

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ СИЛ ПО ТОЧКАМ КОНТАКТА ЗВЕНЬЕВ МЕХАНИЗМОВ С ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМОЙ ТЕЛ КАЧЕНИЯ В ЗОНЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ДИАМЕТРОВ

Мерко М.А.¹, Меснянкин М.В.¹, Митяев А.Е.¹, Колотов А.В.¹

¹ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79), e-mail: markus444@yandex.ru, m.merko@mail.ru

Проведен анализ состояния рассматриваемой проблемы. Приводится решение задачи по определению величин статических сил, действующих в точках контакта дорожек качения обоих колец с телами качения с максимальными диаметрами, расположенных в пределах зоны силового нагружения механизмов с ЗСТК. Составлена расчетная модель, получены формулы для расчета величин статических сил и установлены возможные диапазоны их значений для обоих направлений ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров, а также как при наличии, так и при отсутствии зазора между телами качения для любого вида симметричной структурной схемы механизма. Полученные результаты позволят обеспечить работоспособность приводов технологического оборудования на базе механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины, обладающих требуемыми свойствами и показателями качества. Разработан программный комплекс «Эксцентрик» зарегистрированный в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности России (РОСПАТЕНТ), позволяющий повысить эффективность процесса реализуемых вычислений для механизмов рассматриваемого вида.

Ключевые слова: замкнутая система тел качения, механизм с замкнутой системой тел качения, тела качения, сепаратор, дорожка качения, статические силы.

DISTRIBUTION STATIC FORCES AT THE CONTACT POINTS OF THE LINKS IN THE MECHANISMS WITH A CLOSED SYSTEM OF ROLLING ELEMENTS IN THE ZONE OF MAXIMUM DIAMETER

Merko M.A.¹, Mesnyankin M.V.¹, Mityaev A.Y.¹, Kolotov A.V.¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia (660041, Krasnoyarsk, Svobodny Prospect, 79), e-mail: markus444@yandex.ru, m.merko@mail.ru

The analysis of the status of the problem Present of determining the values of the static forces acting at the contact points both rings raceways , rolling elements , with a maximum diameter , located in the area of power load mechanisms A closed system of rolling elements. Made a calculation model, the obtained formulas to calculate values of the static forces and installed possible their value ranges for both directions of entering amendments in the calculation of the nominal values of geometrical parameters, as well as in the presence and in the absence of the gap between rolling elements for any type of symmetric structural scheme of the mechanism. The get results will allow for performance drives the process equipment on the basis of mechanisms with closed system of rolling elements with diameters of different size with the required properties and quality indicators. Was developed a program “Eccentric”, registered in the Register of programs of the Russian Federal Service for Intellectual Property. This program allows improving the efficiency of calculations for the mechanisms of this species.

Keywords: rolling body closed system, mechanism with rolling body closed system, rolling body, cage, raceway, static forces.

Введение

Работоспособность технологического оборудования обеспечивается рядом параметров механизма привода, основными из которых являются силовые параметры. Внешние силы и моменты пар внешних сил, приложенные к звеньям механизма, должны обеспечивать передачу движения между ними с требуемыми кинематическими параметрами согласно заданным законам движения. Величины силовых факторов в зонах контакта звеньев зависят от особенностей структуры и условий дальнейшей эксплуатации механизма.

Результатом силового взаимодействия звеньев механизмов являются силовые параметры, которые подразделяются на статические и динамические силы. Статические силовые факторы условно считаются постоянными величинами, а динамические силовые факторы изменяют свои значения пропорционально скорости движения звеньев, содержащихся в структуре механизма. Процесс модернизации и развития промышленного потенциала России показывает актуальность поиска новых структурных схем механизмов, позволяющих реализовывать сложные движения звеньев при минимально возможном числе подвижных соединений. Это дает возможность формировать приводы технологического оборудования с требуемыми свойствами и показателями качества, что возможно только при правильном определении силовых параметров механизмов используемого вида. Перечисленным свойствам соответствуют механизмы с замкнутой системой тел качения (ЗСТК). Механизмы данного вида обладают структурой, которая образована совокупностью двух колец с дорожками качения, сепаратора (водило) и тел качения с диаметрами равной или разной величины, которые могут обладать гладкими рабочими поверхностями (фрикционные) [1; 3-10] или поверхностями с выступами (зубчатые) [2]. Коллектив авторов проводит исследования геометрических и кинематических параметров исполнительных механизмов технологического оборудования, разработанного на базе механизмов с ЗСТК с диаметрами разной (эксцентриковые) [1-2; 7-10] или равной (соосные) [3-6] величины. В ходе исследований [1-10] установлено, что задача определения номинальных значений геометрических параметров механизмов с ЗСТК имеет решение только при двух направлениях ввода поправки, т.е. либо $R_H \neq \text{const}$, либо $R_B \neq \text{const}$.

