



УДК 621.838.222

М.П. Шишкарев
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (ДГТУ)
г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Дата поступления 10.12.2021

ТОЧНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Аннотация

Показано, что точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты со всеми ведущими парами трения при одинаковых параметрах выше, чем адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения. Найдены зависимости для вычисления значений коэффициента усиления обратной связи адаптивной фрикционной муфты с меньшим числом ведущих пар трения и адаптивной фрикционной муфты со всеми ведущими парами трения, при которых точность срабатывания и нагрузочная способность муфт одинаковы.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, точность срабатывания, первое поколение, коэффициент усиления, одноконтурная обратная связь.

Введение

Состояние вопроса. Для адаптивных фрикционных муфт (АФМ) первого поколения характерно наличие одноконтурной отрицательной обратной связи по усилию прижатия друг к другу пар трения фрикционной группы в зависимости от значения коэффициента трения [1, 2]. Благодаря этому точность срабатывания АФМ выше, чем у предохранительных фрикционных муфт, которые не имеют в своем составе управляющего устройства (УУ) обратной связи [3].

По конструктивно-компоновочной схеме АФМ первого поколения классифицируются на:

- муфты с дифференцированными парами трения типа «ведущие пары – ведомые пары» [4];
- муфты со всеми ведущими парами трения [5].

В муфтах первого из указанных классов часть полного вращающего момента между полумуфтами передается одним или определенной группой фрикционных дисков, получающих нагрузку от ведущей полумуфты непосредственно за счет сил трения. Вторая часть вращающего момента передается комбинированным способом – посредством чувствительных элементов УУ,

получающих нагрузку от ведущей полумуфты и передающих нагрузку второй группе фрикционных дисков. Первая из указанных фрикционная группа является ведущей, а вторая – ведомой.

В муфтах второго класса полный вращающий момент между полумуфтами передается чувствительными элементами УУ благодаря отсутствию фрикционной связи как между нажимным диском и ведущей полумуфтой, так и между ведомыми фрикционными дисками и ведущей полумуфтой.

Вследствие разницы между компоновочными схемами указанных классов АФМ, при одинаковых конструктивных параметрах, таких как число пар трения фрикционных дисков, величина среднего радиуса поверхностей трения, сила натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин), а также параметры УУ муфты передают неодинаковые предельные вращающие моменты [4, 5]. Причиной этого являются неодинаковые величины распорных (отжимных) усилий, развиваемых УУ.

Постановка задачи исследования. Анализ точности срабатывания АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения и АФМ со всеми ведущими парами трения.

Основная часть

Для решения поставленной задачи обратимся к рисунку 1, на котором изображены два варианта принципиальной схемы АФМ первого поколения:

– с дифференцированными парами трения – верхняя часть рисунок 1, а относительно оси вращения муфты;

– со всеми ведущими парами трения – нижняя часть рисунок 1, а относительно оси вращения муфты.

Муфта состоит из двух полумуфт 1 и 2, связанных одна с другой посредством фрикционной группы, которая включает диски 3 и 4. Диски 3 связаны при помощи

шлицевого соединения со ступицей нажимного диска 5, лишенного кинематической связи в окружном направлении со ступицей полумуфты 1. Диски 4 связаны аналогичным способом с барабаном полумуфты 2.

Связь дисков 3 и 4 с соответствующими элементами муфты позволяет передавать осевую нагрузку на поверхности трения.

УУ муфты состоит из тел качения 6, которые размещены в скошенных гнездах, выполненных на обращенных одна к другой торцовых поверхностях нажимного 5 и упорного 7 дисков (см. рис. 1, б, сечение А-А). Упорный диск 7 жестко закреплен на ступице полумуфты 1.

