УДК 621.838.2

АНАЛИЗ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПЛОЩАДКАХ КОНТАКТА ЗВЕНЬЕВ МЕХАНИЗМОВ С ЗСТК ПРИ ВЕДУЩЕМ ВНУТРЕННЕМ КОЛЬЦЕ И ВВОДЕ ПОПРАВКИ ПО РАДИУСУ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ НАРУЖНОГО КОЛЬЦА

Мерко М.А., Месснянкин М.В., Колотов А.В., Митяев А.Е., Савицкая М.В., Мерко А.М., Юров С.А.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: m.merko@mail.ru, mesmark@yandex.ru

Проведен анализ состояния рассматриваемой проблемы. Приводится решение задачи по определению нормальных напряжений на площадках контакта звеньев механизмов с замкнутой системой тел качения с диаметрами разной величины при ведущем внутреннем кольце для любого вида симметричной структурной схемы. Получены формулы для расчета нормальных напряжений на площадках контакта и приведенного радиуса кривизны контактирующих поверхностей звеньев механизмов данного вида. Установлен диапазон их возможных значений при вводе поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров по радиусу дорожки качения наружного кольца. Результаты позволяют формировать приводы технологического оборудования на базе механизмов с замкнутой системой тел качения, обладающих требуемой грузоподъемностью. Разработан программный комплекс «Эксцентрик», зарегистрированный в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности России (РОСПАТЕНТ), позволяющий повысить эффективность как научных исследований, так и конструкторских разработок.

Ключевые слова: замкнутая система тел качения, механизм с замкнутой системой тел качения, тела качения, сепаратор, дорожка качения, зона контакта, площадка контакта, нормальные напряжения

THE ANALYSIS OF NORMAL TENSION ON PLATFORMS OF CONTACT OF LINKS OF MECHANISMS WITH THE CLOSED SYSTEM OF BODIES OF SWING AT THE LEADING INTERNAL RING AND INPUT OF THE AMENDMENT ON THE RADIUS OF THE PATHS OF SWING OF THE EXTERNAL RING

Merko M.A., Mesnyankin M.V., Kolotov A.V., Mityaev A.E., Savitskaya M.V., Merko A.M., Yurov S.A.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: m.merko@mail.ru, mesmark@yandex.ru

The analysis of a condition of the considered problem is carried out. The solution of a task of determination of normal tension on platforms of contact of links of mechanisms with the closed system of bodies of swing with diameters of different size at the leading internal ring for any kind of the symmetric block diagram is provided. Formulas for calculation of normal tension on platforms of contact and the specified radius of curvature of the contacting surfaces of links of mechanisms of this look are received. Range of their possible values at input of the amendment to calculation of nominal sizes of geometrical parameters for the radius of a path of swing of an external ring is established. Results allow to form the drive of processing equipment on the basis of mechanisms with the closed system of the bodies of swing having the required loading capacity. The program Clown complex registered in the Register of the computer programs of Federal Service for Intellectual Property of Russia (ROSPATENT), allowing to increase efficiency as scientific researches, so design developments is developed.

Keywords: rolling body closed system, mechanism with rolling body closed system, rolling body, cage, raceway, sliding speed, the area of contact, contact platform, normal voltage

Как отмечено авторами в работе [3], обеспечение радиальной грузоподъемности при снижении габаритных размеров и массы механизмов приводов технологического оборудования является приоритетным направлением модернизации предприятий России в условиях импортозамещения. Анализ напряженно-деформированного состояния контактирующих звеньев позволяет оценить грузоподъемность механизмов качения. Данное состояние является следствием возникновения роста концентрации нормальных напряжений, вызванных упругими деформациями, приводящими к образованию площадок контакта между звеньями механизма, что является следствием действия радиальной нагрузки на его ведущее звено. Напряженно-деформированное состояние вызывает усталостное старение материалов, а также создает предпосылки для образования областей повышенных напряжений на рабочих поверхностях контактирующих звеньев, чем оказывает отрицательное влияние на большинство показателей качества механизма. Использование многопоточных механизмов, обладающих новой структурой при минимально возможном числе подвижных звеньев,

позволяет минимизировать, а в ряде случаев и полностью исключать отрицательные явления, связанные с возникновением сложных напряженно-деформированных состояний. Эти обстоятельства выводят на новый этап развития науки и техники механизмы с замкнутой системой тел качения (ЗСТК). Структура механизмов данного вида образована совокупностью двух колец с дорожками качения, сепаратором (водило) и замкнутой системой тел качения с диаметрами как разной (эксцентриковые) [1–6, 8], так и равной величины (соосные) [7, 9]. Тела качения могут обладать гладкими рабочими поверхностями (фрикционные) или поверхностями с выступами (зубчатые). Для механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины характерно наличие нескольких видов симметричных структурных схем (рис. 1), каждая из которых может реализоваться как с зазором между телами качения, так и при его отсутствии.

Коллектив авторов проводит исследования геометрических, кинематических и силовых параметров приводов технологического оборудования, разработанных на базе механизмов с ЗСТК. В ходе исследований авторами установлено: задача определения номинальных величин геометрических параметров механизмов с ЗСТК должна решаться при начальных условиях, что исходные параметры являются постоянными величинами больше нуля [1, 4, 7]. Дальнейшие исследования показали, что для решения задачи по определению номинальных величин геометрических параметров при данных условиях необходим ввод поправки в расчет, считая один из исходных параметров величиной переменной. Вариация значениями радиуса тел качения и зазора между ними не позволяет достичь требуемого результата. В этом случае получаем, что решение задачи имеет два возможных направления ввода поправки, по радиусу дорожки качения наружного или внутреннего колец.

Настоящее исследование проводится с целью разработки алгоритма определения нормальных напряжений на площадках контакта звеньев механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины при ведущем внутреннем кольце для любого вида симметричной структурной схемы и вводе поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров по радиусу дорожки качения наружного кольца. Полученные результаты позволят формировать приводы технологического оборудования на базе механизмов с ЗСТК, обладающих требуемой радиальной грузоподъемностью.

Методы исследования, применяемые в настоящей работе, основаны на принципах силового анализа и методах определения грузоподъемности механизмов при использовании положений геометрии.

Рассмотрим определение нормальных напряжений на площадках контакта звеньев на примере механизма с ЗСТК с диаметрами разной величины при ведущем внутреннем кольце для любого вида симметричной структурной схемы и вводе поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров по радиусу дорожки качения

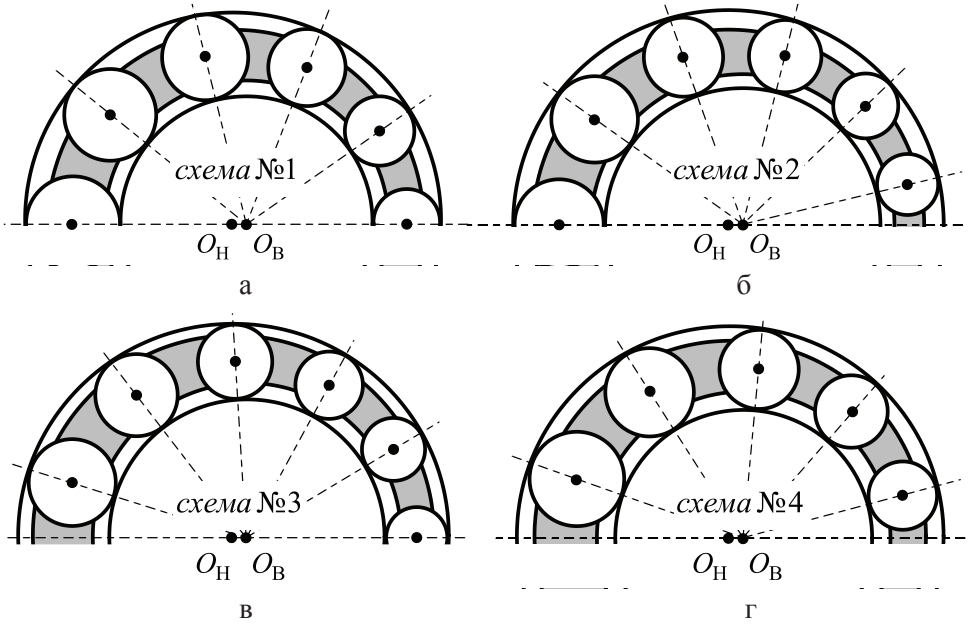

Рис. 1. Виды симметричных структурных схем механизмов с ЗСТК

наружного кольца. В этом случае внешняя радиальная нагрузка приложена к ведущему звену механизма, а условие прочности, согласно работе [3], имеет вид

$$\sigma_{max} \le [\sigma_{Н}], \quad (1)$$

где σ_{max} и $[\sigma_{Н}]$ – максимальное и допускаемое нормальные напряжения.

Для механизма с ЗСТК рассматриваемого вида имеет место контакт тел качения, выполненных в виде роликов, с дорожками качения обоих колец, имеющих цилиндрическую форму, следовательно, условие прочности (1) может быть представлено как

$$\sigma_{i(В,\ Н)} \le [\sigma_{Н}], \quad (2)$$

где $\sigma_{i(В,\ Н)}$ – нормальные напряжения на площадках контакта i-го тела качения с дорожками качения внутреннего и наружного колец.

Нормальные напряжения на площадках контакта i-го тела качения с дорожками качения обоих колец найдем по формуле

$$\sigma_{i(В,Н)} = \sqrt{\frac{E_i \cdot E_{д(В,Н)} \cdot F_{i(В,Н)}}{\pi \cdot \left(E_i\left(1-\mu_i^2\right) + E_{д(В,Н)}\left(1-\mu_{д(В,Н)}^2\right)\right) \cdot l_{рi} \cdot \rho_{i(В,Н)}}}, \quad (3)$$

здесь $F_{i(В,\ Н)}$ – сила, действующая в зоне контакта i-го тела качения с дорожкой качения внутреннего или наружного колец; E_i, $E_{д(В,\ Н)}$, μ_i и $\mu_{д(В,\ Н)}$ – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов i-го тела качения и внутреннего или наружного колец; $l_{рi}$ – длина рабочей части i-го тела качения; $\rho_{i(В,\ Н)}$ – приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей i-го тела качения с дорожкой качения внутреннего или наружного колец.

Приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей i-го тела качения с дорожкой качения, согласно работе [3], определим по выражениям:

– для внутреннего кольца

$$\rho_{i\,В} = \frac{r_i \cdot R_В}{R_В + r_i}, \quad (4)$$

– для наружного кольца

$$\rho_{i\,Н} = \frac{r_i \cdot R_Н}{R_Н - r_i}, \quad (5)$$

где r_i, $R_В$, $R_Н$ – радиусы i-го тела качения и дорожек качения внутреннего и наружного колец соответственно.

Для удобства дальнейшего анализа формулу (3) приведем к виду

$$\sigma_{i(В,Н)} = \sqrt{\frac{k_м \cdot F_{i(В,Н)}}{l_{рi} \cdot \rho_{i(В,Н)}}}, \quad (6)$$

здесь $k_м$ – коэффициент, учитывающий свойства материалов звеньев механизма с ЗСТК, определяемый по равенству

$$k_м = \frac{E_i \cdot E_{д(В,Н)}}{\pi \cdot \left(E_i\left(1-\mu_i^2\right) + E_{д(В,Н)}\left(1-\mu_{д(В,Н)}^2\right)\right)}. \quad (7)$$

Анализируя формулу (6), видим, что нормальные напряжения на площадках контакта i-го тела качения с дорожками качения обоих колец зависят от нормальной силы, длины рабочей части тел качения и приведённого радиуса кривизны, который рассчитывается по формулам (4) или (5).

Используя формулы (4)–(7), выполняем расчет величин нормальных напряжений на площадках контакта тела качения с дорожкой качения обоих колец для всех видов симметричных структурных схем (рис. 1) и вводе поправки в расчет геометрических параметров по радиусу дорожки качения наружного кольца. При вычислениях считаем, что внешняя суммарная радиальная нагрузка действует на ведущее внутреннее кольцо и равна $Q = 10$ кН. Коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов звеньев соответственно равны $\mu_i = \mu_{д(В,\ Н)} = 0{,}3$; $E_i = E_{д(В,\ Н)} = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа. Механизмы с ЗСТК обладают геометрическими параметрами: радиусы дорожек качения наружного ($R_Н = 100$ мм) и внутреннего ($R_В = 50$ мм) колец, эксцентриситет $e = 6$ мм, зазор между телами качения $c = 6$ мм. Длина рабочей части тел качения $l_{рi} = 20$ мм. С целью повышения эффективности процесса вычислений авторами разработано программное обеспечение в виде программного комплекса «Эксцентрик», зарегистрированного в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности Российской Федерации (РОСПАТЕНТ № 2012614197). По результатам вычислений выполняем синтез диаграммы (рис. 2) нормальных напряжений при ведущем внутреннем кольце для всех видов симметричных структурных схем механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины (рис. 1).

Анализ диаграммы (рис. 2) показывает, что все полученные кривые нормальных напряжений имеют параболический вид. При этом для любого вида симметричной структурной схемы механизма с ЗСТК (рис. 1) нормальные напряжения принимают большие значения на площадках контакта тел

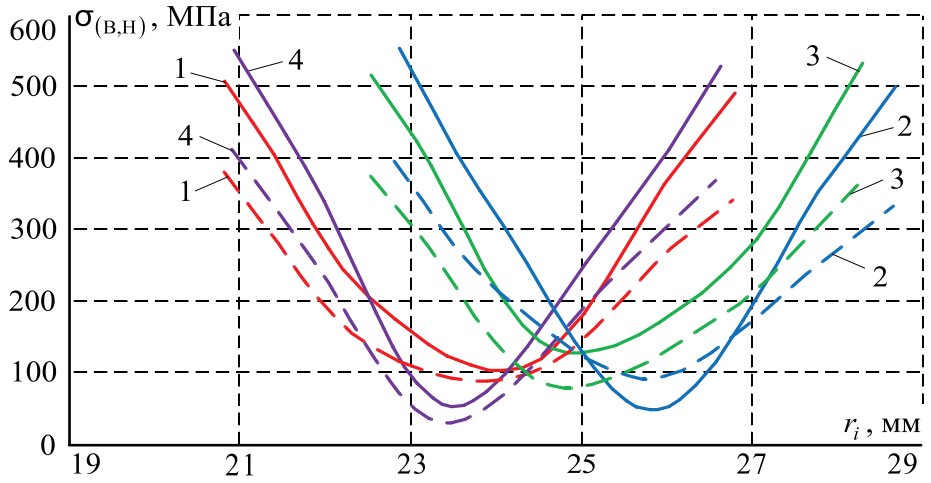

Рис. 2. Диаграмма нормальных напряжений для механизмов с ЗСТК при ведущем внутреннем кольце на площадках контакта тел качения с дорожками качения: ——— *внутреннего и* – – – *наружного колец*

качения с дорожкой качения внутреннего кольца. Это является следствием меньшей величины приведенного радиуса кривизны контактирующих поверхностей. Дальнейший анализ диаграммы показывает, что также для любого вида симметричной структурной схемы минимальные значения нормальных напряжений имеют место на площадках контакта тел качения, не расположенных на линии действия вектора внешней суммарной радиальной нагрузки. Максимальные величины для рассматриваемых напряжений наблюдаются на площадках контакта дорожек качения колец с телами качения минимального и максимального диаметров. При принятых условиях расчета максимальные контактные напряжения имеют для симметричных структурных схем механизмов с ЗСТК, представленных на рис. 1, *б*, г. В то же время для любого вида симметричной структурной схемы механизма рассматриваемого вида максимальные напряжения имеют место всегда на площадке контакта дорожек качения обоих колец с минимальным телом качения, находящегося на линии действия вектора внешней суммарной радиальной нагрузки. Данное явление означает, что радиальную грузоподъемность механизма с ЗСТК с диаметрами разной величины необходимо определять по нормальным напряжениям, которые имеют место на площадке контакта тела качения с минимальным диаметром при его контакте с внутренним кольцом. Сравнение полученных результатов с данными, установленными авторами в работе [3], показывают, что направление ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров не оказывает существенного влияния на величины нормальных напряжений. Так, введение поправки в расчет по радиусу дорожки качения наружного кольца приводит к росту тел качения, что отражается на диаграмме смещением кривых нормальных напряжений вдоль оси радиусов тел качения в направлении увеличения значений данных звеньев механизмов с ЗСТК.

Заключение

Получены формулы для расчета нормальных напряжений на площадках контакта звеньев механизмов с ЗСТК с диаметрами разной величины при ведущем внутреннем кольце для любого вида симметричной структурной схемы. Определены диапазоны возможных значений нормальных напряжений рассматриваемого вида при вводе поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров по радиусу дорожки качения наружного кольца, удовлетворяющих условию прочности (2). Выявлено, что направление ввода поправки в расчет номинальных величин геометрических параметров не оказывает существенного влияния на величины нормальных напряжений. Установлено, что радиальную грузоподъемность механизма с ЗСТК с диаметрами разной величины необходимо определять по нормальным напряжениям, которые имеют место на площадке контакта тела качения с минимальным радиусом. Результаты исследования позволят формировать приводы технологического оборудования на базе механизмов с ЗСТК, обладающих требуемой радиальной грузоподъемностью.

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., 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/115-122199.

3. Мерко М.А., Меснянкин М.В., Кайзер Ю.Ф., Мерко И.С., Лысянников А.В., Колотов А.В., Митяев А.Е., Лысянникова Н.Н., Рабецкая О.И., Мерко А.М. Анализ нормальных напряжений на площадках контакта звеньев механизмов с ЗСТК при ведущем внутреннем кольце и вводе поправки по радиусу этого же звена // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–4. – С. 702–706.

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., Мерко И.С., Митяев А.Е., Колотов А.В., Кайзер Ю.Ф., Лысянников А.В., Лысянников Н.Н. Распределение статических сил по точкам контакта звеньев механизмов с замкнутой системой тел качения в зоне минимальных диаметров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: www.science-education.ru/120-15346.

6. Мерко М.А., Меснянкин М.В., Митяев А.Е., Колотов А.В. Распределение статических сил по точкам контакта звеньев механизмов с замкнутой системой тел качения в зоне максимальных диаметров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: www.science-education.ru/117-13473.

7. Меснянкин А. В., Мерко М. А., Колотов А. В., Митяев А. Е. Определение границ областей существования механизмов-прототипов ЭМК при вводе поправки в расчет по дорожке качения внутреннего кольца // Вестник КрасГАУ Красноярск. – 2012. – № 12. – С. 138–141.

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.

References

1. Merko M.A. Kinematicheskie i geometricheskie harakteristiki jekscentrikovogo mehanizma kachenija: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.02. Krasnojarsk, 2002. 26 p.

2. Merko M.A., Mesnjankin M.V., Kajzer Ju.F., Kolotov A.V., Mitjaev A.E., Lysjannikov A.V., Kuznecov A.V. Peredatochnye otnoshenija planetarnyh mehanizmov s ZSTK s diametrami ravnoj velichiny pri vedushhem vnutrennem kolce i vvode popravki po radiusu dorozhki kachenija jetogo zhe zvena // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 1; URL: www.science-education.ru/115-122199.

3. Merko M.A., Mesnjankin M.V., Kajzer Ju.F., Merko I.S., Lysjannikov A.V., Kolotov A.V., Mitjaev A.E., Lysjannikova N.N., Rabeckaja O.I., Merko A.M. Analiz normalnyh naprjazhenij na ploshhadkah kontakta zvenev mehanizmov s ZSTK pri vedushhem vnutrennem kolce i vvode popravki po radiusu jetogo zhe zvena // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 12–4. pp. 702–706.

4. Merko M.A., Mesnjankin M.V., Kolotov A.V., Kajzer Ju.F., Lysjannikov A.V. Korrektirovka rascheta geometricheskih parametrov mehanizmov s ZSTK po radiusu dorozhki kachenija vnutrennego kolca // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2013. no. 6. URL: www.science-education.ru/113-11778.

5. Merko M.A., Mesnjankin M.V., Merko I.S., Mitjaev A.E., Kolotov A.V., Kajzer Ju.F., Lysjannikov A.V., Lysjannikov N.N. Raspredelenie staticheskih sil po tochkam kontakta zvenev mehanizmov s zamknutoj sistemoj tel kachenija v zone minimalnyh diametrov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 6. URL: www.science-education.ru/120-15346.

6. Merko M.A., Mesnjankin M.V., Mitjaev A.E., Kolotov A.V. Raspredelenie staticheskih sil po tochkam kontakta zvenev mehanizmov s zamknutoj sistemoj tel kachenija v zone maksimalnyh diametrov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 3. URL: www.science-education.ru/117-13473.

7. Mesnjankin A.V., Merko M. A., Kolotov A.V., Mitjaev A.E. Opredelenie granic oblastej sushhestvovanija mehanizmov-prototipov JeMK pri vvode popravki v raschet po dorozhke kachenija vnutrennego kolca // Vestnik KrasGAU Krasnojarsk. 2012. no. 12. pp. 138–141.

8. Mesnjankin M.V., Merko M.A., Kolotov A.V., Mitjaev A.E. Rezultaty reshenija zadachi o polozhenijah zvenev JeMK pri vedushhem vnutrennem kolce // Vestnik Tadzhikskogo tehnicheskogo universiteta. 2013. no. 1. pp. 35–41.

9. Mesnjankin M. V., Merko M. A., Kolotov A.V., Mitjaev A.E. Uslovija simmetrii mehanizmov s zamknutoj sistemoj tel kachenija // Vestnik Tadzhikskogo tehnicheskogo universiteta. 2013. no. 3. pp. 29–34.