Для механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины характерно наличие нескольких видов симметричных структурных схем механизмов (рис. 1).

Наличие сепаратора в структуре механизмов с ЗСТК (рис. 1) позволяет исключить контакт тел качения друг с другом, обеспечив между ними наличие зазора. Передача движения между звеньями в этом случае осуществляется посредством непосредственного контакта тел качения с дорожками качения обоих колец. Механизмы данного вида относятся к фрикционным эпициклическим механизмам. В этом случае для обеспечения работоспособности механизмов с ЗСТК, обладающих требуемыми свойствами и показателями качества, необходимо сформировать достаточное по величине прижатие контактирующих поверхностей звеньев, что возможно только при правильном определении статических и динамических силовых параметров.

Настоящее исследование проводится с целью разработки алгоритма расчета величин статических сил, действующих в точках контакта дорожек качения обоих колец с телами качения, расположенных в пределах зоны силового нагружения максимальных

диаметров механизмов с ЗСТК. Полученный алгоритм обеспечивает учет обоих направлений ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров, а также наличие или отсутствие зазора между телами качения. Результаты позволят обеспечить работоспособность приводов технологического оборудования на базе механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины для любого вида симметричной структурной схемы (рис. 1), обладающих требуемыми свойствами и показателями качества.

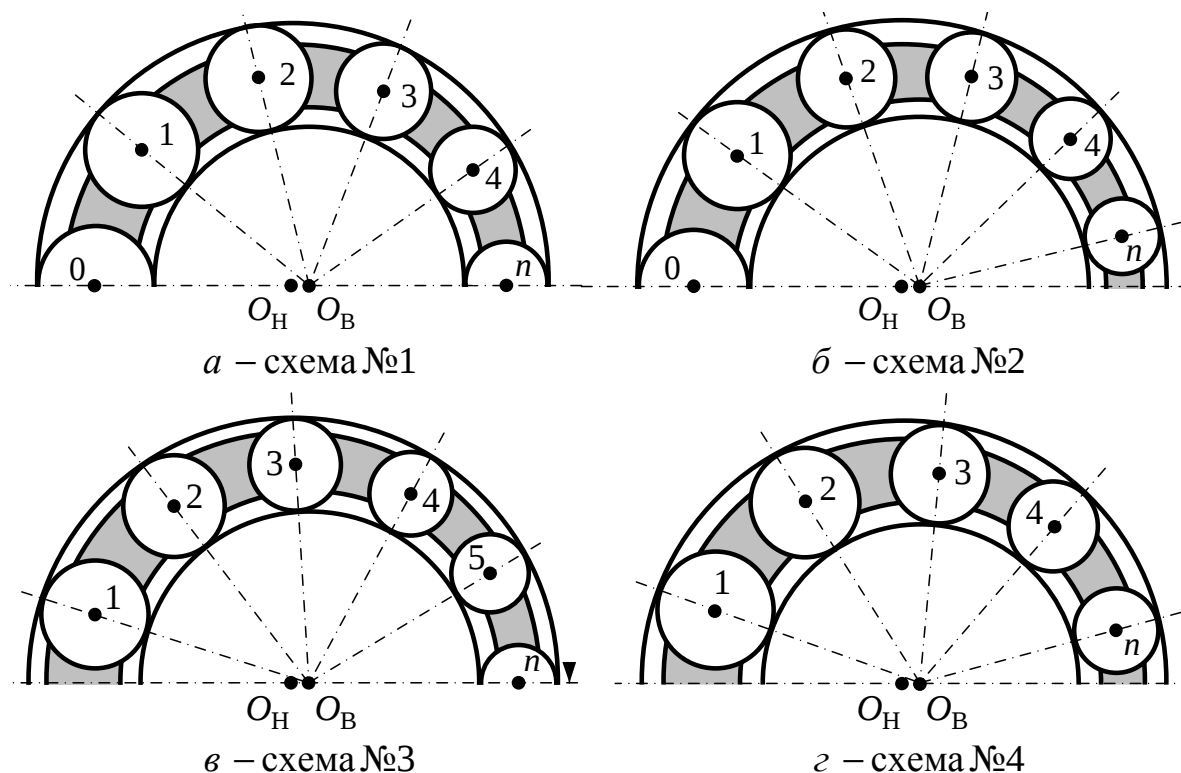


Рис. 1. Виды симметричных структурных схем механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины

Методы исследования, применяемые в настоящей работе, основаны на принципах силового анализа эпициклических фрикционных механизмов при использовании положений геометрии и тригонометрии.

В соответствии с вышеуказанной целью рассмотрим ход решения поставленной задачи на примере расчета величин статических сил при действии внешней радиальной силы на внутреннее кольцо механизма с ЗСТК. При этом учитываем оба направления ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров как при наличии зазора между телами качения, так и при отсутствии в структуре данного параметра для всех видов симметричных структурных схем (рис. 1). Составим расчетную модель (рис. 2) и примем следующие исходные условия и обозначения: все звенья являются абсолютно твердыми телами; $ДК_B$, $ДК_H$ – дорожки качения внутреннего и наружного колец; R_B , R_H , O_B и

O_H – радиусы и геометрические центры дорожек качения внутреннего и наружного колец; e – эксцентриситет; S – сепаратор (водило); c – зазор между телами качения; $r_0, r_1, r_i, 0, 1, i, 0_B, 1_B, i_B$ и $0_H, 1_H, i_H$ – радиусы, геометрические центры и точки контакта максимального, первого и i -го тел качения с дорожками качения внутреннего и наружного колец; β_i и α_i – углы положения i -го тела качения; γ_i – угол клина, образованный дорожками качения колец; $X_B O_B Y_B$ – неподвижная система координат с центром в точке O_B ; Q – внешняя радиальная сила, действующая на внутреннее кольцо.

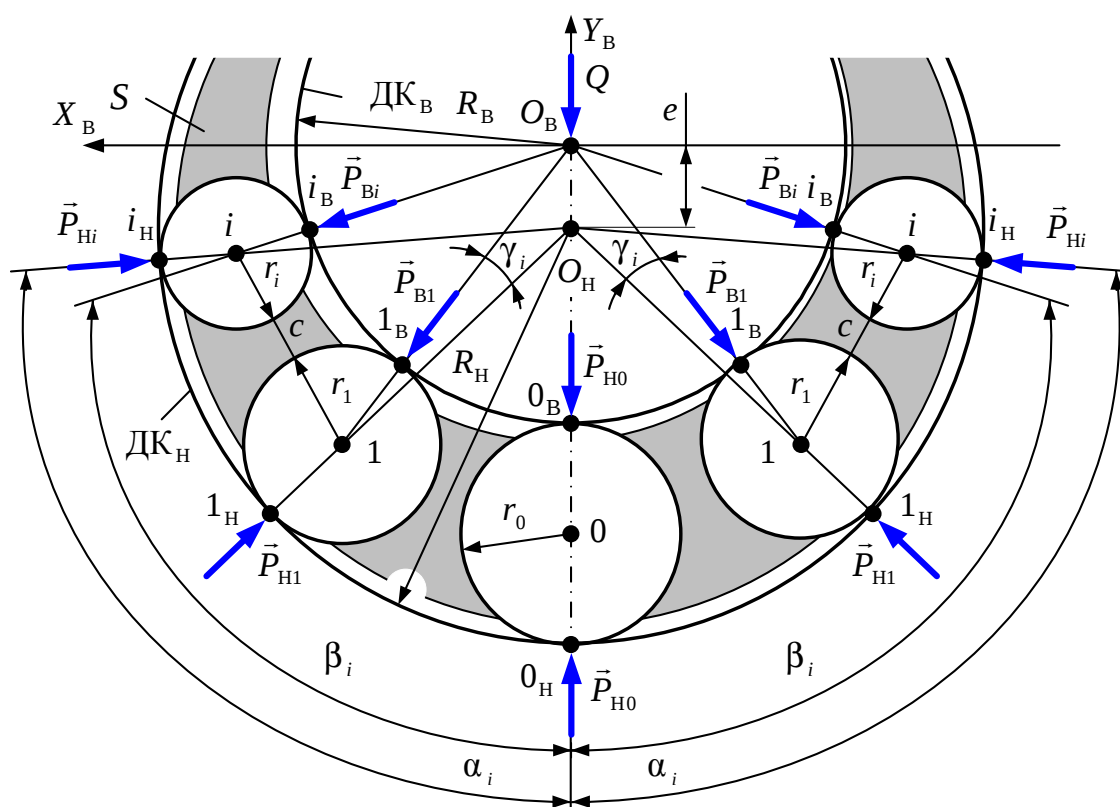


Рис. 2. Расчетная модель механизма с ЗСТК для зоны максимальных диаметров

Анализ расчетной модели (рис. 2) при рассматриваемых условиях показывает, при действии на внутреннее кольцо механизма с ЗСТК внешней радиальной силы Q максимальное тело качения находится под действием двух статических сил $\vec{P}_{B0}$ и $\vec{P}_{H0}$, приложенных в точки 0_B и 0_H соответствующие точкам контакта этого ролика с дорожками качения внутреннего и наружного колец. При этом полученные силовые факторы будут равны по величине, т.е. $P_{H0} = P_{B0}$. В тоже время i -е тело качения находится под действием двух статических сил $\vec{P}_{Bi}$ и $\vec{P}_{Hi}$, приложенных в точки i_B и i_H , соответствующие точкам контакта этого ролика с дорожками качения внутреннего и наружного колец. Так как точки

i_B и i_H не лежат на одной прямой, то силовые факторы не будут равны по величине, т.е. $P_{Hi} \neq P_{Bi}$. Для определения величин силовых факторов представим уравнение силового равновесия всех статических сил, действующих в точках контакта дорожки качения внутреннего кольца с телами качения в зоне максимальных диаметров. В результате преобразования уравнения силового равновесия в соответствии с работой [1] будем иметь

$$Q = P_{B0} + 2 \sum_{i=1}^n [P_{Bi} \cos(\beta_i)], \quad (1)$$

где n – число тел качения механизма с ЗСТК в пределах половины зоны силового нагружения тел качения с максимальными диаметрами, соответствующей углу положения тел качения (β_i) в пределах от 0° до 90° .

В соответствии с работами [1] статические силы, приложенные в точки i_B и i_H , в пределах половины зоны силового нагружения тел качения с максимальными диаметрами, представим как

$$P_{Bi} = P_{B0} \frac{r_i}{r_0} \cos(\beta_i), \quad (2)$$

$$P_{Hi} = \frac{P_{Bi} \cdot \cos(\beta_i)}{\cos(\alpha_i)}. \quad (3)$$

С учетом равенства (2), выражение (1) примет вид

$$Q = P_{B0} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^n [t_i \cdot \cos^2(\beta_i)] \right], \quad (4)$$

здесь t_i – геометрический параметр тел качения, определяемый по формуле

$$t_i = \frac{r_i}{r_0}. \quad (5)$$

Проведя преобразование равенства (4), получим

$$P_{B0} = \frac{Q}{S_B}, \quad (6)$$

где S_B – геометрический параметр механизма с ЗСТК, определяемый по формуле

$$S_B = 1 + 2 \sum_{i=1}^n [t_i \cdot \cos^2(\beta_i)]. \quad (7)$$

Выражение (6) позволит рассчитать значения статических сил $\vec{P}_{B0}$ и $\vec{P}_{H0}$, приложенных в точки 0_B и 0_H , соответствующие точкам контакта максимального тела качения с дорожками качения обоих колец, принимающих одинаковые значения.

Подставив в формулу (2) равенство (6), получим

$$P_{Bi} = \frac{Q}{S_B} t_i \cdot \cos^2(\beta_i). \quad (8)$$

С учетом выражения (8) приведем формулу (3) к виду

$$P_{Hi} = \frac{Q \cdot t_i \cdot \cos^3(\beta_i)}{S_B \cdot \cos(\alpha_i)}. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) позволяют рассчитать значения статических сил, приложенных в точки i_B и i_H , соответствующие точкам контакта i -го тела качения с дорожками качения обоих колец, в пределах половины зоны силового нагружения тел качения с максимальными диаметрами. Геометрические параметры тел качения механизма с ЗСТК в выражениях (8) и (9) рассчитываются по формулам (5) и (7) соответственно.

Используя программный комплекс «Эксцентрик», по формулам (5)-(9) выполняем расчет величин статических сил, приложенных в точки, соответствующие точкам контакта тел качения с дорожками качения обоих колец, расположенных в пределах половины зоны силового нагружения тел качения с максимальными диаметрами. Вычисления проводим для всех видов симметричных структурных схем механизмов рассматриваемого вида для обоих направлений ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров как при наличии зазора между телами качения, так и при отсутствии в структуре данного параметра. При расчетах считаем, что механизм с ЗСТК обладает основными геометрическими параметрами $R_H = 100$ мм, $R_B = 50$ мм, $e = 6$ мм, $c = 6$ мм, а внешняя радиальная сила $Q = 10000$ Н. По полученным результатам выполняем синтез диаграмм статических сил в зоне максимальных диаметров механизмов с ЗСТК (рис. 3).

Анализ диаграмм статических сил, действующих в точках контакта тел качения с максимальными диаметрами с дорожками качения внутреннего кольца (рис. 3, кривые 1_в, 2_в, 3_в, 4_в) и наружного кольца (рис. 3, кривые 1_н, 2_н, 3_н, 4_н), показывает на незначительное расхождение их величин пропорциональное изменению угла клина (γ_i). Совпадение значений сил для кривых 1_в и 1_н, а также 2_в и 2_н наблюдается только для максимального тела качения, находящегося в зоне силового нагружения независимо от наличия или отсутствия зазора между телами качения. Наличие зазора между телами качения приводит к смещению кривых 2_в и 2_н, а также 3_в и 3_н вдоль оси радиусов тел качения в направлении роста значений этих параметров.

Дальнейший анализ диаграммы (рис. 3) показывает, что рост значений радиусов тел качения приводит к увеличению величины статических сил. Особенности состава структуры каждого вида механизма с ЗСТК (рис. 1) с диаметрами разной величины и направление ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров не оказывают влияния на вид кривых статических сил в зоне максимальных диаметров, однако сказываются на

диапазонах их величин. Так, диапазон значений статических сил, соответствующий кривым 1_B и 1_H , объясняется наличием в структуре механизма на горизонтальной оси симметрии максимального и минимального тел качения и наибольшим числом тел качения в зоне силового нагружения.

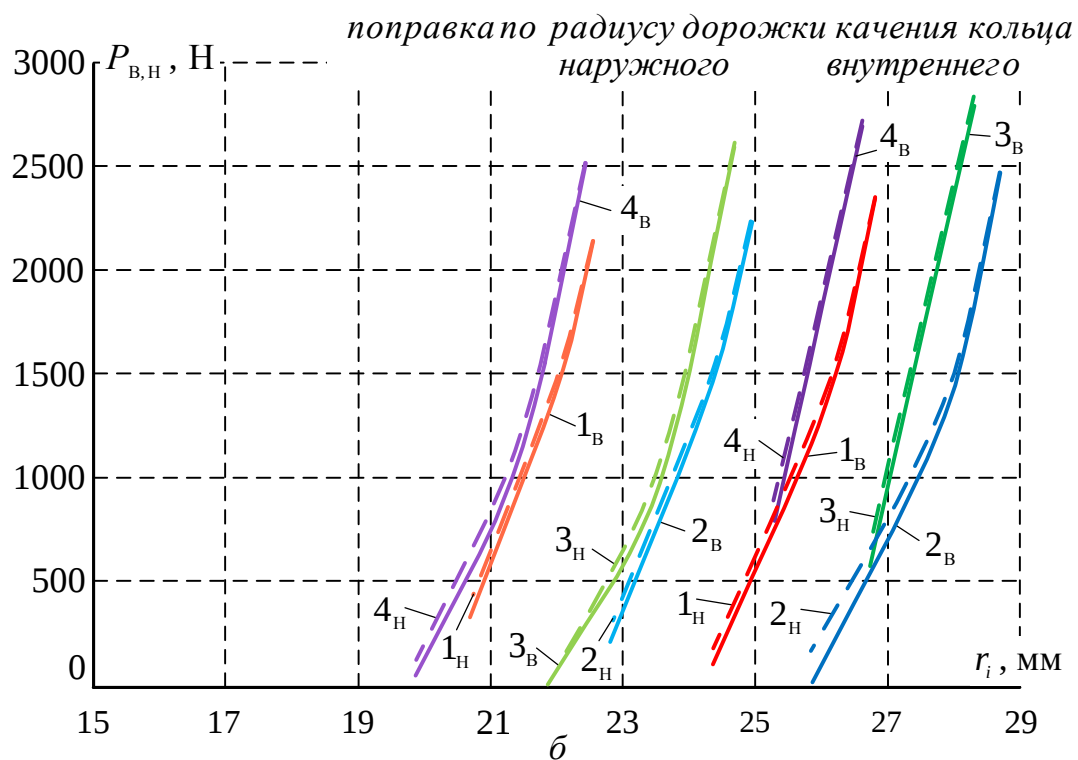
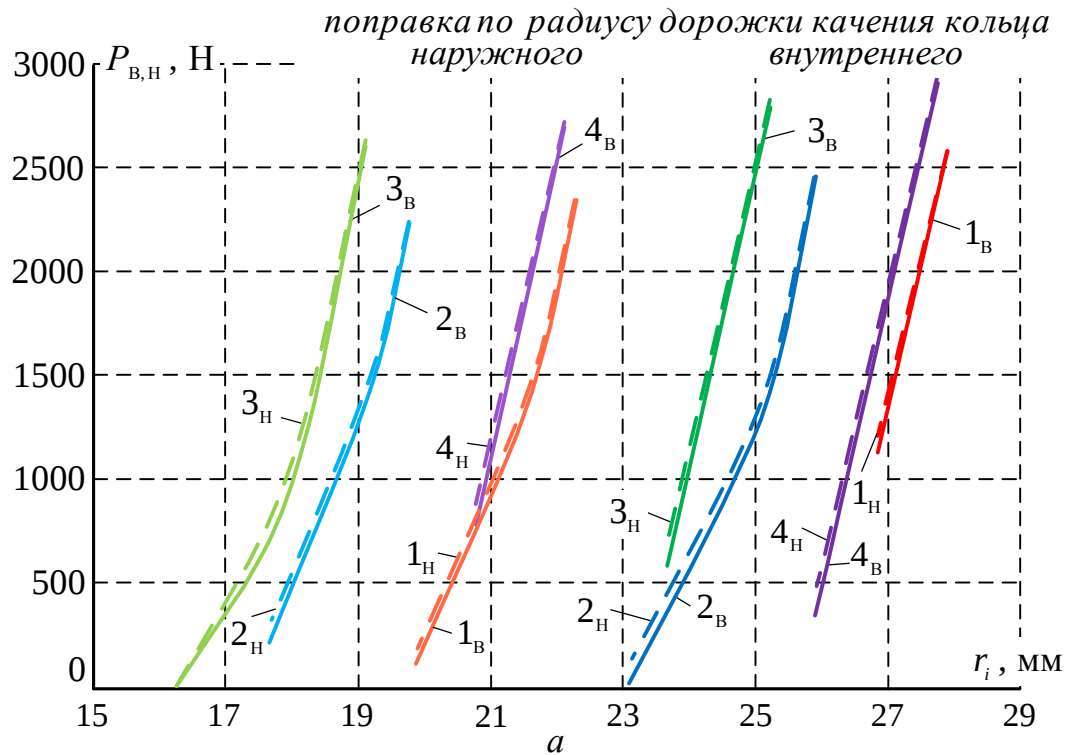


Рис. 3. Диаграммы статических сил для зоны максимальных диаметров механизмов с ЗСТК: а – с зазором между телами качения, б – без зазора

Кривым $2_{\text{в}}$ и $2_{\text{н}}$ (рис. 3) соответствует диапазон статических сил, сформированный в результате роста минимальных значений при уменьшении границы максимальных величин статических сил. Это является следствием расположения на горизонтальной оси симметрии только максимального тела качения и снижением величин радиусов тел качения при аналогичном их числе в зоне силового нагружения. Диапазон значений статических сил, соответствующий кривым $3_{\text{в}}$ и $3_{\text{н}}$, объясняется наличием в структуре механизма с ЗСТК на горизонтальной оси симметрии только минимального тела качения. Рост максимальных величин при уменьшении границы минимальных значений статических сил является следствием снижения величин радиусов тел качения при увеличении их числа в зоне силового нагружения. Кривым $4_{\text{в}}$ и $4_{\text{н}}$ соответствует диапазон статических сил, сформированный в результате отсутствия на горизонтальной оси симметрии и максимального, и минимального тел качения. Рост минимальных значений при уменьшении границ максимальных величин статических сил вызван сокращением числа тел качения в зоне силового нагружения при увеличении величин их радиусов.

Заключение. В результате получены формулы для расчета величин статических сил, приложенных в точки контакта дорожек качения обоих колец с телами качения с максимальными диаметрами, расположенных в пределах зоны силового нагружения для любого вида симметричной структурной схемы механизмов с ЗСТК (рис. 1). Данные вычисления можно выполнять для обоих направлений ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров как при наличии зазора между телами качения, так и при отсутствии в структуре данного параметра. Установлен характер изменения и диапазон возможных значений статических сил данного вида. Это позволяет обеспечить работоспособность приводов технологического оборудования, разработанных на базе механизмов с ЗСТК, обладающих требуемыми свойствами и показателями качества.

Список литературы

1. Мерко М.А. Кинематические и геометрические характеристики эксцентрикового механизма качения : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. - Красноярск, 2002. - 26 с.
2. Мерко М.А., Беяков Е.В., Колотов А.В., Меснянкин М.В., Митяев А.Е. Повышение качества обработки плоских поверхностей шлифовальной машиной с эксцентриковым эпициклическим механизмом // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. - 2013. - Т. 3, № 1. - С. 15-19.
3. Мерко М.А., Меснянкин М.В., Колотов А.В. Формирование областей существования механизма с ЗСТК с диаметрами равной величины с сепаратором (водило) при вводе поправки по дорожке качения внутреннего кольца // Актуальные проблемы гуманитарных и

естественных наук. - 2013. - № 4. - С. 54-58.

4. Мерко М.А., Меснянкин М.В., Колотов А.В., Кайзер Ю.Ф., Лысянников А.В. Корректировка расчета геометрических параметров механизмов с ЗСТК по радиусу дорожки качения внутреннего кольца // Современные проблемы науки и образования. - 2013. - № 6. - URL: www.science-education.ru/113-11778.

5. Мерко М.А., Меснянкин М.В., Кайзер Ю.Ф., Колотов А.В., Митяев А.Е., Лысянников А.В., Кузнецов А.В. Передаточные отношения планетарных механизмов с ЗСТК с диаметрами равной величины при ведущем внутреннем кольце и вводе поправки по радиусу дорожки качения этого же звена // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 1. - URL: www.science-education.ru/115-12219.

6. Меснянкин М.В., Мерко М.А., Колотов А.В., Митяев А.Е. Моделирование результатов решения задачи по определению номинальных величин геометрических параметров симметричных структурных схем механизмов с ЗСТК с диаметрами равной величины // Молодой ученый. - 2013. - № 7. - С. 60-65.

7. Меснянкин М.В., Мерко М.А., Колотов А.В., Митяев А.Е. Скорости скольжения точек контакта звеньев механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины при ведущем наружном кольце и вводе поправки по радиусу дорожки качения этого же звена // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 2. - URL: www.science-education.ru/116-12979.

8. Меснянкин М.В., Мерко М.А., Колотов А.В., Митяев А.Е. Результаты решения задачи о положениях звеньев ЭМК при ведущем внутреннем кольце // Вестник Таджикского технического университета. - 2013. - № 1. - С. 35-41.

9. Меснянкин М.В., Мерко М.А., Колотов А.В., Митяев А.Е. Условия симметрии механизмов с замкнутой системой тел качения // Вестник Таджикского технического университета. - 2013. - № 3. - С. 29-34.

10. Меснянкин М.В., Мерко М.А., Колотов А.В., Митяев А.Е., Белякова С.А. Определение границ областей существования механизма-прототипа ЭМК без сепаратора при вводе поправки по дорожке качения наружного кольца // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. - 2013. - Т. 3, № 1. - С. 33-38.

Рецензенты:

Меновщиков В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Прикладная механика», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Еркаев Н.В., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Прикладная механика», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.