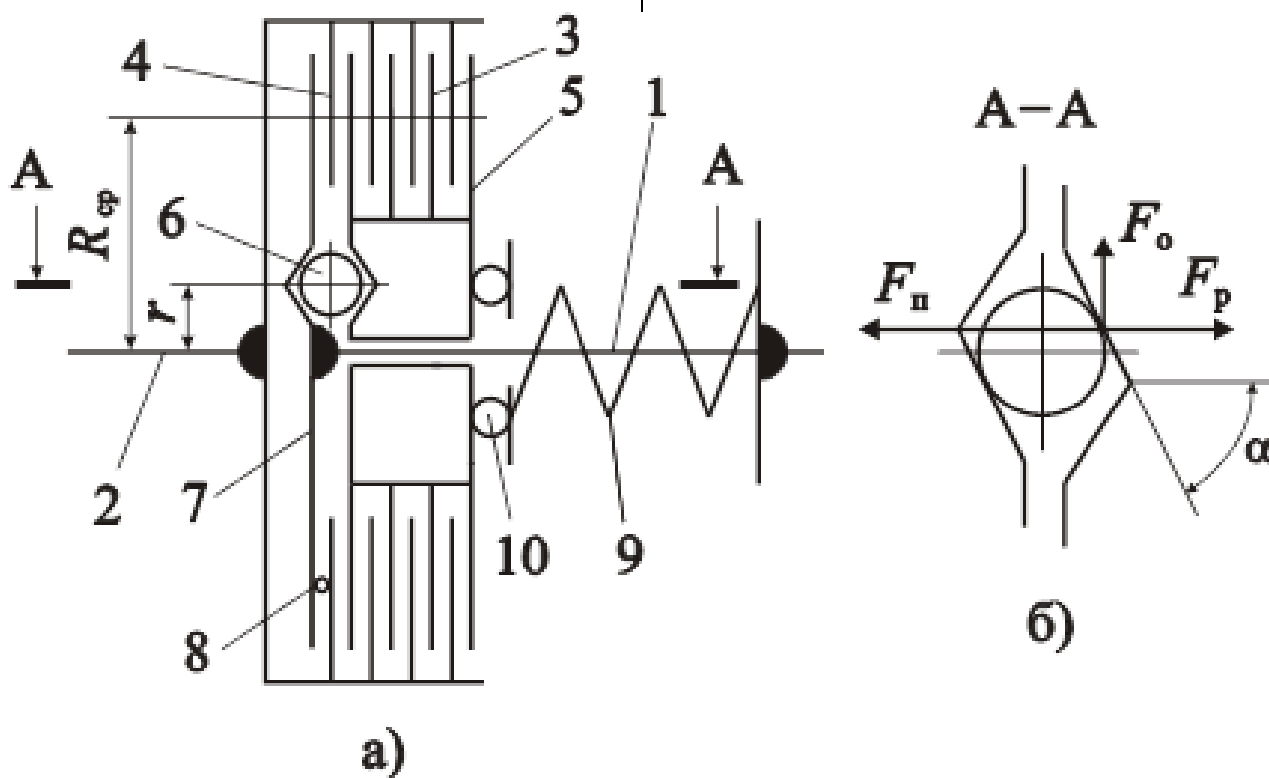


Рисунок 1. Варианты принципиальной схемы АФМ первого поколения

Компоновочная схема фрикционной группы АФМ, в соответствии с упомянутыми вариантами, выглядит следующим образом:

– левый (по рисунку 1, а, верхняя часть относительно оси вращения АФМ) фрикционный диск 4 находится в непосредственном контакте с упорным диском 7 посредством трения, что отражает схему дифференцирования пар трения фрикционной группы на ведущую (диск 4 – упорный диск 7) и ведомые пары (диски 3, 4 и нажимной

диск 5);

– между левым (по рисунку 1, а, нижняя часть относительно оси вращения АФМ) фрикционным диском 4 и упорным диском 7 установлен упорный подшипник 8, поэтому пары трения 3-4 и 4-5 являются ведущими.

Силовое замыкание пар трения фрикционной группы осуществляется пружиной 9, поставленной в муфту с предварительным натяжением. Усилие пружины передается на нажимной диск 5 через упорный

подшипник 10, с помощью которого существенно (до малозначимых величин) уменьшается влияние сил трения между пружиной и нажимным диском на работу УУ обратной связи.

