

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АДАПТИВНОГО ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА 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. Получено уравнение кривой профиля гнезда под тела качения устройства автоматического регулирования, с помощью которого обеспечивается стабилизация выходного параметра адаптивного фрикционного контакта с косвенным регулированием. Показано, что параметры блока сравнения и дополнительного сумматора функционально зависят от максимального коэффициента трения.

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

PERFORMANCE INDICATORS OF ADAPTIVE FRICTION CONTACT 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. The equation of the profile curve of the slot for the rolling body of the automatic control device is obtained, this equation is used to stabilize the output parameter of the adaptive friction contact with indirect control. It is shown that the parameters of the comparison block and the additional adder are functionally dependent on the maximum coefficient of friction.

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.

Показано, что данные АФК обладают ограниченными возможностями в контексте стабилизации выходного параметра – силы трения на поверхностях тел.

Постановка задачи исследования. Синтез устройства автоматического регулирования АФК твердых тел с косвенным регулированием.

Решение задачи. Очевидно, что саморегулирование АФК при начальном положении планки становится возможным, если функция

$$\Delta F_{\tau i} = F_n f_i - \frac{F_{n1} f_i}{1 - f_i \operatorname{tg} \alpha}, \quad (1)$$

полученная в работе [5], будет убывающей в области значений коэффициента трения, близких к значению f_{\max} , что возможно в том случае, когда выполняется следующее условие:

$$\frac{1 - \sqrt{m}}{\operatorname{tg} \alpha} < f_{\max} < \frac{1 + \sqrt{m}}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

В приведенных формулах $\Delta F_{\tau i}$ – текущая разность между силами трения фрикционных пар АФК; F_n – суммарная сила натяжения основных замыкающих пружин; f_i – текущий коэффициент трения; F_{n1} – суммарная сила натяжения вспомогательных пружин; α – угол давления тел качения устройства автоматического регулирования; m – отношение сил натяжения основных и вспомогательных пружин; f_{\max} – максимальный коэффициент трения.

Оценим возможность выполнения этих условий, для чего запишем следующее неравенство [6, 7]:

$$\Delta F_{\tau} = f_{\max} \left(F_n - \frac{F_{n1}}{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha} \right) > 0,$$

которое должно, безусловно, удовлетворяться в соответствии с равенством (7). Учитывая, что $F_{n1} = m F_n$, перепишем неравенство в виде

$$\frac{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha - m}{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha} > 0.$$

Так как $m > 0$, это неравенство выполняется при условии

$$1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha - m > 0$$

или в том случае, когда

$$1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha < 0.$$

Из этого следует, что

$$m < 1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

или

$$1 < f_{\max} \operatorname{tg} \alpha.$$

Для исключения самоторможения пары трения необходимо, чтобы выполнялось неравенство $\operatorname{tg} \alpha < f_{\max}$. Поскольку максимальное значение коэффициента трения материалов фрикционных пар, применяемых в АФК, не превышает единицу [8, 9], второе неравенство реально выполнимо. Определение соотношения между левой и правой частями первого неравенства произведем с учетом выражения

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = f_1 + \frac{1}{[1 - m / (1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha)] f_{\max}}, \quad (3)$$

полученного в работе [10]. Находим:

$$\frac{m}{1 - f_{\max} \operatorname{tg} \alpha} = 1 - \frac{1}{f_{\max} (\operatorname{tg} \alpha_1 - f_1)}, \quad (4)$$

где α_1 – угол давления тел качения блока сравнения [11].

Из соотношения (4) следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha_1 > \frac{1}{f_{\max}} + f_1.$$

При значениях $f_{\max} = 0,8$, $f_1 = 0,15$ [12], $\operatorname{tg} \alpha_1 > 1,4$.

Из соотношения (1) следует, что выходной сигнал сумматора в виде разности $pF_T - F_{T1}$ тем меньше, чем меньше значения $F_{п1}(m)$ и $\operatorname{tg} \alpha$. Кроме того, параметры m и $\operatorname{tg} \alpha$ связаны между собой соотношениями (2) и (4), поэтому для уменьшения нижней границы f интервала изменения коэффициента трения $f_{i\min}$, в котором функция (1) будет убывать, необходимо максимально увеличивать одновременно значения параметров m и $\operatorname{tg} \alpha$, или, что равносильно, значение отношения в левой части соотношения (2). При фиксированных значениях f_{\max} и f_1 это возможно за счет увеличения параметра $\operatorname{tg} \alpha_1$, поэтому, приняв $\operatorname{tg} \alpha_1 = 10$, получаем $f_{i\min} \approx 0,54$ полученное значение для большинства применяемых в АФК материалов пар трения превышают средний коэффициент трения f_{cp} т. е. указанное поведение функции (1) будет иметь место только в ограниченном интервале положительных приращений коэффициента трения f_{cp} .

Верхняя граница интервала убывания функции (1) при указанных данных равна $f_{i\max} \approx 2,83$, следовательно, при указанных исходных данных значение f_{\max} попадает в установленный интервал изменения коэффициента трения.

Уменьшение коэффициента трения f_i в пределах указанного интервала приводит к увеличению выходного сигнала ΔF_T сумматора, в результате чего происходит, в соответствии с соотношением

$$F_{п1} = \Delta F_T \operatorname{tg} \alpha_1,$$

полученным в работе [13], рост выходного сигнала сумматора. Планка начинает перемещаться в направлении поверхностей трения, сжимая пружины и увеличивая тем самым силу прижатия тел трения друг к другу. Таким образом, уменьшение величины выходного параметра за счет падения коэффициента трения компенсируется ростом силы нормального давления на поверхности контакта фрикционных пар, в чем и заключается сущность саморегулирования АФК. В процессе дальнейшего саморегулирования АФК происходит изменение силы сжатия пружин, поэтому необходимо, очевидно, в формуле (1) для этих периодов принимать в качестве первого члена правой части $F_{пf_{\max}}$. Тогда

функция (1) будет убывающей в интервале $f_{\min} \dots f_{\max}$ (f_{\min} – минимальное значение коэффициента трения [14]) при любых значениях m и $\operatorname{tg}\alpha$, удовлетворяющих соотношению

$$F_T = F_n f_{\max},$$

полученному в работе [15].

Для того чтобы обеспечивалась стабильность выходного параметра АФК, необходимо приведение в соответствие значения выходного сигнала сумматора, зависящего от выходного сигнала сумматора, значению вертикального перемещения планки. Это отражается следующим равенством:

$$(F_n + cx_j)f_j = F_n f_{\max},$$

где C – суммарная осевая жесткость пружин 5; x_j – текущее значение перемещения планки от ее начального положения.

В этом случае имеем:

$$f_j = \frac{F_n f_{\max}}{F_n + cx_j}. \quad (5)$$

Полученное соотношение подтверждает аналитически необходимость увеличения силы натяжения пружин при уменьшении f_j и устанавливает связь между f_j и x_j , которая представляет собой обратную зависимость.

Для отыскания профиля гнезда планки под тела качения установим зависимость значения угла давления α_1 от перемещения планки, обеспечивающее постоянство выходного параметра F_T . С учетом сделанного выше замечания подставим в соотношение (1) полученное из соотношения (5) значение f_j , в результате находим:

$$\Delta F_T = F_n f_{\max} \left(1 - \frac{mF_n}{F_n + cx_j - F_n f_{\max} \operatorname{tg}\alpha} \right). \quad (6)$$

Уравнение равновесия планки имеет вид [16]:

$$\Delta F_T \operatorname{tg}\alpha_{j1} - (F_n + cx_j + F_{\text{тр}}) = 0,$$

где α_{j1} – текущий угол давления тела качения.

Воспользовавшись выражением

$$F_{\text{тр}} = \Delta F_T f_1,$$

полученным в работе [17], и выражением (5), находим:

$$\operatorname{tg}\alpha_{j1} = \frac{F_n + cx_j}{F_n f_{\max} [1 - mF_n / (F_n + cx_j - F_n f_{\max} \operatorname{tg}\alpha)]} + f_1.$$

После интегрирования полученной функции получаем:

$$y = \left(\frac{1}{f_{\max}} - \operatorname{tg}\alpha \right) \frac{F_n}{c} \ln \left(\frac{F_n A}{c} + x \right) + \left(\frac{A}{f_{\max}} + \operatorname{tg}\alpha - \frac{2}{f_{\max}} \right) \frac{F_n}{c} A \ln \left(\frac{F_n}{c} A + x \right) + \frac{2x}{f_{\max}} + \frac{cx^2}{2F_n f_{\max}} - \frac{Ax}{f_{\max}} - x \operatorname{tg}\alpha + x f_1 + C.$$

Здесь $A = 1 - m - f_{\max} \operatorname{tg}\alpha$; C – постоянная интегрирования, которая может быть найдена из начальных условий: при $X = 0$ $y = y_0$ (y_0 – начальная ордината точки касания тела и гнезда, которая лежит на кривой, очерчивающей профиль гнезда).

Тогда имеем:

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

и окончательно получаем

$$y = y_0 + \frac{F_n(1-A)}{c} \left[\frac{1}{f_{\max}}(1-A) - \operatorname{tg}\alpha \right] \ln \left(1 + \frac{cx}{F_n A} \right) + x \left[\frac{1}{f_{\max}} \left(2 + \frac{cx}{2F_n} - A \right) - \operatorname{tg}\alpha + f_1 \right]. \quad (7)$$

Начальная ордината y_0 может быть найдена из рисунка, на котором показано исходное положение тела качения в гнезде планки. Расположив систему координат таким образом, чтобы ось

абсцисс была параллельна вектору выходного сигнала F_{p1} , и проходила через центр тела качения, а точка контакта гнезда и тела качения лежала на оси ординат, найдем из треугольника AOB

$$y_o = \frac{D}{2} \cos \alpha_1 = \frac{D}{2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1}},$$

где D – диаметр тела качения.

Значение $\operatorname{tg} \alpha_1$ можно найти по соотношению (3).

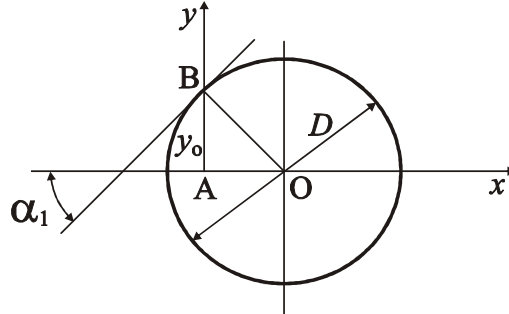


Рисунок 1 - Расчетная схема

Приведенные выше рассуждения и полученное уравнение кривой профиля гнезда даны для тех периодов саморегулирования АФК, когда происходит уменьшение коэффициента трения, в результате чего планка перемещается вниз. Если происходит увеличение коэффициента трения, то в процессе саморегулирования АФК планки должна перемещаться в обратном направлении. Это перемещение будет сопровождаться скольжением тела относительно поверхности и тел относительно друг друга в результате действия тангенциальной силы, возникающей между планкой и телами качения. Особенностью рассматриваемого АФК является то, что при уменьшении коэффициента трения вертикальное перемещение планки осуществляется за счет действия на нее тангенциальной силы, равной разности между активной силой, т. е. силой трения на поверхности тел трения и силой сопротивления – силой трения на поверхностях тел трения, а при увеличении коэффициента трения вертикальное перемещение планки сопровождается преодолением силы сопротивления, равной сумме указанных сил трения. На основании этого можно предположить, что указанное профилирование гнезд планки не позволит осуществить в полной мере саморегулирование АФК.

Условие равновесия планки в режиме саморегулирования АФК при уменьшении коэффициента трения запишем в следующем виде:

$$\Delta F_{Ti} \operatorname{tg} \alpha_{1i} - \Delta F_{Ti} f_1 = F_n + cx_i,$$

откуда, учитывая соотношение (1), получаем:

$$\operatorname{tg} \alpha_{1i} = \frac{F_n + cx_i}{(F_n + cx_i - mF_n / (1 - f_i \operatorname{tg} \alpha))} f_i + f_1. \quad (8)$$

Равновесие планки в режиме саморегулирования АФК при увеличении коэффициента трения описывается следующим уравнением:

$$(F_n + cx_i - \sum F_T f_1) \operatorname{ctg} \alpha'_{1i} = \sum F_T.$$

Здесь $\sum F_T$ – суммарная сила трения на поверхностях тел трения, которая определяется по формуле:

$$\sum F_T = (F_n + cx_i) f_i + \frac{mF_n f_i}{1 - f_i \operatorname{tg} \alpha}.$$

Подставив полученное выражение в предыдущее уравнение, находим:

$$\frac{F_n + cx_i}{(F_n + cx_i + mF_n / (1 - f_i \operatorname{tg} \alpha))} \operatorname{tg} \alpha_i - f_1. \quad (9)$$

Сравнение выражений (8) и (9) показывает, что $\alpha_{1i} > \alpha'_{1i}$.

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. Получено уравнение кривой профиля гнезда под тела качения устройства автоматического регулирования, с помощью которого обеспечивается стабилизация выходного параметра АФК.

2. Параметры блока сравнения и дополнительного сумматора функционально зависят от максимального коэффициента трения.

Список литературных источников

1. Обоснование наибольшей точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 11. – С. 20–26.
2. Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения / М.П. Шишкарёв // Изв. вузов. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 14–17.
3. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // М.П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.
4. Компонировочные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами // М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2003. – № 7. – С. 7–12.
5. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13–15.
6. Шишкарёв, М.П. Исследование режима перегрузки АФМ второго поколения (базовый вариант) // 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. 182–186.
7. Компонировка базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 7. – С. 16–20.
8. Шишкарёв, М.П. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М.П. Шишкарёв, А.А. Луцник / 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.
9. Шишкарёв, М.П. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет. Монография // М.П. Шишкарёв, А.А. Луцник, А.Ю. Угленко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.
10. Повышение нагрузочной способности и точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 5. – С. 18–24.
11. Условие высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // М.П. Шишкарёв // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 7. – С. 46–48.
12. Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты со смешанной структурой обратной связи // М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 3–8.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР.