



УДК 621.838.222

М.П. Шишкарёв
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (ДГТУ)
г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Дата поступления 23.03.2023

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА БУКСОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ

Аннотация

В статье приведена функциональная зависимость между коэффициентом усиления обратной связи при буксовании адаптивной фрикционной муфты после ее срабатывания и соответствующим коэффициентом трения скольжения. Показано, что вращающий момент муфты при буксовании больше ее номинального вращающего момента при любом коэффициенте трения, кроме минимального значения.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, переменный коэффициент усиления, коэффициент трения скольжения, буксование.

Введение

В работах [1, 2] изложены результаты исследования адаптивной фрикционной муфты (АФМ) с переменным значением коэффициента усиления (КУ). Исследование основано на результатах, полученных в работе [3], которая посвящена синтезу принципиальной схемы и установлению зависимостей между параметрами управляющего устройства (УУ) адаптивного фрикционного контакта (АФК).

Установлено, в частности, что теоретически нечувствительность синтезированных в указанных работах принципиальных схем АФМ и АФК к изменению коэффициента трения достигается за счет переменного угла контакта тел качения УУ. Данный эффект обеспечивается за счет специального профиля боковых стенок гнезд, в которых размещены чувствительные элементы, и введения упругой связи между сумматором и чувствительными элементами [3].

В работе [4] найдена функциональная зависимость между значением КУ и текущим коэффициентом трения, в соответствии с которой для обеспечения стабильности значения вращающего момента муфты каждому значению коэффициента трения должно соответствовать определенное значение КУ.

Поскольку теоретически стабильность значения вращающего момента муфты достигается благодаря изменению значения КУ при относительном перемещении элементов УУ, в работе [5] установлено, что указанное перемещение происходит в результате увеличения нагрузки в приводе машины.

Это означает неизбежное возникновение перегрузки, действующей в приводе машины, в результате которой внешний вращающий момент становится больше, чем номинальный вращающий момент муфты.

Причиной расхождения теоретических результатов и выводов, сформулированных с учетом картины изменения относительного расположения элементов УУ, является необходимость приложения дополнительной нагрузки для обеспечения функционального соответствия значения КУ текущему коэффициенту трения. Поскольку, как установлено в работе [6], при отсутствии перегрузки и увеличении коэффициента трения АФМ обладает так называемым «потенциальным» вращающим моментом, который превышает номинальный вращающий момент муфты, уменьшение «потенциального» вращающего момента в результате наступления перегрузки происходит не до номинального, а до большего значения вращающего момента.

В работе [5] также констатируется, что величина перегрузки при срабатывании муфты в данном случае определяет ее точность срабатывания.

Процесс буксования предохранительных фрикционных муфт и, в частности, АФМ [7] характеризуется переходом от трения покоя между элементами фрикционных пар к трению скольжения между ними. При этом уменьшение значения коэффициента трения приводит соответственно к уменьшению момента сил трения, что характерно для неадаптивных предохранительных фрикционных муфт, а также для АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера), имеющих постоянное значение КУ [8].

Данные муфты обладают коэффициентом чувствительности (по терминологии, приведенной в работе [9] – коэффициентом остаточного момента), меньшим единицы [6]. В соответствии с этим, момент сил трения при буксовании упомянутых муфт меньше, чем предельный вращающий момент при их срабатывании.

В АФМ с переменным значением КУ любое изменение внешней нагрузки приводит к перемещению элементов УУ и к изменению значения КУ. Изменение момента сил трения приводит к нарушению состояния относительного равновесия элементов УУ, что также сопровождается изменением значения КУ.

Постановка задачи исследования.

Определение значения установившегося вращающего момента АФМ с переменным значением КУ при буксовании. Поскольку математическая модель АФМ, определяющая ее нагрузочную способность, справедлива и для рассматриваемого случая, для решения задачи исследования необходимо определить значение КУ при установившемся буксовании.

Основная часть

Воспользуемся принципиальной схемой АФМ, приведенной на рис. 1. Полу-муфты 1 и 2 соединены между собой в угловом направлении дисками трения 3 и 4. Диски 3 соединены со ступицей нажимного диска 5, смонтированного с возможностью

поворота и осевого перемещения вдоль полумуфты 1.

Диски 4 соединены таким же способом с барабаном полумуфты 2.

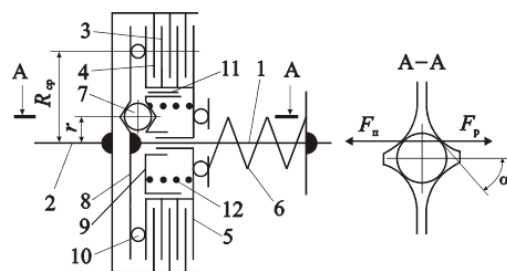


Рисунок. 1. Принципиальная схема АФМ первого поколения с переменным значением КУ

Прижатие друг к другу фрикционных дисков производится затянутой на определенное усилие пружиной 6.

Управляющее устройство АФМ состоит из тел качения 7, размещенных в гнездах, которые выполнены на оппозитных торцевых поверхностях упорного диска 8, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1, и стакана 9, размещенного в отверстии нажимного диска 5.

Гнезда под тела качения 7 имеют профилированные боковые стенки (рис. 1, сечение А-А).

Между левым крайним диском 4 и упорным диском 8 смонтирован подшипник 10, следовательно, фрикционная группа имеет схему со всеми ведущими парами трения [10].

Стакан 9 связан в угловом направлении с нажимным диском 5 направляющей шпонкой 11.

Между нажимным диском 5 и стаканом 9 установлена пружина сжатия 12. Согласно данным работы [5], сила натяжения пружины 12 равна нулю при крайнем левом (по рис. 1) положении опорной втулки 9.

Боковые стенки гнезд под тела качения 7 профилированы линиями такого профиля, что значение угла α_i (см. рис. 1, сечение А-А), образованный касательной в точке контакта тела качения 7 со стенкой гнезда, и осевой линией центра тела качения и параллельной оси вращения муфты, увеличивается по мере перемещения вправо стакана 9.

Момент времени, соответствующий

срабатыванию муфты, характеризуется состоянием осевого равновесия стакана 9 под воздействием на него всех осевых сил, соответствующих определенному осевому положению, зависящему от текущего коэффициента трения между дисками 3 и 4.

Поскольку, как отмечено выше, перегрузка при срабатывании муфты больше, чем номинальный вращающий момент, соответствующее значение угла α_i меньше значения угла, при котором муфта передает номинальный вращающий момент при текущем значении коэффициента трения [11].

Дальнейшее исследование основано на том, что, согласно полученной в работе [4] функциональной зависимости между значением КУ и текущим значением коэффициента трения, боковые стенки гнезд профилированы таким образом, что каждому фиксированному осевому перемещению стакана 9 соответствует определенное значение угла давления α_i и КУ C_i .

Кроме того, каждое фиксированное осевое положение опорной втулки соответствует определенному текущему значению коэффициента трения.

Предположим, что значение коэффициента трения покоя f_n и коэффициента трения скольжения f_c связаны между собой следующим соотношением:

$$f_c = pf_n, \quad (1)$$

где p – коэффициент пропорциональности.

Согласно данным работы [8], $p < 1$. Далее будем считать, что $p = \text{const}$, т. е. что любое значения коэффициента трения удовлетворяет соотношению (1).

В соответствии с изложенным выше, для любого осевого положения стакана 9 справедливо следующее уравнение его осевого равновесия:

$$F_{p,i} - cx_i - F_{тр,i} = 0, \quad (2)$$

где $F_{p,i}$ – распорная сила (осевая реакция), действующая на тела качения 7 (см. рис. 1, сечение А-А); c – осевая жесткость пружины 13; x_i – текущее значение осевой деформации пружины 12; $F_{тр,i}$ – текущая сила трения между стаканом 9 и направляющей шпонкой 11.

Поскольку установившееся после срабатывания АФМ значение вращающего момента определяется, в частности, значением КУ, установим предварительно соотношение между значениями КУ, одно из которых соответствует предельному вращающему моменту непосредственно перед срабатыванием муфты, второе – коэффициенту трения скольжения при ее буксовании.

Первое из перечисленных значений КУ функционально зависит от текущего значения коэффициента трения покоя, при котором срабатывает муфта. Эта зависимость опосредованно, через коэффициент точности АФМ, получена в работе [5] и, поскольку представлена сложной математической формой, может быть использована в исследовании при помощи графического способа.

Второе значение КУ связано с коэффициентом трения зависимостью, полученной в работе [4] и имеющей следующий вид:

$$C_i = \frac{1}{z} \left(\frac{1}{f_{\min}} - \frac{1}{f_i} + zC_{\min} \right), \quad (3)$$

где z – число пар трения 3–4 фрикционной группы муфты; f_{\min} – минимальное значение коэффициента трения; f_i – текущее значение коэффициента трения; C_{\min} – минимальное значение КУ, соответствующее крайнему левому (по рис. 1) положению стакана 9.

В работе [5] показано, что значение КУ, при котором срабатывает АФМ, если значение коэффициента трения равно f_i , меньше, чем значение, вычисляемое по соотношению (3). В связи с этим, первым этапом исследования является установление значений КУ при всех значениях коэффициента трения скольжения и сопоставление их со значением КУ при срабатывании муфты.

Поскольку при этом необходимо оценить соотношение значений вращающего момента при срабатывании АФМ и при ее буксовании, которые зависят от коэффициентов трения соответственно f_n и f_c , вторым этапом исследования является проведение указанной оценки.

Воспользуемся при исследовании

данными работы [5], которые относятся к значению коэффициента n_i , характеризующего значение вращающего момента АФМ при срабатывании по отношению к номинальному вращающему моменту, а также полученной зависимостью между значениями КУ и коэффициента n_i , которая имеет следующий вид:

$$C_i = 2n_i C_{\min} / (1 + n_i). \quad (4)$$

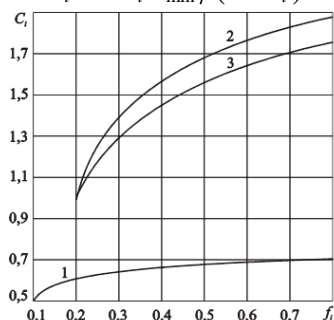


Рисунок 2. Зависимости текущего значения КУ от коэффициента трения

Принимая $z=6$ и соответствующие данные по коэффициенту n_i и КУ [5], рассмотрим графики, изображенные на рис. 2. Кривая 1 на этом рисунке отражает график функции (4), кривая 2 – график функции (3) (с учетом зависимости $n_i(f_i)$, полученной в работе [5]).

При построении кривой 1 в формуле (3) принято $f_i = p f_{n,i}$ (где $f_{n,i}$ – текущий коэффициент трения покоя).

Согласно данным работы [8], для различных сочетаний материалов пар трения принимается $p=0,67...0,8$. Примем для пары трения «сталь – асбофрикционный материал НСФ-3» $p=0,75$.

Графики на рис. 2 показывают, что при всех значениях коэффициента трения, принадлежащих реальному интервалу его изменения, кривая 2 располагается выше по отношению к кривой 1. Это означает, что значение КУ при срабатывании муфты меньше, чем значение КУ, которое должно установиться в результате ее буксования при текущем значении коэффициента трения покоя $f_{n,i}$.

Таким образом, возможность передачи номинального вращающего момента при буксовании муфты исключена, поскольку очевидно, что в процессе буксова-

ния значение КУ будет меньше, чем его соответствующее значение, принадлежащее кривой 1.

При текущем значении коэффициента трения скольжения значение КУ не будет соответствовать его указанному значению, согласно ранее установленной теоретической зависимости.

Изложенное иллюстрируется рис. 3, на котором изображено расположение тела качения 7 в гнезде стакана 9 (номера позиций элементов на рис. 1 и рис. 3 соответствуют друг другу). Прямая 1–1 проходит через точку касания между телом качения и боковой стенкой гнезда в положении, которое тело качения занимает при срабатывании муфты, прямая 2–2 – через точку контакта тела качения с боковой стенкой гнезда в положении, которое должно занимать тело качения при буксовании муфты после ее срабатывания при номинальном вращающем моменте, прямая 3–3 – через точку контакта тела качения и боковой стенки гнезда, соответствующую положению при буксовании муфты после срабатывания с учетом реальной перегрузки.

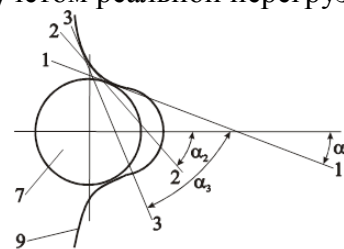


Рисунок 3. Схема изменения угла давления тела качения в процесс срабатывания АФМ

Каждому положению тела качения в гнезде соответствует определенный угол давления $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и определенное значение КУ обратной связи.

Члены, входящие в уравнение (2), определяются по следующим формулам:

$$F_{p,i} = (T_{n,i} / r) \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (5)$$

$$F_{\text{тр},i} = (2T_{n,i} / d) f_1, \quad (6)$$

где $T_{n,i}$ – текущее значение вращающего момента; r – радиус окружности, на которой расположены тела качения 7; α_i – см. выше; d – диаметр центрального отверстия нажимного диска 5; f_1 – коэффициент трения между стаканом 9 и направляющей

шпонкой 10.

Согласно данным работы [12], для соединений, подобных шпоночному соединению в исследуемой муфте, принимается $f_1 = \text{const}$.

Профиль боковых стенок гнезд стакана 9 построен таким образом, что обеспечивает такое функциональное соответствие между значением КУ и определенным значением коэффициента трения (согласно соотношению (3)), при котором АФМ передает номинальный вращающий момент T_n .

На основе изложенного выше, а также учитывая формулы (2), (5) и (6), запишем:

$$(T_n/r) \operatorname{tg} \alpha_i = cx_i + (2T_n/d) f_1. \quad (7)$$

Поскольку

$$C_i = (R_{cp}/r) \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (8)$$

умножим и разделим на R_{cp} левую часть уравнения (7) и, используя соотношение (8), получим:

$$\frac{T_n}{R_{cp}} C_i = cx_i + \frac{2T_n}{d} f_1. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) параметр R_{cp} – средний радиус дорожки трения дисков 3 и 4.

Из уравнения (9) находим:

$$cx_i = T_n \left((C_i/R_{cp}) - (2f_1/d) \right). \quad (10)$$

Предельный вращающий момент АФМ в зависимости от текущего значения коэффициента трения определяется, как и для АФМ первого поколения с постоянным значением КУ, по следующему соотношению [7]:

$$T_{n,i} = zF_n R_{cp} (f_i / (1 + zC_i f_i)), \quad (11)$$

где F_n – сила отдачи замыкающей пружины 6 (см. рис. 1).

Соотношение (11) записано для варианта АФМ со всеми ведущими парами трения, изображенного на рис. 1.

Используя формулу (11) в выражениях (5) и (6), а последние – в уравнении (2), и учитывая в этом уравнении соотношение (10), получаем уравнение второй степени относительно неизвестного C_i . Решение данного уравнения имеет следующий вид:

$$C_i = \left(A - \sqrt{A^2 - B} \right) / D, \quad (12)$$

где

$$A = 2zpf_i f_1 (T_n/d) + zF_n pf_i - (T_n/R_{cp}),$$

$$B = \left(8zT_n pf_i f_1 / (dR_{cp}) \right) \cdot (zF_n R_{cp} pf_i - T_n),$$

$$D = 2zT_n pf_i / R_{cp}.$$

График функции $C_i(f_i)$, построенный с учетом формулы (12), показан на рис. 2 (кривая 3). При построении кривой 3 использованы следующие исходные данные: $F_n = 600$ Н, $R_{cp} = 0,1$ м, $d = 0,06$ м, $f_1 = 0,15$, $C_{\min} = 0,5$, $f_{\min} = 0,1$.

При указанных данных значение номинального вращающего момента, вычисляемое по формуле (11) (с заменой параметров f_i и C_i соответственно параметрами f_{\min} и C_{\min}), составила $T_n = 27,7$ Н·м. Значения параметров z и p приняты теми же, что и при построении кривой 2 на рис. 2.

Кривая 3 показывает, что при всех значениях коэффициента трения значение КУ при буксовании муфты меньше значения КУ, соответствующего срабатыванию АФМ. Это подтверждает, что в результате перемещения тел качения 7 в гнездах стакана 9 при буксовании муфты уменьшается угол давления α_i .

Уменьшение значения КУ в результате буксования муфты формально приводит к увеличению вращающего момента (см. формулу (11)) по сравнению с вращающим моментом, соответствующим срабатыванию АФМ. Однако при этом необходимо принять во внимание уменьшение значения коэффициента трения.

В связи с этим, обратимся к рис. 4, на котором показаны графики зависимости $T_{n,i}(f_i)$ для периода срабатывания муфты и для режима ее буксования (соответственно кривые 1 и 2). Графики построены по тем же исходным данным, что и графики, изображенные на рис. 2.

Значение КУ для построения кривой 1 вычислялось по соотношению (4), значения коэффициента n_i заимствованы из работы [5].

Из рис. 2 следует, что при вращающие моменты при буксовании муфты меньше, чем в период срабатывания. Очевидно, что

основной причиной этого является уменьшение коэффициента трения при буксовании муфты.

Таким образом, в процессе буксования муфта не создает перегрузку, превышающую ту перегрузку, которая возникает в момент ее срабатывания. При буксовании муфты установившееся состояние осевого равновесия стакана 9 при равенстве друг другу всех действующих на нее сил будет поддерживать вращающий момент при ее буксовании.

Однако, значение вращающего момента АФМ при буксовании превышает значение номинального вращающего момента (прямая 3) при всех, даже небольших, значениях коэффициента трения.

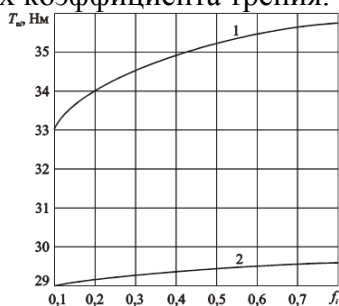


Рисунок 4. Зависимости вращающего момента АФМ от коэффициента трения

В случае остановки работы привода, в составе которого функционирует АФМ, распорная сила на телах качения 7 (рис. 1) обращается в ноль, в результате чего нарушается состояние осевого равновесия стакана 9 и она, под действием силы натяжения пружины 11, перемещается влево (по рисунку 1).

При этом происходит проскальзывание ведущих фрикционных дисков 3 (если полумуфта 1 соединена с двигателем привода) относительно ведомых дисков 4 и перекатывание тел качения 7 по стенкам гнезд. В результате этого происходит возврат всех тел системы в исходное положение.

Если перегрузка в приводе носит кратковременный характер, после срабатывания АФМ быстро прекращается и при этом отключение работы привода не происходит, то, согласно полученному выше результату (вращающий момент муфты при буксовании больше, чем ее номинальный вращающий момент), уменьшение внешней

нагрузки приводит к уменьшению распорной силы на телах качения 7 и к перемещению влево (по рис. 1) стакана 9.

В результате этого тела качения 7 занимают в гнездах положение, соответствующее передаче номинальной нагрузки.

Обсуждение и результаты. Установлено, что значение КУ обратной связи при срабатывании АФМ с переменным значением КУ уменьшается в процессе ее буксования.

Показано, что значение вращающего момента АФМ с переменным КУ в процессе буксования превышает значение ее номинального вращающего момента при всех реальных значениях коэффициента трения, кроме его минимального значения.

Результаты исследования, приведенные в настоящей работе, применимы для определения технико-эксплуатационных характеристик АФМ с переменным значением КУ обратной связи в зависимости от ее конструктивных параметров. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы, как составная часть, при разработке основ теории АФМ, в том числе с переменным значением КУ обратной связи.

Выводы

1. Значение КУ обратной связи при срабатывании АФМ меньше, чем его значение при буксовании муфты при номинальном вращающем моменте.
2. Найдена функциональная зависимость между КУ обратной связи при буксовании АФМ после ее срабатывания и соответствующим коэффициентом трения скольжения.
3. Значение вращающего момента АФМ с переменным значением КУ обратной связи в процессе буксования меньше, чем значение предельного вращающего момента при срабатывании муфты, для всех реальных значений коэффициента трения.
4. Значение вращающего момента АФМ с переменным значением КУ в процессе буксования превышает значение ее номинального вращающего момента при всех реальных значениях коэффициента трения, кроме его минимального значения.
5. По окончании действия внешней перегрузки или при отключении работы

привода машины элементы УУ отрицательной обратной связи занимают положение, соответствующее передаче муфтой номинального вращающего момента.

6. Точность срабатывания АФМ с переменным значением КУ обратной связи зависит от предельного вращающего момента при срабатывании муфты, соответствующего максимальному коэффициенту трения.

Библиографический список

1. Фокин А.Е., Гавриленко М.Д., Шишкарёв М.П. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения // Вестн. ДГТУ. – 2011. – Т. 11. – № 1 (52). – С. 49–56.
2. Шишкарёв М.П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 2. – С. 42–44.
3. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 9. – С. 25–32.
4. Запорожченко Р.М. Оптимальные характеристики предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1972. – № 7. – С. 32–36.
5. Есипенко Я.И., Паламаренко А.З., Афанасьев М.К. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки. – Киев: Техніка, 1972. – 168 с.
6. Афанасьев М.К. Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки: Автореф. дис....канд. техн. наук: – Киев, 1971. – 21 с.
7. Тепинкичиев В.К. Предохранительные устройства от перегрузки станков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 112 с.
8. Кравчук С.В. Универсальные предохранительные муфты // Приводная техника. – 1998. – № 6. – С. 38–40.
9. Запорожченко Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.
10. Зельцерман И.М. и др. Фрикционные муфты и тормоза гусеничных машин / И.М. Зельцерман, Д.М. Каминский, А.Д. Оношко. – М.: Машиностроение, 1965. – 238 с.
11. Ряховский О.А., Иванов С.С. Справочник по муфтам. – Л.: Политехника, 1991. – 384 с.
12. Запорожченко Р.М. Оптимальные параметры фрикционной предохранительной муфты // Изв. вузов. Машиностроение. – 1974. – № 5. – С. 21–27.

Information about the paper in English

M.P. Shishkarev
Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russia
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Receipt date: March 23, 2022

ANALYZING THE SLIPPING OF AN ADAPTIVE VARIABLE GAIN FRICTION COUPLING

Abstract

This paper describes a relationship between the feedback gain that occurs when an adaptive friction coupling is slipping after it has been enabled and the corresponding sliding friction coefficient. The author shows that when the coupling is slipping, its actual torque exceeds its torque rating at any friction coefficient value, except for the minimum one.

Keywords: Adaptive friction coupling, variable gain, sliding, slipping