Формулы для вычисления предельных значений вращающего момента АФМ для первого и второго вариантов конструктивно-компоновочной схемы фрикционной группы можно записать соответственно в виде [4, 5]:

$$T_{n,i} = zF_n R_{cp} \frac{f_i}{1 + (z-1)Cf_i}, \quad (1)$$

$$T_{n,i} = zF_n R_{cp} \frac{f_i}{1 + zCf_i}, \quad (2)$$

где z – общее число пар трения фрикционной группы муфты; F_n – сила натяжения пружины 9; $F_n = \text{const}$ для конкретной настройки АФМ; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков 3 и 4 (рисунок 1, а); f_i – коэффициент трения между дисками 3 и 4; C – коэффициент усиления (КУ) УУ обратной связи:

$$C = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

α – угол скоса гнезда под тело качения 6 (рисунок 1, б); r – радиус окружности, на которой расположены тела качения 6 (рисунок 1, а).

Анализ соотношений (1) и (2) показывает, что при одинаковых параметрах АФМ нагрузочная способность первого варианта конструктивно-компоновочной схемы фрикционной группы выше, чем второго варианта.

Точность срабатывания предохранительных муфт любого типа, в том числе АФМ, характеризуется коэффициентом точности [6], который вычисляется для сравниваемых вариантов соответственно по формулам:

$$K_{\tau 1} = \frac{f_{\max} [1 + (z-1)Cf_{\min}]}{f_{\min} [1 + (z-1)Cf_{\max}]}, \quad (3)$$

$$K_{\tau 2} = \frac{f_{\max} (1 + zCf_{\min})}{f_{\min} (1 + zCf_{\max})}, \quad (4)$$

где f_{\min} , f_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значения коэффициента трения [7].

В работе [8] показано, что в АФМ первого поколения, построенных по схеме муфты Н.Д. Вернера [9], независимо от конструкции УУ обратной связи, точность срабатывания повышается с увеличением КУ.

В данном случае следует рассматривать так называемый «приведенный» КУ обратной связи [10]. Для рассматриваемых вариантов АФМ формулы для вычисления приведенного КУ соответственно имеют вид:

$$C_{n1} = (z-1)C, \quad (5)$$

$$C_{n2} = zC. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) показывают, что при одинаковых параметрах z и C справедливо неравенство $C_{n1} < C_{n2}$. Следовательно, точность срабатывания АФМ со всеми ведущими парами трения выше, чем АФМ с дифференцированными парами трения.

В формулах (1), (3) и (5) число ведущих пар трения принято равным единице. Данное обстоятельство объясняется тем, что для АФМ с дифференцированными парами трения предельное значение КУ обратной связи ограничена в соответствии со следующим соотношением [4]:

$$C_{\max} = \frac{1}{z_1 f_{\max}}, \quad (7)$$

где z_1 – число ведущих пар трения.

Выражение (7) показывает, что увеличение параметра z_1 требует уменьшения значения КУ C_{\max} , что, согласно изложенному выше, приводит к снижению точности срабатывания муфты.

Оценим нагрузочную способность АФМ со всеми ведущими парами трения при условии выполнения равенства $C_{n1} = C_{n2}$. В этом случае значение КУ АФМ со всеми ведущими парами трения должно быть уменьшено. Новое значение КУ можно найти, приравняв друг другу правые части выражений (5) и (6). Получаем

$$C_1 = \frac{(z-1)C}{z}. \quad (8)$$

При выводе соотношения (8) в выражении (6) принято $C = C_1$ – новое значение КУ (см. выше).

Подставляя правую часть соотношения (8) в выражение (2) и произведя некоторые преобразования, приходим к выражению, идентичному формуле (1). Следовательно, уменьшение (это следует из формулы (7)) значения КУ обратной связи до значения, равного C_1 , приводит к выравниванию нагрузочной способности АФМ с дифференцированными парами трения и АФМ со всеми ведущими парами трения.

Исследуем также влияние изменения числа ведущих пар трения в АФМ с дифференцированными парами трения на сравнительные характеристики вариантов муфт. Положим, что число ведущих пар трения равно z_1 . Тогда на основании формул (1) и (3) запишем

$$T_{n,i} = zF_n R_{cp} \frac{f_i}{1 + (z - z_1)Cf_i}, \quad (9)$$

$$K_{r1} = \frac{f_{max} [1 + (z - z_1)Cf_{min}]}{f_{min} [1 + (z - z_1)Cf_{max}]}. \quad (10)$$

Поскольку в рассматриваемом случае имеем $z_1 > 1$, нагрузочная способность АФМ с дифференцированными парами трения, согласно соотношению (9), увеличивается. Что касается точности срабатывания муфты, продифференцируем один раз функцию (10) по переменной z_1 . В результате получаем следующее выражение (без учета положительного знаменателя и постоянных членов f_{min} и f_{max})

$$D(K_{r1})_{z_1} = (f_{max} - f_{min})C.$$

Первая производная положительная ($f_{max} > f_{min}$), поэтому функция (10) возрастает. Это означает, что с увеличением числа ведущих пар трения точность срабатывания АФМ уменьшается, если значения параметров z и C принять постоянными.

Однако при изменении параметра z_1 значение КУ C не остается постоянным. Согласно соотношению (7), оно уменьшается обратно пропорционально z_1 , поэтому, подставляя правую часть соотношения (7) в выражение (10) и произведя преобразования, получаем

$$K_{r1} = \frac{f_{max} [z + z_1(1 - f_{min})]}{zf_{min}}. \quad (11)$$

В реальных условиях эксплуатации

для сочетаний материалов пар трения, применяемых в АФМ, всегда выполняется условие $f_{min} < 1$ [11], следовательно, функция (11) возрастает при увеличении параметра z_1 . Это означает снижение точности срабатывания муфты.

Для рассматриваемого случая приведенный КУ обратной связи равен

$$C_{пз} = (z - z_1)C. \quad (12)$$

Приравнявая друг другу правые части выражений (6) и (12), в результате решения составленного уравнения получаем

$$C_2 = \frac{(z - z_1)C}{z}. \quad (13)$$

Соотношение (13) показывает функциональную связь между КУ C_2 и КУ C , определяющую значение КУ C_2 , при котором нагрузочная способность сравниваемых вариантов АФМ одинаковая. Поскольку $z_1 > 1$, значение C_2 , очевидно, меньше значения КУ C_1 (см. выражение (8)).

Выполним аналогичное исследование, сопоставив варианты АФМ с дифференцированными парами трения, в одном из которых фрикционная группа содержит одну ведущую пару трения, а в другом – несколько ведущих пар трения.

Данное исследование обусловлено тем, что, согласно полученным результатам, число ведущих пар трения влияет как на нагрузочную способность АФМ, так и на точность ее срабатывания.

Установим, при каком значении КУ АФМ с одной ведущей парой трения ее нагрузочная способность и точность срабатывания равны аналогичным показателям АФМ, имеющей несколько ведущих пар трения в составе фрикционной группы. При этом будем учитывать формулу (12) для вычисления приведенного значения КУ.

С учетом выражений (5) и (13) найдем искомое значение КУ АФМ с одной ведущей парой трения фрикционной группы:

$$C_3 = \frac{(z - z_1)}{z - 1} C. \quad (14)$$

Из соотношения (14) следует, что $C_3 < C$.

Графики зависимостей $C_2(z_1)$ и

$C_3(z_1)$ при различных значениях z показаны на рисунке 2 кривыми 1–4 (кривые 1 и 2 – графики зависимости $C_2(z_1)$). При построении графиков учтено неизбежное изменение значения КУ C согласно соотно-

шению (7). Графики построены по следующим исходным данным: $f_{\max}=0,8$, $z=8; 10$ (соответственно для нечетных и четных кривых).

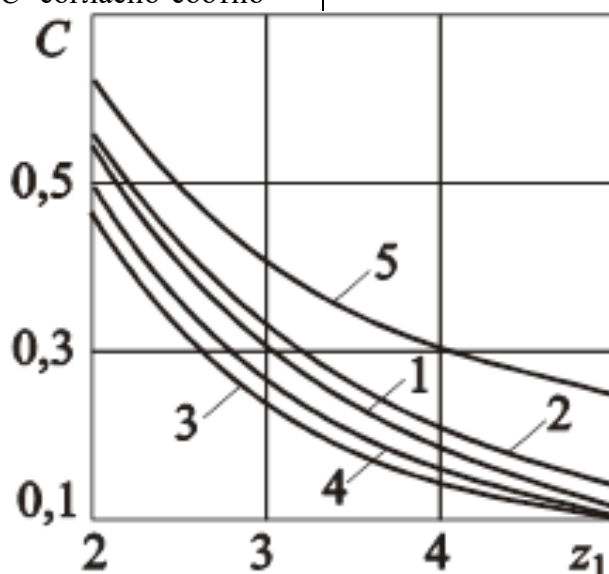


Рисунок 2. Зависимости коэффициента усиления от числа ведущих пар трения

Анализ графиков показывает следующее:

- с увеличением числа ведущих пар трения значение КУ в АФМ с одной ведущей парой трения уменьшается независимо от общего числа пар трения фрикционной группы (кривые 1 и 2). При этом условии обеспечивается равенство нагрузочной способности и точности срабатывания сравниваемых вариантов АФМ (см. выше);

- с увеличением общего числа пар трения фрикционной группы требуемое значение КУ АФМ с одной ведущей парой трения по указанному выше условию увеличивается (кривые 1 и 2);

- с увеличением числа ведущих пар трения уменьшается значение КУ, при котором нагрузочная способность сравниваемых вариантов АФМ одинаковая (кривые 3 и 4).

Для сопоставления на рисунке 2 приведена кривая 5, отражающая зависимость значения КУ АФМ с несколькими ведущими парами трения от их числа. Графики показывают, что разность между величинами C и C_3 возрастает по мере увеличения числа ведущих пар трения как в первом ($z=8$), так и во втором ($z=10$) случаях.

Обоснование необходимости уменьшения значения КУ

Полученные результаты показывают, что в АФМ с одной ведущей парой трения и в АФМ со всеми ведущими парами трения значение КУ может быть уменьшена для того чтобы уравнивать их нагрузочную способность и точность срабатывания с аналогичными эксплуатационными характеристиками АФМ с числом ведущих пар трения, большим единицы. При неизменных значениях параметров R_{cp} и r (см. выше) значение КУ может быть уменьшено за счет соответствующего уменьшения угла α . Такое действие никак не отразится радиальных габаритных размерах муфты.

Уменьшение значения КУ в АФМ целесообразно по двум причинам.

1. В работе [12] показано, что при некотором критическом значении КУ АФМ первого поколения как с дифференцированными, так и со всеми ведущими парами трения в приводе машины возникают незатухающие колебания с прогрессирующей амплитудой, которая с течением времени превышает значение предельного вращающего момента при срабатывании муфты. Установлено также, что значение КУ влияет на

повторные амплитуды вращающего момента при буксовании муфты, которое сопровождается процессом срабатывания при несвоевременном выключении вращения муфты [13], причем, с увеличением КУ наблюдается рост амплитудных значений вращающего момента. Поэтому с данной точки зрения уменьшение значения КУ представляется целесообразным.

2. После срабатывания АФМ в процессе ее возврата в исходное (до наступления срабатывания) состояние элементы УУ должны также занять исходное (относительно друг друга) положение. Это означает, что тела качения УУ должны занять такое положение относительно стенок гнезд, которое они занимали до наступления срабатывания муфты.

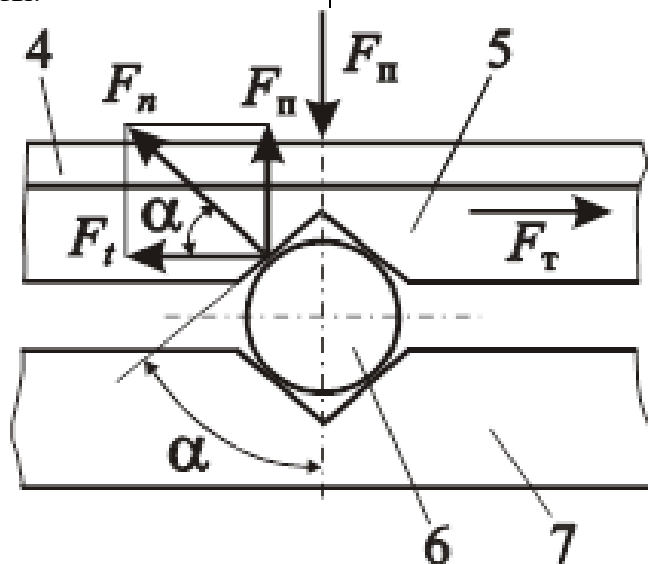


Рисунок 3. Схема действия сил на нажимной диск 5

Смещению нажимного диска 5 относительно обобщенного фрикционного диска 4 в тангенциальном (см. выше) направлении противодействует приведенная к плоскости фрикционного контакта тел 4 и 5 суммарная сила трения F_T , которая действует на поверхностях фрикционных контактов 3, 4 и 5 (см. рисунок 1).

Условие возврата фрикционных дисков 3 и связанного с ними нажимного диска 5 в исходное положение по окончании действия перегрузки или после остановки вращения муфты имеет следующий вид:

$$F_T > F_t. \quad (15)$$

Не учитывая (ввиду малости) силу

Рассмотрим, с этой точки зрения, схему, изображенную на рисунке 3. На схеме показаны силы, действующие на нажимной диск 5 со стороны тела качения 6 (номера позиций тел, изображенных на рисунке 1 и на рисунке 3 соответствуют друг другу, а все равномерно распределенные между телами качения 6 силы приведены к одному телу качения). Согласно схеме сила натяжения пружины F_n вызывает появление силы нормального давления F_n , горизонтальной (по схеме) составляющей которой является тангенциальная сила F_t , действующая параллельно плоскости фрикционного контакта дисков.

трения качения, приведенную к кинематической паре 5–6, запишем

$$F_t = \frac{F_n}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (16)$$

Учитывая, что в рассматриваемом случае сила F_n является нормальной силой, действующей на поверхности трения фрикционного контакта, сила трения вычисляется по следующей формуле:

$$F_T = (z - z_1) F_n f_i. \quad (17)$$

Подставляя правые части выражений (16) и (17) в неравенство (15), получаем

$$\frac{1}{(z - z_1) \operatorname{tg} \alpha} > f_i. \quad (18)$$

Из неравенства (18) следует, что при

увеличении коэффициента трения f_i требуется меньшее значение угла α для того чтобы обеспечивался возврат в исходное положение тел фрикционной группы и УУ по окончании буксования муфты или после остановки ее движения.

Учитывая возможное рассеивание значения коэффициента трения в процессе эксплуатации АФМ, из соотношения (18) найдем следующее ограничение значения угла α :

$$\operatorname{tg}\alpha_{\min} < \frac{1}{(z - z_1)f_{\max}}. \quad (19)$$

Поскольку между значениями C и $\operatorname{tg}\alpha$ существует прямо пропорциональная зависимость (см. выше), очевидно стремление к уменьшению значения $\operatorname{tg}\alpha$ в целом и угла α в частности. Это объясняет преимущество АФМ первого поколения со всеми ведущими парами трения и с меньшим числом ведущих пар трения (для АФМ с дифференцированными парами трения) по отношению к АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения, имеющей большее число ведущих пар трения.

Зависимости (16) – (19) записаны для статического состояния муфты, когда она не передает нагрузку, и распорная сила равна нулю. В том случае, когда переход элементов муфты в исходное положение происходит в процессе передачи нагрузки, действие распорной силы УУ приводит к уменьшению силы трения F_T , что облегчает перемещение элементов АФМ и, во всяком случае, подтверждает справедливость условия (19).

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ первого поколения для выбора конструктивно-компоновочного решения фрикционной группы в зависимости от конкретных условий ее эксплуатации.

Выводы

1. При одинаковых конструктивных параметрах муфт и УУ АФМ со всеми ведущими парами трения передает меньший номинальный вращающий момент по сравнению с АФМ с дифференцированными парами трения типа «ведущие пары – ведомые пары».

2. Точность срабатывания АФМ со всеми ведущими парами трения при одинаковых параметрах выше, чем АФМ с дифференцированными парами трения.

3. Значение приведенного КУ обратной связи АФМ со всеми ведущими парами трения при одинаковых параметрах УУ и фрикционной группы выше, чем у АФМ с дифференцированными парами трения.

4. С увеличением числа ведущих пар трения АФМ с дифференцированными парами трения повышается ее нагрузочная способность и снижается точность срабатывания.

5. Неодинаковая точность срабатывания АФМ с дифференцированными парами трения и АФМ со всеми ведущими парами трения позволяет уравнивать их точность срабатывания и нагрузочную способность за счет уменьшения значения КУ обратной связи последней из упомянутых муфт.

6. Запас по точности срабатывания АФМ с дифференцированными парами трения, имеющей меньшее число ведущих пар трения, позволяет уменьшить значение КУ для выравнивания точности срабатывания по отношению к АФМ с большим числом ведущих пар трения.

7. Найденны зависимости для вычисления значений КУ обратной связи АФМ с меньшим числом ведущих пар трения и АФМ со всеми ведущими парами трения, при которых точность срабатывания и нагрузочная способность муфт одинаковы.

8. Большой эффект, с точки зрения уменьшения значения КУ АФМ с одной ведущей парой трения и АФМ со всеми ведущими парами трения. Имеет место при увеличении числа ведущих пар трения в АФМ с дифференцированными парами трения.

9. При увеличении общего числа пар трения необходимое значение КУ АФМ с одной ведущей парой трения, по условию равенства точности срабатывания и нагрузочной способности сравниваемых муфт, должно быть увеличено.

10. Уменьшение значения КУ АФМ с одной ведущей парой трения и АФМ со всеми ведущими парами трения целесообразно как с точки зрения снижения амплитуд колебаний в переходные периоды, так и

с точки зрения облегчения процесса возврата в исходное положение элементов УУ.

Библиографический список

1. Шишкарёв М.П. Теоретические основы применения комбинированной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 16–19.
2. Дьяченко С.К., Киркач Н.Ф. Предохранительные муфты. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 122 с.
3. Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. – 352 с.
4. Шишкарёв М.П. Теоретические основы применения двухконтурной отрицательной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 8. – С. 19–21.
5. Шишкарёв М.П. Математические модели высокой надежности адаптивных фрикционных муфт // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVI Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева / РГАСХМ ГОУ, Ростов н/Д, 2003. – С. 231–234.
6. Тепинкичиев В.К. Предохранительные устройства от перегрузки станков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 112 с.
7. Трение и износ фрикционных материалов / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Наука, 1977. – 136 с.
8. Запорожченко Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.
9. Афанасьев М.К. Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки: Автореф. дис.канд. техн. наук: – Киев, 1971.–21с.
10. Шишкарёв М.П. Уточнение характеристики обратной связи адаптивных фрикционных муфт / Вестн. машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 12–13.
11. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. – М.: Машгиз, 1962. – 220 с.
12. Шишкарёв М.П. Математическая модель устойчивости движения привода с адаптивной фрикционной муфтой // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 8. Секция 8 «Компьютерная поддержка технологических процессов и производственных систем» / Под общ. ред. В.С. Балакирева. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 70–75.
13. Запорожченко Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.

Information about the paper in English

M.P. Shishkarev
Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russia
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Received 10.12.2021

OPERATION ACCURACY OF ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES OF THE FIRST GENERATION

Abstract

It is shown that operation accuracy of adaptive friction clutches with all driving friction couples with the same parameters is higher than adaptive friction clutches with differential friction couples. The paper describes the dependencies to calculate feedback gain of the adaptive friction clutch with less driving friction couples and the adaptive friction clutch with all driving friction couples, when operation accuracy and load capacity of clutches are the same.

Keywords: adaptive friction clutch, operation accuracy, the first generation, gain, single-loop feedback.
