

АНАЛИЗ АДАПТИВНОГО ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА ТВЕРДЫХ ТЕЛ С КОСВЕННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Задошенко Е.Г., Соколенко А.И., Богинская В.В., Кайибанда Д.В.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. Найдены зависимости для определения значений параметров узла автоматического регулирования адаптивного фрикционного контакта с косвенным регулированием, которые позволяют стабилизировать его выходной параметр. Осуществлено профилирование боковых стенок гнезд узла автоматического регулирования адаптивного фрикционного контакта, позволяющих исключить влияние коэффициента трения на выходной параметр.

Ключевые слова: адаптивный фрикционный контакт, сумматор, коэффициент трения, датчик, обратная связь.

ANALYSIS OF ADAPTIVE FRICTIONAL CONTACT SOLID BODIES WITH INDIRECT REGULATION

Zadoshenko E.G., Sokolenko A.I., Boginskaya V.V., Kayibanda D.V.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. Dependencies were found for determining the values of the parameters of the automatic control unit of the adaptive friction contact with indirect control, which allow stabilizing its output parameter. Profiling of the side walls of the sockets of the automatic control unit of the adaptive friction contact is performed, which allows to exclude the influence of the coefficient of friction on the output parameter.

Keywords: adaptive friction contact, adder, coefficient of friction, sensor, feedback.

Состояние вопроса. В работах [1, 2, 3, 4] приведены результаты исследований адаптивного фрикционного контакта (АФК) твердых тел первого и второго поколений.

В частности, показано, что невозможность полной стабилизации выходного параметра АФК обусловлена замкнутой схемой автоматического регулирования, согласно которой управляющее воздействие является функцией выходного параметра контакта.

Постановка задачи исследования. Определение профиля боковых стенок гнезд узла автоматического регулирования АФК.

Решение задачи. Определим вид графика функции

$$y = y_0 + \frac{F_n(1-A)}{c} \left[\frac{1}{f_{\max}}(1-A) - \operatorname{tg} \alpha \right] \ln \left(1 + \frac{cx}{F_n A} \right) + x \left[\frac{1}{f_{\max}} \left(2 + \frac{cx}{2F_n} - A \right) - \operatorname{tg} \alpha + f_1 \right], \quad (1)$$

полученной в работе [5], для чего определим знаки второй производной, которая имеет следующий вид:

$$y'' = \frac{(cx)^2 + 2F_n A c x_i + (F_n A)^2 - F_n^2 m(m + f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)}{F_n f_{\max} (F_n A + cx_i)^2}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) приняты следующие обозначения: Y – ордината кривой графика; y_0 – начальная ордината кривой графика; F_n – суммарная сила основных пружин АФК; A – конструктивный параметр АФК; f_{\max} – максимальный коэффициент трения; C – угол давления тела качения устройства автоматического регулирования; C – суммарная осевая жесткость основных пружин; f_1 – коэффициент трения в направляющих АФК; x_i – текущее перемещение нажимной планки; m – соотношение между первоначальными силами натяжения группы основных и вспомогательных пружин.

График функции (1) будет выпуклым, если $y'' > 0$, для чего необходимо, чтобы числитель производной (2) был положительным. Решение квадратного неравенства относительно неизвестного x при указанном условии имеет вид:

$$x_i \in \left(-\infty; \frac{-F_n \left(A + \sqrt{m(m + f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)} \right)}{c} \right) \cup \left(\frac{-F_n \left(A - \sqrt{m(m + f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)} \right)}{c}; +\infty \right).$$

Так как отсчет текущего перемещения x_i нажимной планки производится от нулевого значения в положительном направлении оси абсцисс, в полученном решении нас будет интересовать его часть, находящаяся в скобках справа. Анализ этой части показывает, что график функции (1) будет выпуклым во всем интервале положительных значений x_i , если числитель дроби отрицателен или равен нулю. Этому условию удовлетворяют следующие значения:

$$m \leq \frac{(1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^2}{2 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2)$$

Соответственно, график функции (1) будет выпуклым кверху, если $y' < 0$. В этом случае имеем:

$$x_i \in \left(\frac{F_n \left(A + \sqrt{m(m + f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)} \right)}{-c}; \frac{F_n \left(A - \sqrt{m(m + f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)} \right)}{-c} \right).$$

Нижняя граница полученной области значений x_i , очевидно, всегда отрицательная. Верхняя граница будет находиться в области положительных значений, если числитель второй дроби принимает отрицательные значения. Это будет выполняться, если значение m определяется обратным, по отношению к формуле (2), неравенством, т. е.

$$m > \frac{(1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^2}{2 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Выбор значения коэффициента m необходимо произвести с учетом анализа процесса саморегулирования АФК, в частности, при уменьшении коэффициента трения от значения f_{\max} [6, 7]. На основании ранее полученного соотношения вида

$$\frac{1 - \sqrt{m_1}}{\operatorname{tg} \alpha} < f_{\max},$$

находим:

$$m_1 > (1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^2. \quad (4)$$

Сопоставление соотношений (3) и (4) показывает, что при необходимости безусловного выполнения условия (4) ему удовлетворяет соотношение (3). Так как $2 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha > 1$, то $m_1 > m$ и график функции (1) будет выпуклым от начала положительной оси абсцисс. В процессе саморегулирования АФК тело качения проходит в гнезде нажимной планки линейный путь, равный $x_1 = x / 2$ (x – максимальная дополнительная осадка пружины) при удвоенном перемещении планки относительно плоскости.

Значение x определяется, согласно данным работы [8], из следующего соотношения:

$$x = \frac{F_n (f_{\max} - f_{\min})}{c f_{\min}}.$$

Здесь f_{\min} – минимальный коэффициент трения.

Так как $m_1 < 1$, то

$$-A + \sqrt{m(m + f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)} < \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\min}},$$

поэтому график функции (1) будет выпуклым кверху лишь на определенной части глубины гнезда нажимной планки. В этом случае исходное значение перемещения нажимной планки x_0 , соответствующее принятому значению m_1 , является точкой перегиба графика функции (1), и на втором участке последний будет выпуклым.

Таким образом, на основе соотношений

$$m < 1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha,$$

$$m_1 > (1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^2$$

приведенных в работах [9, 10], может быть определена область значений коэффициента m , при которых обеспечивается саморегулирование АФК

$$(1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha) > m > (1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^2.$$

Выше было установлено неравенство значений углов давления, необходимых для саморегулирования АФК при увеличении и уменьшении коэффициента трения. Так как рассмотрен процесс саморегулирования при уменьшении коэффициента трения и определены основные параметры АФК для его обеспечения, при найденных значениях саморегулирование при увеличении коэффициента трения становится невозможным, поскольку угол давления, соответствующий любому промежуточному положению планки, не обеспечивает создание тангенциального усилия, необходимого для возврата планки в исходное положение под действием пружин [11, 12].

Это несоответствие может быть устранено путем профилирования гнезд на плоскости, обеспечивающем соответствующий угол давления тел качения [13].

Для того чтобы в результате саморегулирования АФК тела качения смогли возвратиться в исходное положение, соответствующее минимальному натяжению пружин, необходимо установить состояние датчика-преобразователя, при котором значение угла α'_1 была бы наименьшим.

Рассмотрим для этого соотношение

$$\operatorname{tg} \alpha'_{1i} = \frac{F_n + cx_i}{[F_n + cx_i + mF_n(1 - f_i \operatorname{tg} \alpha)]} \operatorname{tg} \alpha_i - f_1, \quad (5)$$

полученное в работе [14]. Значение параметра $\operatorname{tg} \alpha'_{1i}$ возрастает в функции перемещения x_i и убывает в функции f_i , поэтому минимальное значение параметра $\operatorname{tg} \alpha'_{1i}$ принимает при $x_i \approx 0$ и $f_i = f_{\max}$, т. е.

$$\operatorname{tg} \alpha'_1 = \frac{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha}{(1 + m - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha) f_{\max}} - f_1. \quad (6)$$

Здесь α'_1 – угол давления блока сравнения.

Картина равновесия тела качения в сужающейся части клина приведена и исследована в работе [15]. При саморегулировании АФК необходимо исключить возможность выталкивания тела качения из сужающейся части клина в направлении, обратном движению. Для рассматриваемого случая заклинивание тела качения, обеспечивающее их перекатывание в направлении перемещения нажимной планки, имеет вид:

$$\operatorname{tg}(\alpha_1 - \alpha'_1) = \frac{2f}{1 - f^2}, \quad (7)$$

где f – коэффициент трения между телом качения и гнездами.

Значение коэффициента трения, удовлетворяющее поставленному условию, определится по формуле

$$f = \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha_1 - \alpha'_1)} - 1}{\operatorname{tg}(\alpha_1 - \alpha'_1)}.$$

В последнем соотношении

$$\operatorname{tg}(\alpha_1 - \alpha'_1) = \frac{\frac{f_{\max}(1 - f_{\min} \operatorname{tg} \alpha)}{f_{\max} - f_{\min}(f_{\max} \operatorname{tg} \alpha + m)f_{\min}} - \frac{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha}{f_{\max}(1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha) + mf_{\min}} + 2f_1}{1 + \left[\frac{f_{\max}(1 - f_{\min} \operatorname{tg} \alpha)}{f_{\max} - f_{\min}(f_{\max} \operatorname{tg} \alpha + m)f_{\min}} + f_1 \right] \left[\frac{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha}{f_{\max}(1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha) + mf_{\min}} - f_1 \right]}.$$

Последнее соотношение получено на основе выражения

$$\operatorname{tg} \alpha'_{1i} = \frac{F_n + cx_i}{[F_n + cx_i - mF_n(1 - f_i \operatorname{tg} \alpha)]} f_i + f_1, \quad (8)$$

полученного в работе [16] и выражения (5), а также используя разложение функции тангенса разности углов.

Значение угла давления между телом качения и стенкой гнезда плоскости, соответствующего крайнему положению планки, определяется из соотношения (5) следующими подстановками:

$$f_i = f_{\max}, \\ x = \frac{F_n(f_{\max} - f_{\min})}{cf_{\min}}.$$

и составляет

$$\operatorname{tg} \alpha'_1 = \frac{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha}{(1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha + mf_{\min} / f_{\max}) f_{\max}} - f_1.$$

Сравнение показывает, что $\operatorname{tg}\alpha_1'' > \operatorname{tg}\alpha_1'$, то есть угол давления должен уменьшаться от периферии к дну гнезда, причем уменьшение должно быть таким, чтобы разность $\alpha_{1i} - \alpha_{1i}'$, изменяясь, достигала значения, удовлетворяющего соотношению (7), и не превышала его внутри интервала изменения. Так как профиль гнезда плоскости должен обеспечивать саморегулирование АФК при любом промежуточном положении тела качения относительно профиля и увеличении коэффициента трения до значения f_{\max} , соотношение (5) запишем в следующем виде:

$$\operatorname{tg}\alpha_{1i}' = \frac{1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha}{f_{\max}(1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha) + mf_i} - f_1. \quad (9)$$

При выводе этого соотношения использована формула

$$f_i = \frac{F_n f_{\max}}{F_n + cx_i},$$

полученная в работе [17].

Значение $\operatorname{tg}\alpha_{1i}'$ по соотношению (8) монотонно возрастает в следующем интервале:

$$\frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{f_{\max} \operatorname{tg}^2 \alpha}{m + f_{\max} \operatorname{tg}\alpha}} \right) < f_i < \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{f_{\max} \operatorname{tg}^2 \alpha}{m + f_{\max} \operatorname{tg}\alpha}} \right).$$

Подстановка $f_{\max} = 0,8$, $\operatorname{tg}\alpha = 0,6$, $m = 0,3$ дает $0,33 < f_i < 3$, что согласуется с наличием точки перегиба функции (1). Функция (9) убывает на всем интервале изменения f_i , следовательно, функция $\operatorname{tg}\alpha_{1i} - \operatorname{tg}\alpha_{1i}'$ удовлетворяет сформулированному выше условию.

Интегрирование функции (5) при $f_i = f_{\max}$ дает уравнение кривой, очерчивающей стенку гнезда плоскости и имеющей вид:

$$y_1 = \frac{x}{f_{\max}} - f_1 x - \frac{mF_n}{cf_{\max}(1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha)} \ln \left[x + \frac{F_n}{c} \left(1 + \frac{m}{1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha} \right) \right] + C,$$

где C – постоянная интегрирования, которая находится из начальных условий: $x = 0$ при $y_1 = y_0'$. Тогда

$$C = y_0' + \frac{mF_n}{cf_{\max}(1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha)} \ln \left[\frac{F_n}{c} \left(1 + \frac{m}{1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha} \right) \right],$$

и окончательно получаем:

$$y_1 = y_0' + x \left(\frac{1}{f_{\max}} - f_1 \right) - \frac{mF_n}{cf_{\max}(1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha)} \ln \left\{ 1 + \frac{cx}{F_n [1 + m/(1 - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha)]} \right\}. \quad (10)$$

Значение параметра y_0' находится аналогично изложенному выше, т. е.

$$y_0' = \frac{D}{2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1}}.$$

Значение $\operatorname{tg}\alpha_1'$ определяют по соотношению (6).

Графики функций (1) и (10) приведены на рисунке (соответственно кривые 1 и 2) и построены при следующих исходных данных: $F_n = 200$ Н, $c = 130$ Н/мм, $m = 0,3$, $f_{\max} = 0,8$, $\operatorname{tg}\alpha = 0,6$, $f_1 = 0,15$, $D = 15$ мм. Соответственно этому $\operatorname{tg}\alpha_1 = 3,15$ и $\operatorname{tg}\alpha_1' = 0,64$, а $y_0 = 2,3$ мм и $y_0' = 6,4$ мм. График 2 построен в системе координат $y_1 - x$, то есть совмещен с графиком 1 в одной плоскости, причем отсчет по оси ординат ведется сверху вниз, а по оси абсцисс справа налево, что соответствует реальной картине взаимной ориентации оппозитных участков гнезд планки и плоскости.

Рассмотрение графиков подтверждает, что разность $\alpha_1 - \alpha_1'$ принимает минимальное значение в противоположных (правой – у графика 2 и левой – у графика 1) точках, соответствующих нулевому перемещению тела качения, и максимальное – при наибольшем перемещении тела качения, по которому определялось условие перекачивания тела качения в гнездах.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании линейных АФК, применяемых в конструкциях направляющих узлов металлорежущих станков, а также в конструкциях адаптивных фрикционных муфт с целью повышения их точности срабатывания.

Выводы:

1. Найдены зависимости для определения значений параметров узла автоматического регулирования АФК, которые позволяют стабилизировать его выходной параметр.

2. Осуществлено профилирование боковых стенок гнезд узла автоматического регулирования АФК, позволяющих исключить влияние коэффициента трения на выходной параметр.

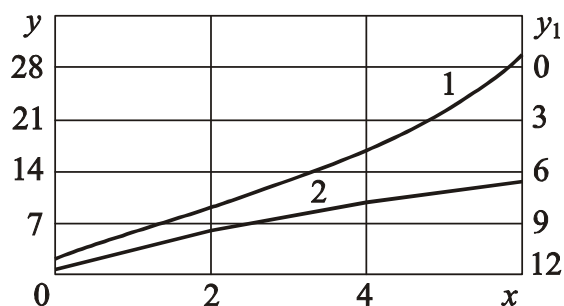


Рисунок 1 - Профилирование боковых стенок гнезд УУ

Список литературных источников

1. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // М.П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.
2. Компонентные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами // М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2003. – № 7. – С. 7–12.
3. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13–15.
4. Компонентка базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 7. – С. 16–20.
5. Шишкарёв, М.П. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М.П. Шишкарёв, А.А. Луцкич / В сборнике: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф., в рамках 17-й Международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2014», Ростов н/Д, 2014. – С. 206–209.
6. Шишкарёв, М.П. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет. Монография // М.П. Шишкарёв, А.А. Луцкич, А.Ю. Угленко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.
7. Повышение нагрузочной способности и точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 5. – С. 18–24.
8. Условие высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // М.П. Шишкарёв // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 7. – С. 46–48.
9. Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты со смешанной структурой обратной связи // М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 3–8.
10. Шишкарёв, М.П. Исследование базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // М.П. Шишкарёв // В сборнике: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Сборник статей 8-й международной научно-практической конференции в рамках 18-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2015». 2015. С. 162–167.
11. Особенности процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 3–7.
12. Теоретические основы стабилизации выходного параметра адаптивного фрикционного контакта твердых тел // М.П. Шишкарёв // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 2–3. – С. 17–23.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР.