямой задачи поиска мгновенных центров вращения. Полученная при решении прямой задачи кинематическая модель может быть использована для обучения нейронной сети, обрабатывающей результаты измерений реального катящегося тела.

Ключевые слова: технологические агрегаты, технологического оборудование, поверхности качения, искажения формы, износ, бандажи вращающихся печей, овальность, алгоритм, процедура вычисления, обучение нейронной сети

Финансирование: статья подготовлена в рамках реализации Федеральной программы подготовки университета «Приоритет 2030», с использованием оборудования на базе центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Чепчуров М.С., Сумской А.М., Жигулина Ю.А., Подпратов Д.В. Идентификация искажения формы цилиндрических деталей технологических агрегатов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №4 (18). С. 29-36. doi: 10.30987/2658-6436-2022-4-29-36.

Original article

Open Access Article

DISTORTION IDENTIFICATION OF THE CYLINDRICAL PART FORM OF TECHNOLOGICAL UNITS

Mikhail S. Chepchurov¹, Alexander M. Sumskoi², Yuliya A. Zhigulina³, Denis V. Podpryatov⁴

^{1,3,4} Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

² Polytechnic College No. 8 named after I.F. Pavlov, Moscow, Russia

¹ avtpost@mail.ru, ² sumskoiam@yandex.ru, ³ j.zhigulunaaa@mail.ru, ⁴ d.podpryatov@gmail.com

Abstract. The paper deals with the issues arising during the technological unit operation, in particular, the geometric characteristics control of large parts of the units. The main types of rolling the surface wear of cylindrical elements of various technological equipment are given (according to GOST 24642-81, GOST 18322-2016). The equipment wear patterns due to the operating conditions and the unit design, as well as differences in the part shape distortion with the roundness loss are highlighted. It is revealed that the uneven wear of the rolling surface of the technological cylindrical parts causes shape distortion. Considering this, the profile of a conditional round part in cross section relative to one centre is modelled. The appearance of ovality is accepted as the main defect of cylindrical parts. A calculation scheme is presented for constructing the distortion of the cylindrical body profile located on two round supports. An algorithm for computing the radii centre displacement is presented. Theoretical calculations and the algorithm are confirmed by a virtual kinematic model that displays rolling a non-circular body on two idlers. The method described in the paper for obtaining a visual kinematic model, based on an analytical descrip-

tion of rolling a non-circular body, is proposed to be used as a direct problem of searching for instantaneous centres of rotation. The kinematic model obtained by solving the direct problem can be applied for training a neural network that processes the measurement results of a real rolling body.

Keywords: technological units, technological equipment, rolling surfaces, shape distortions, wear, tires of rotating furnaces, ovality, algorithm, calculation procedure, training a neural network

Financing: the article was prepared as part of the implementation of the Federal University Training Program «Priority 2030», using equipment based on the Center for High Technologies of V.G. Shukhov BSTU.

For citation: Chepchurov M.S., Sumskoj A.M., Zhigulina Yu.A., Podpryatov D.V. Distortion identification of the cylindrical part form of technological units. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 4 (18). pp. 29-36. doi: 10.30987/2658-6436-2022-4-29-36.

Введение

Износ поверхностей качения цилиндрических элементов различного технологического оборудования вызывает, также и преждевременный износ других элементов, приводя это оборудование в неработоспособное состояние [1]. Отклонения формы цилиндрических элементов регламентируется ГОСТ 24642-81 с разделением отклонений от круглости и цилиндричности [2, 4]. При этом числовое значение допусков формы и расположение поверхностей регламентируется ГОСТ 18322-2016 [3]. Отсюда превышение предельного отклонения, от заданного в технической документации на изделия, являются дефектом. Существует различия искажения формы элемента с потерей круглости, при этом, большинство исследователей, наблюдая износ вращающихся тел круглого сечения проходят к таким же заключениям, так, например, мосинтранс [5], приводит в качестве основного дефекта бандажей вращающихся печей – появление овальности (рис. 1).

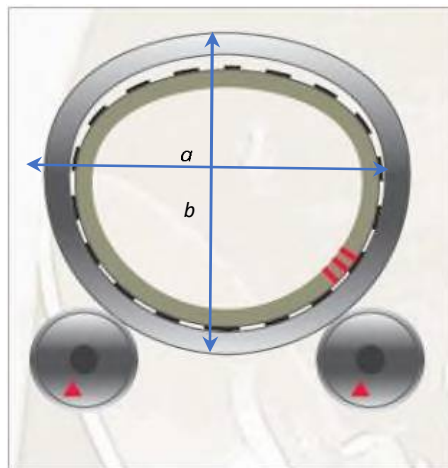


Рис. 1. Овальность бандажа (по данным МОМИНТРАНС)
Fig. 1. Bandage ovality (according to Ministry of Transport data)

Идентификация искажения формы цилиндрических деталей

Авторы энциклопедии по машиностроению [6] в качестве наиболее частого дефекта цилиндричности указывают на овальность. Овальность определяется измерением двух взаимоперпендикулярных диаметров. Здесь стоит обратиться к рис. 1, если произвести взаимоперпендикулярные измерения, то окажется, что тело действительно имеет овальную форму, идеальным является овал в форме эллипса, описываемого математической формулой [10], известной как каноническое уравнение эллипса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

где a – больший диаметр эллипса; b – меньший диаметр эллипса.

Тело круглого сечения, расположенное на двух опорах, имеет, в идеальном случае, форму эллипса, описываемого каноническим уравнением. И в случае равномерного износа поверхности качения, оно так же будет иметь форму идеального эллипса, что объясняется толщиной его стенок при наличии силы тяжести.

Неравномерный износ поверхности качения вызывает искажение формы, приведенной на рис. 1, т.е.: если бандаж имеет форму эллипса, то, как частный случай сходной с формой профиля кулачка, исходя из этого предлагается, что можно смоделировать профиль условно-

го круглого элемента в поперечном сечении, причем рассматривая вращение относительно одного центра, как это представлено на рис. 2.

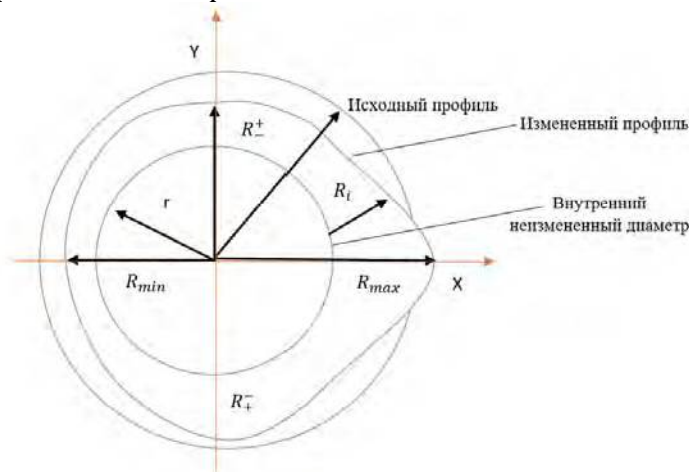


Рис. 2. Неравномерный износ профиля

Fig. 2. Uneven profile wear

Элемент, имеющий радиус R , вращается вокруг центра O , при этом в процессе эксплуатации внутренний радиус r не изменяется, а изнашивается только внешний R , переходя в R_i на различных участках [9]. Закономерность износа определяется из условий эксплуатации оборудования, а также конструкцией агрегата. То есть, авторы заранее исключают стохастический износ или появление на поверхности огранки. Угловая скорость ω всегда является постоянной, но за счет различных радиусов скорость точек на поверхности качения будет различной.

Для моделирования кулачка, заданного минимальными и максимальными диаметрами, определяющими овальность бандажа.

$$a = \frac{(R_{\max} + R_{\min} - (R^+ + R^-))}{(R_{\max} + R_{\min} + (R^+ + R^-))} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Принимаем из условий [6] допустимую овальность бандажа от 1 до 2 %, хотя согласно данным МОСИНТРАНС, допустима овальность бандажей не более 1 %, обозначив в (1)

$$\begin{aligned} R_{\max} + R_{\min} &= D_{\max} \\ R^+ + R^- &= D_{\min} \end{aligned}$$

При начальном диаметре 5 м и износе 2 % имеем $D_{\max} = 5$ м, находим $D_{\min} \approx 4,303$ м; Строим профиль кулачка из условий $R^+ = 2,5$ м; $R^- = 2,3$ м; $R_{\min} = 2,3$ м; $R_{\max} = 2,7$ м; $R_m = 2,3$ м.

Как видно из рис. 3 произошло смещение центра профиля сечения, по сравнению с рис. 2, т.е. его профиль не симметричен в отношении всех осей. Что и является приближением к реальному изложенному профилю.

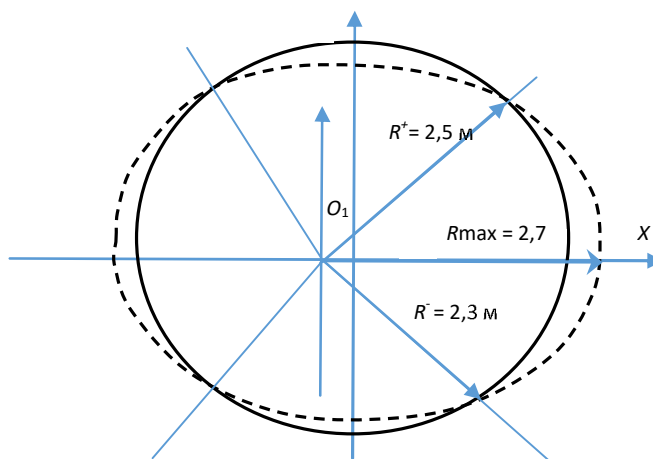


Рис. 3. Исходные данные для построения кулачка

Fig. 3. Initial data for building a cam

Для построения профиля кулачка воспользуемся рекомендациями из [6], нас интересует только его аналитическое описание. На рис. 4 изображена исходная расчётная схема для построения искажения профиля цилиндрического тела, расположенного на двух круглых опорах.

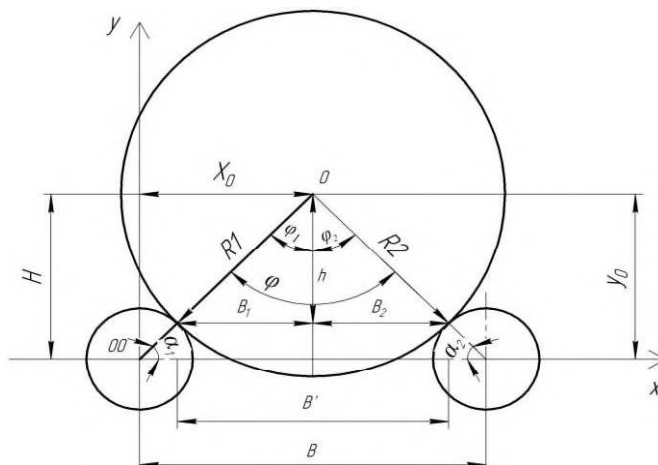


Рис. 4. Расчётная схема определения координат центра
Fig. 4. Calculation scheme for determining the coordinates of the center

Назначаем центр системы координат, в которой будем выполнять моделирование. Согласно рис. 4 этим центром является центр вращения левого ролика, хотя можно и правого. Таким образом, система координат становится стационарной с неизменяемым центром.

Всегда существует определённое мгновенное положение центра вращения тела, располагаемого на двух роликоопорах, определяемое радиусами $R1$ и $R2$. Точки касания этих радиусов с поверхностями роликов, радиусом r и мгновенным центром вращения определяют угол φ , который является суммой углов φ_1 и φ_2 , т.к. расстояние B между центрами вращения не изменяется, при $R1 = R2$ и равенстве радиусов роликов:

$$H = \sqrt{(R + r)^2 - (B/2)^2}, \quad (3)$$

где $R - R1$ или $R2$.

Таким образом:

$$\varphi/2 = \arcsin \frac{B/2}{R+r}. \quad (4)$$

Но при изменении радиусов от минимального до максимальных значений:

$$\begin{aligned} \varphi/2_{\max} &= \arcsin \frac{B/2}{R_{\max} + r} \Rightarrow \varphi_{\max} = \arcsin \frac{B}{2 \cdot (R_{\max} + r)} \\ \varphi/2_{\min} &= \arcsin \frac{B/2}{R_{\min} + r} \Rightarrow \varphi_{\min} = \arcsin \frac{B}{2 \cdot (R_{\min} + r)} \end{aligned} \quad (5)$$

При этом изменяются расчётные значения углов в роликах, определяемых в точке касания:

$$\begin{aligned} \alpha_{\min} &= 90 - \varphi/2_{\max} \\ \alpha_{\max} &= 90 - \varphi/2_{\min} \end{aligned} \quad (6)$$

При различных радиусах в расчётах уже не используется $B/2$, а рассчитываются B_1 и B_2 составляющие в сумме B' .

Расчёт координат выполняется при каждом повороте тела, с определённым шагом – дискретой, при полном обороте, именно она определяет количество расчётных шагов.

Поиск начинается от α_{\max} , заканчивается α_{\min} , начинается от $\varphi_{1\min} = \varphi/2_{\min}$, заканчивается $\varphi_{2\max} = \varphi/2_{\min}$.

На рис. 5 представлен алгоритм вычисления перемещения центра радиусов. Первоначальное начальное положение радиуса вычисляется для $R(1)$, т.е. при $i = 1$, оно принимается за исходное, а последующие изменение координат, как отклонение от исходного. A – дискрета угла, в градусах [11].

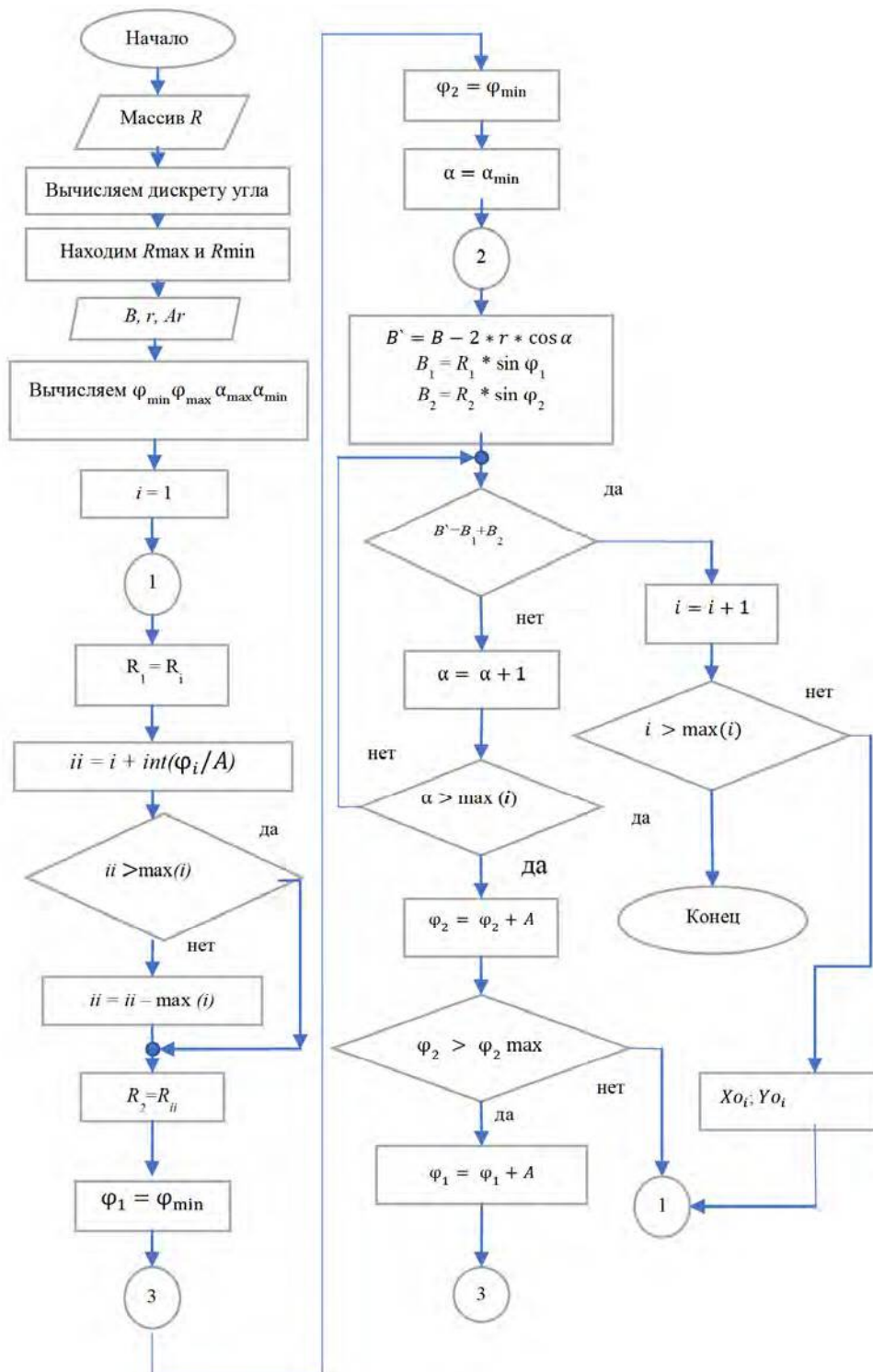


Рис. 5. Схема алгоритма процедуры вычисления отклонений центра радиусов
 Fig. 5. Scheme of the algorithm for calculating deviations of the center of radii

Основные шаги в вычислении координат мгновенного центра:

1. Определяем B для α_{\max} , и последовательно проводим уменьшение до α_{\min} , как только B' совпадает с B – прекращаем поиск и определяем смещение центра относительно OO , задав точность:

$$|B - 2\alpha \cdot \cos\alpha - R_1 \sin\varphi_{1(i)} - R_2 \sin\varphi_{2(i)}| \leq \Delta, \quad (7)$$

где Δ – задаваемая точность расчётов, мм.

2. При отношении $B' = B'_1 + B'_2$, соответственно $B'_1 = R_1 \sin\varphi_{1(i)}$,

Изменение φ_1 и φ_2 происходит в циклах, при этом поиск φ_1 вложен в цикл поиска φ_2 , в диапазоне от φ_{\min} до φ_{\max} . Расчёт выполняется перебором всех значений.

В том случае если, при проверке, соблюдается условие 2, рассчитывает смещение, расположение центра O относительно OO : $X_{oi} = r_{\sin X(i)} + R_{1(i)} \cdot \sin\varphi_{1(i)}$; $Y_{oi} = r_{\cos X(i)} + R_{1(i)} \cdot \cos\varphi_{1(i)}$. С полным текстом программы, созданной на языке Python, можно ознакомиться по ссылке: <https://cloud.mail.ru/public/Aueb/wScTJMM3e>.

Обсуждение

Теоретические расчёты и алгоритм подтверждаются виртуальной кинематической моделью, отображающей качение не круглого тела на двух роликоопорах, с которой можно ознакомиться по ссылке: <https://ok.ru/video/2723975596609>, скриншот с видео размещён ниже (рис. 6).

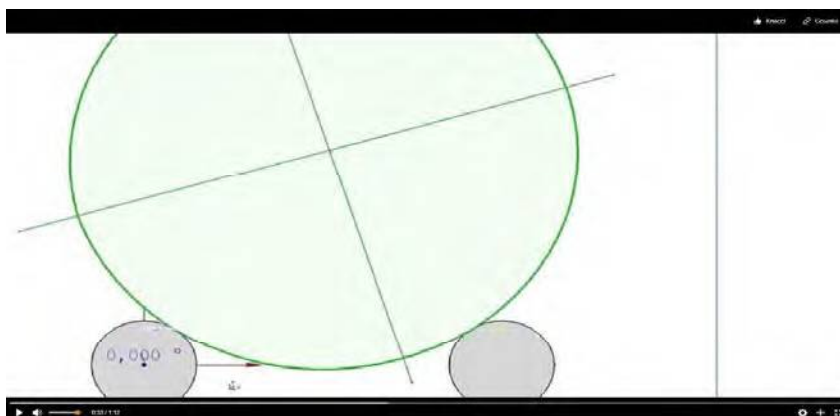


Рис. 6. Моделирование качения не круглого тела на двух роликоопорах

Fig. 6. Modeling the rolling of a non-circular body on two idlers

Моделирование качения некруглого тела на двух роликоопорах выполнено на основе описанного выше алгоритма, в среде FREECAD, объемная модель, используемая в задаче, представлена на рис. 7.

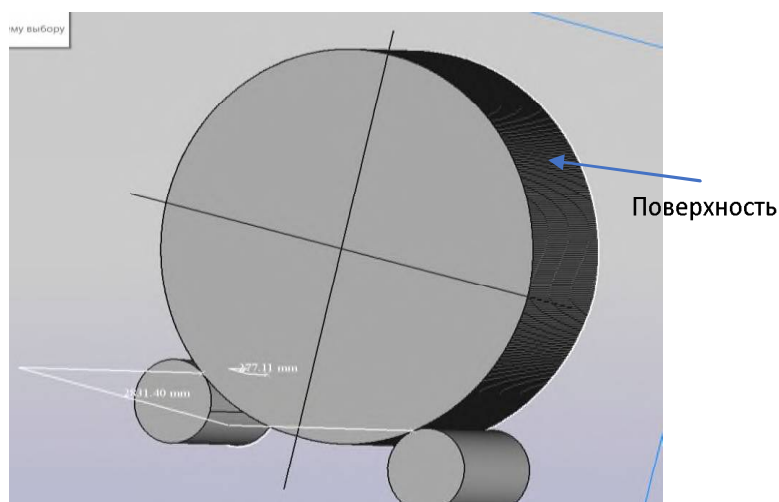


Рис. 7. Объёмная модель

Fig. 7. Volumetric model

Следует обратить внимание, что поверхность качения исследуемого тела состоит из рёбер, количество которых определяется количеством задаваемых радиусов, фрагмент программы [12] или макроса, воссоздающий этот профиль, представлен ниже:

#Замыкаем профиль

```
App.getDocument('Rings').getObject('Sketch').addGeometry(Part.LineSegment(App.Vector(XC[1], YC[1],0),App.Vector( XC[0],YC[0],0)),False)
App.getDocument('Rings').recompute()
App.getDocument('Rings').getObject('Body').newObject('PartDesign::Pad','Pad')
App.getDocument('Rings').getObject('Pad').Profile = App.getDocument('Rings').getObject('Sketch')
App.getDocument('Rings').getObject('Pad').Length = 1000.0
App.ActiveDocument.recompute()
```

Результатами работы программы являются:

- кадры изображения положения тела на роликоопорах, из которых создается gif-файл;
- график координат мгновенного центра, представленный на рис. 8.

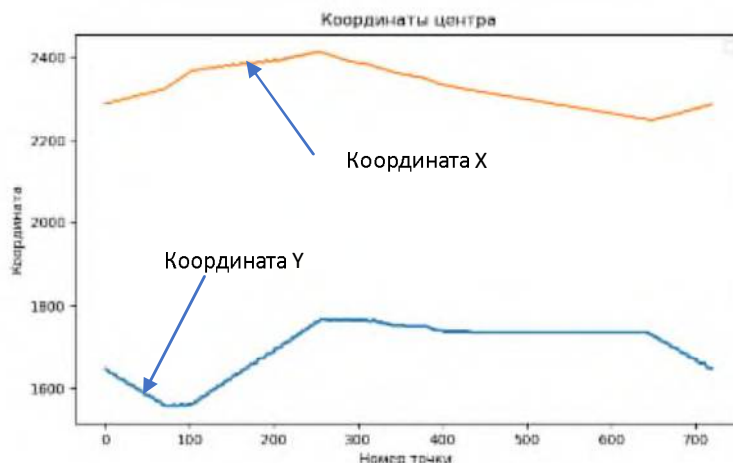


Рис. 8. Координаты мгновенного центра вращения
Fig. 8. Coordinates of the instantaneous center of rotation

Заключение

Изложенный в работе метод получения визуальной кинематической модели, на основе аналитического описания качения не круглого тела, или, точнее – не идеально круглого тела, можно считать прямой задачей, а в качестве обратной задачи можно рассматривать вычисление (определение) профиля катящегося тела, расположенного на двух роликоопорах. Полученная при решении прямой задачи кинематическая модель используется в процессе обучения нейронной сети [14], обрабатывающей результаты измерений реального катящегося тела.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Погонин, А.А. Технология ремонта крупногабаритных корпусных деталей металлургического оборудования / А.А. Погонин, М.С. Чепчуров, С.В. Старостин, А.Г. Схиртладзе, - Текст (визуальный) : непосредственный // Ремонт. Восстановление. Модернизация. -2005. -№2. -С. 20-22.
2. ОСТ 22-170-87. Бандажки вращающихся печей. Технические условия : отраслевой стандарт : дата введения 1887-07-01. — 96 с. – Текст (визуальный) : непосредственный.
3. ГОСТ 18322-2016. Система технического и ремонта техники. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2017-09-01. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2017. — 14 с. – Текст (визуальный) : непосредственны.
4. Бурмистров, Е.В. Измерение отклонений формы цилиндрических поверхностей: Метод. указания к лаб. работе / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева; сост. Е. В. Бурмистров. - Самара, 2001. - 20 с.

References:

1. Pogonin A.A., Chepchurov M.S., Starostin S.V., Skhirtladze A.G. Technology of Repair of Large-Sized Case Parts of Metallurgical Equipment. Repair. Reconditioning. Modernization. 2005;2:20-22.
2. OST 22-170-87. Bandages for Rotating Furnaces. Specifications: Industry Standard; 1987.
3. GOST 18322-2016. Maintenance and Repair System of Engineering. Terms and Definitions: National Standard of the Russian Federation. Moscow: Standartinform; 2017.
4. Burmistrov E.V. Measurement of Deviations in the Cylindrical Surface Shape. Samara: Samara State Aerospace University; 2001.

5. Диагностический комплекс «Горячая выверка» : ММК «МОСИНТРАСТ»: сайт. -2017. - URL: <https://mosintrast.ru/upload/Diagnostika.pdf> (дата обращения 30.03.2022).
6. Энциклопедия по машиностроению. Овальность: сайт.-2021. -URL: <https://mash-xxl.info/info/3102>(дата обращения 30.03.2022).
7. ГОСТ 24642-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположение поверхностей. Основные термины и определения : межгосударственный стандарт дата введения 1981-07-01. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 1981 — 45 с. – Текст (визуальный) : непосредственны.
8. Чепчуrow, М.С. Обработка деталей с неравномерным по структуре материалом припуска / М.С. Чепчуrow, - Текст (визуальный): непосредственный // Технология машиностроения. -2008. -№10. -С. 12-14.
9. Хуртасенко, А.В. Методика определения форма наружной поверхности качения опор технологических барабанов/ А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, С.П. Тимофеев.-Текст (визуальный) : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова.-2015. -№3. - С. 85-89.
10. Гончаров, М.С. Кинематическая модель механической обработки бандажа технологического барабана / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко. -Текст (визуальный): непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета.-2017. -№2. - С. 21-31.
11. Голубев, О.П. Определение оптимального интервала дискретизации при контроле круглость деталей / О.П. Голубев, А.П. Голубев, В.Н. Лохманов, В.И. Беляев. - Текст (визуальный): непосредственный // Сервис в России и зарубежом.-2013.-№1. - С. 191-198.
12. Ночка, Е.И. Основы алгоритмизации и программирования на языке Питон. Учебник / Е. И. Ночка: Москва. -2017. -208 с. - ISBN: 978-5-906818-75-1. - Текст (визуальный): непосредственный.
13. Чепчуrow, М.С. Программа моделирования качения некруглого тела роликсопорах / МС. Чепчуrow, А.М. Сумской // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021667915. - 08.11.2021. Заявка № 2021667035 от 26.10.2021.
14. Пишем нейросеть на Python с нуля: сайт. -2022. - URL: <https://proglib.io/p/pishem-neyroset-na-python-s-nulya-2020-10-07> (дата обращения 30.03.2022).
5. Diagnostic Complex «Hot Alignment» Company Group «MOSINTRAST» [Internet]. 2017 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://mosintrast.ru/upload/Diagnostika.pdf>.
6. Encyclopedia of Mechanical Engineering. Ovality [Internet]. 2021 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://mash-xxl.info/info/3102>.
7. GOST 24642-81. Basic Norms of Interchangeability. Tolerances of Form and Position. Basic Terms and Definitions. Moscow: Standartinform; 1981.
8. Chepchurov M.S. Processing of Parts with Allowance Material Uneven in Structure. Mechanical Engineering Technology. 2008;10:12-14.
9. Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Timofeev S.P. Method for Determining the Shape of the Outer Rolling Surface of the Technological Drum Supports. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015;3:85-89.
10. Goncharov M.S., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V. Kinematic Model of Technological Drum Shroud Machining. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;2:21-31.
11. Golubev O.P., Golubev A.P., Lokhmanov V.N., Belyaev V.I. Finding Optimum Sampling Interval as Part Roundness Control. Services in Russia and Abroad. 2013;1:191-198.
12. Nochka E.I. Fundamentals of Algorithmization and Python Programming. Moscow; 2017.
13. Chepchurov M.S., Sumskey A.M. The Program for Modeling the Non-Circular Body Rolling on Roller Bearings. The Certificate on Official Registration of the Computer Program in Russia No 2021667915; 2021.
14. How to Code a Neural Network from Scratch in Python [Internet]. 2022 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://proglib.io/p/pishem-neyroset-na-python-s-nulya-2020-10-07>.

Информация об авторах:

Михаил Сергеевич Чепчуrow
доктор технических наук, профессор БГТУ им. В. Г. Шухова.
Александр Михайлович Сумской
заместитель директора, Политехнический колледж №8 им. И.Ф. Павлова.
Юлия Алексеевна Жигулина
аспирант, БГТУ им. В. Г. Шухова.
Денис Викторович Подпрытов
аспирант, БГТУ им. В. Г. Шухова.

Information about authors:

Mikhail Sergeevich Chepchurov
Doctor of Technical Sciences, Professor.
Alexander Mikhailovich Sumskey
Deputy Director.
Julia Alekseevna Zhigulina
post-graduate student.
Denis Viktorovich Podpryatov
post-graduate student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.04.2022; одобрена после рецензирования 20.05.2022; принята к публикации 03.06.2022.

The article was submitted 29.04.2022; approved after reviewing 20.05.2022; accepted for publication 03.06.2022.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, профессор, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Technical University.