

УДК 621.838.222

**М. П. Шишкарев**, д-р техн. наук, доцент

Донской государственной технической университет, РФ

Тел.: 8(908)193-33-93; E-mail: [shishkarev\\_m\\_p@mail.ru](mailto:shishkarev_m_p@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*В статье приведены результаты исследования модернизированных вариантов адаптивной фрикционной муфты второго поколения. Показано, что с увеличением отношения максимального значения коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы к максимальному значению коэффициента трения между ведущими парами трения основной фрикционной группы уменьшается точность срабатывания модернизированной адаптивной фрикционной муфты второго поколения, если указанное отношение меньше единицы. Установлено, что с увеличением указанного отношения повышается точность срабатывания муфты, если это отношение больше единицы.*

**Ключевые слова:** Адаптивная фрикционная муфта, второе поколение, базовый вариант, модернизация, точность срабатывания, коэффициент трения.

**M. P. Shishkarev**

### MODIFICATION OF THE ADAPTIVE SECOND-GENERATION FRICTION CLUTCH

*The article presents the results of a study of modernized variants of the adaptive friction clutch of the second generation. It is shown that with an increase in the ratio of the maximum value of the coefficient of friction in the friction pair of the additional friction group to the maximum value of the coefficient of friction between the leading friction pairs of the main friction group, the accuracy of the operation of the upgraded adaptive friction clutch of the second generation decreases if the specified ratio is less than one. It is established that with an increase in the specified ratio, the accuracy of the coupling operation increases if this ratio is greater than one.*

**Keywords:** Adaptive friction clutch, second generation, basic version, modernization, actuation accuracy, coefficient of friction.

#### 1. Введение

В работах [1, 2, 3, 4] приведены результаты исследований адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения (базовый вариант), показано, что задача повышения точности ее срабатывания в рамках принятой конструктивно-компоновочной схемы решения не имеет.

**Цель исследования.** Оценка влияния на точность срабатывания муфты отношения максимального значения коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы к максимальному значению коэффициента трения между ведущими парами трения основной фрикционной группы.

**Задачи исследования.** 1. Исследование влияния отношения максимального коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы к максимальному коэффициенту трения между ведущими парами трения основной фрикционной группы. 2. Изучение влияния максимального значения коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы на предельное значение коэффициента усиления обратной связи.

#### 2. Основное содержание и результаты работы

Исследуем точность срабатывания АФМ, для чего используем предельные значения коэффициента трения. Согласно поставленному условию первого варианта муфты имеем:

$$\begin{aligned} f_{\max 1} &= m f_{\max}, \\ f_{\max 2} &= n f_{\max}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f_{\max 1}$  и  $f_{\max 2}$  – соответственно максимальный коэффициент трения между ведомыми па-

рами основной фрикционной группы и максимальный коэффициент трения в паре дополнительной фрикционной группы;  $m$  и  $n$  – коэффициенты:  $m \neq 1$  и  $n \neq 1$ ;  $f_{\max}$  – максимальное значение коэффициента трения, которое он может принимать в процессе эксплуатации АФМ.

Для сочетаний материалов пар трения, применяемых в предохранительных фрикционных муфтах, в том числе в АФМ, минимальный коэффициент трения изменяется в зависимости от влияния различных факторов гораздо в меньшей степени, чем максимальный коэффициент трения [5]. В связи с этим с целью упрощения решения задачи в дальнейшем будем считать, что минимальный коэффициент трения всех пар АФМ одинаков и равен  $f_{\min}$ .

С учетом изложенного запишем выражение для определения значения коэффициента точности АФМ [6, 7, 8], для чего используем полученное в работе [9] соотношение:

$$K_T = \frac{f_{\max} [1 + z_1 m - n(Cf_{\max} - 1)] (1 + z_1 Cf_{\min})}{f_{\min} (2 + z_1 - Cf_{\min}) (1 + z_1 Cmf_{\max})}. \quad (2)$$

В выражении (2) учтено обстоятельство, что минимальные значения коэффициентов трения всех пар АФМ одинаковы, поэтому в данном случае коэффициенты  $m$  и  $n$  равны единице.

Для того чтобы исследуемый вариант АФМ обладал наибольшей точностью срабатывания, при максимальной величине коэффициента трения распорная сила УУ  $F_{p,\max}$  должна быть равна силе натяжения пружины, замыкающей пары трения. Согласно соотношению, полученному в работе [10], значение распорной силы УУ зависит не только от значения коэффициента усиления (КУ), но и, в соответствии с представлением текущих коэффициентов трения в парах основной и дополнительной фрикционных групп, от коэффициентов  $m$  и  $n$ .

Для максимальных значений коэффициента трения между парами всех фрикционных групп заменим в формуле

$$F_{pi} = F_n C \frac{z_1 f_{i1} + f_{i2}}{1 + z_1 C f_{i1}},$$

полученной в работе [11], параметры соответственно на  $f_{\max 1}$  и  $f_{\max 2}$ , и используем представление (1) в равенстве  $F_{p,\max} = F_n$ . Решая это равенство относительно неизвестного  $C$ , находим:

$$C = \frac{1}{n f_{\max}}. \quad (3)$$

Выше приняты следующие обозначения:  $z_1$  – число пар трения дополнительной фрикционной группы;  $C$  – КУ обратной связи;  $f_{\min}$  – минимальный коэффициент трения;  $f_{i1}$ ,  $f_{i2}$  – соответственно текущие коэффициенты трения в парах основной и дополнительной фрикционных групп.

Из соотношения (3) следует, что предельное значение КУ обратной связи зависит не

только от максимального значения коэффициента трения, но и от величины коэффициента  $n$ . С учетом представления (11) это означает, что предельное значение КУ обратно пропорционально максимальному коэффициенту трения в паре дополнительной фрикционной группы.

С учетом соотношения (3) выражение (2) принимает следующий вид:

$$K_{\tau} = \frac{f_{\max}(nf_{\max} + z_1 f_{\min})}{f_{\min}[(2 + z_1)nf_{\max} - f_{\min}]}. \tag{4}$$

Проведенными исследованиями установлено, что точность срабатывания АФМ первого поколения увеличивается о мере роста значения КУ. Данное утверждение справедливо и в отношении базового варианта АФМ второго поколения: увеличение КУ в пределах, ограниченных условием  $C \leq 1/f_{\max}$ , приводит к повышению ее точности срабатывания.

На основании этого в формуле (3) должно быть принято  $n < 1$ . Это означает, что максимальный коэффициент трения пары трения основной фрикционной группы будет меньше, чем максимальный коэффициент трения пары дополнительной фрикционной группы, если необходимо получить большее значение  $C$ .

График функции (4) приведен на рис. 1 (кривая 1). Исходные данные, принятые при построении графика:  $f_{\max} = 0,8$ ,  $z_1 = 2$ ,  $f_{\min} = 0,1$ .

Анализ графика показывает следующее:

- АФМ практически малочувствительна, с точки зрения точности срабатывания, к изменению максимального значения коэффициента трения между ведомыми парами трения основной фрикционной группы;
- точность срабатывания исследуемого варианта АФМ второго поколения уменьшается при увеличении коэффициента  $n$ . Это означает, что максимальное значение коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы, в отличие от коэффициента  $m$ , существенно влияет на точность срабатывания АФМ;
- при всех значениях коэффициента  $n < 1$ , точность срабатывания исследуемого варианта АФМ выше, чем при  $n > 1$ , точность срабатывания базового варианта АФМ второго поколения (рис. 2, кривая 1 и прямая 2, отражающая точностную характеристику базового варианта АФМ второго поколения), которая построена по зависимости (12) при  $m = n = 1$  и тех же исходных данных, принятых при построении кривой 1.

Для объяснения факта повышения точности срабатывания исследуемой АФМ по сравнению с ее базовым вариантом и влияния значения коэффициента  $n$  на точность срабатывания подставим в правую часть соотношения для  $F_{pi}$  (см. выше) правую часть выражения (3) и, используя представления (1), получаем:

$$F_{p.i} = \frac{F_n}{nf_{\max}} \times \frac{z_1 m f_i + n f_i}{1 + z_1 m f_i / (n f_{\max})}.$$

На основе полученного выражения находим зависимость распорной силы при минимальном значении коэффициента трения:

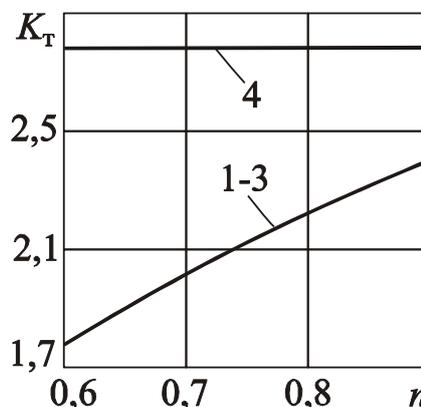


Рисунок 1. Зависимости коэффициента точности от коэффициента  $n$

$$F_{p.min} = F_{\pi} \frac{(z_1 + 1)f_{min}}{nf_{max} + z_1 f_{min}}. \quad (5)$$

При максимальном значении коэффициента трения и выполнении условия (3) распорная сила равна силе натяжения замыкающей пружины. Вращающий момент АФМ в данном случае равен моменту  $T_{3max}$  и, согласно ранее найденному соотношению, равен:

$$T_{3max} = F_{\pi} R_{cp} n f_{max}. \quad (6)$$

Распорная сила базового варианта АФМ равна, с учетом соотношения (5) и при  $n=1$ :

$$F'_{pmin} = F_{\pi} \frac{(z_1 + 1)f_{min}}{f_{max} + z_1 f_{min}}. \quad (7)$$

Сопоставление правых частей соотношений (5) и (7) показывает, что  $F_{pmin} > F'_{pmin}$ , следовательно, значение вращающего момента исследуемой АФМ при минимальном значении коэффициента трения больше, чем у базового варианта АФМ второго поколения.

Согласно ранее найденному соотношению, максимальное значение вращающего момента базового варианта АФМ второго поколения вычисляется по формуле:

$$T'_{3max} = F_{\pi} R_{cp} f_{max}. \quad (8)$$

Сопоставляя соотношения (6) и (8), видим, что при  $n < 1$  выполняется следующее неравенство

$$T_{3max} < T'_{3max}.$$

В приведенных формулах использованы следующие обозначения:  $T_{3max}$  – максимальный момент сил трения дополнительной фрикционной группы;  $T'_{3max}$  – максимальный вращающий момент базового варианта АФМ второго поколения.

После подстановки правой части соотношения (5) в выражения для вращающих моментов ведущей и ведомых пар трения основной фрикционной группы получаем:

$$T_{\pi min} = F_{\pi} R_{cp} f_{min} \frac{(z_1 + 2)n f_{max} - f_{min}}{n f_{max} + z_1 f_{min}}. \quad (9)$$

Для базового варианта АФМ второго поколения ( $n=1$ ) запишем, используя соотношение (9):

$$T'_{\pi min} = F_{\pi} R_{cp} f_{min} \frac{(z_1 + 2)f_{max} - f_{min}}{f_{max} + z_1 f_{min}}. \quad (10)$$

Исследуем изменение разностей вращающих моментов  $T_{\pi min}$  и  $T'_{\pi min}$ ,  $T_{3max}$  и  $T'_{3max}$ , используя для этого соответственно выражения (9) и (10), (6) и (8).

Для разности вращающих моментов  $T'_{\pi min} - T_{\pi min}$  получаем:

$$T'_{\pi min} - T_{\pi min} = \frac{F_{\pi} R_{cp} f_{min}^2 f_{max} (1-n)[z_1(z_1 + 2) + 1]}{(n f_{max} + z_1 f_{min})(f_{max} + z_1 f_{min})}. \quad (11)$$

Для разности вращающих моментов  $T'_{3max} - T_{3max}$  находим:

$$T'_{3max} - T_{3max} = F_{\pi} R_{cp} f_{max} (1-n). \quad (12)$$

Разность между правыми частями соотношений (11) и (12) равна:

$$\Delta T = F_{\text{п}} R_{\text{ср}} f_{\text{max}} (1-n) \frac{(nf_{\text{max}} + z_1 f_{\text{min}})(f_{\text{max}} + z_1 f_{\text{min}}) - f_{\text{min}}^2 [1 + z_1(z_1 + 2)]}{(nf_{\text{max}} + z_1 f_{\text{min}})(f_{\text{max}} + z_1 f_{\text{min}})} \quad (13)$$

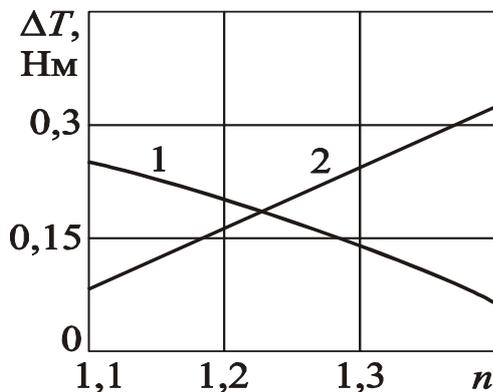


Рисунок 2. Зависимости  $\Delta T(n)$

В рассматриваемом случае  $n < 1$ , поэтому знак разности  $\Delta T$  (положительный или отрицательный) зависит от знака числителя в соотношении (13). График функции  $\Delta T(n)$  без учета постоянных членов  $F_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{ср}}$  и  $f_{\text{max}}$ , построенный на основе соотношения (13), показан на рис. 2 (кривая 1). График построен по тем же исходным данным, что и графики на рис. 1.

График показывает, что упомянутая функция убывающая, однако, в пределах значений коэффициента  $n$ , принятых при построении графика, положительная. Это свидетельствует о том, что при каждом значении коэффициента  $n$  уменьше-

ние вращающего момента  $T_{3\text{max}}$  больше, чем уменьшение вращающего момента  $T_{\text{пmin}}$ . Этим объясняется более высокая точность срабатывания и исследуемой АФМ.

Вследствие убывающего характера функции (3) разность вращающих моментов  $\Delta T$  уменьшается при увеличении коэффициента  $n$ , что влияет на значение коэффициента точности АФМ (рис. 1, кривые 1–3).

**Вариант 2.** В соответствии с поставленным условием  $m < 1$ ,  $n < 1$ . Для исследования точности срабатывания АФМ справедливо соотношение (4), поэтому используем его для построения графика функции. График показан на рис. 3 и построен при принятых ранее исходных данных.

Анализ графика показывает следующее:

- с увеличением коэффициента  $n$  точность срабатывания исследуемой АФМ повышается, о чем свидетельствует уменьшение значения  $K_{\text{T}}$ ;

- в целом точность срабатывания АФМ при  $n > 1$  выше, чем при  $n < 1$  (рис. 1, кривые 1–3);

- точность срабатывания исследуемой АФМ при  $n > 1$  выше, чем при  $n = 1$  (рис. 1, прямая 4).

Для объяснения более высокой точности срабатывания исследуемой АФМ по сравнению с базовым вариантом АФМ второго поколения воспользуемся примененным выше приемом.

В данном случае, учитывая, что  $n > 1$ , справедливы следующие неравенства:

$$T_{\text{пmin}} > T'_{\text{пmin}},$$

$$T_{3\text{max}} > T'_{3\text{max}}.$$

Таким образом, в рассматриваемом варианте АФМ:

- вращающий момент муфты при минимальном значении коэффициента трения больше, чем вращающий момент базового варианта АФМ;

- вращающий момент муфты при максимальном значении коэффициента трения больше, чем вращающий момент базового варианта АФМ.

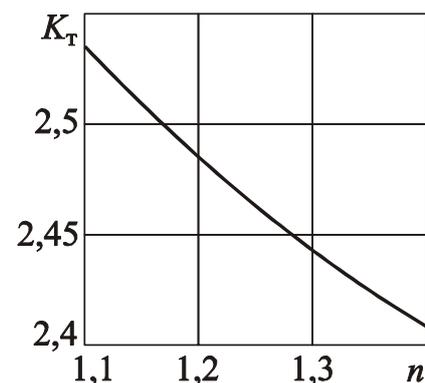


Рисунок 3. Зависимость коэффициента точности АФМ от коэффициента  $n$

Указанные обстоятельства объясняются тем, что в исследуемом варианте АФМ при  $n > 1$  значение КУ обратной связи, согласно соотношению (3), меньше, чем при  $n < 1$ .

В соответствии с изложенным выше запишем:

$$T_{n\min} - T'_{n\min} = \frac{F_n R_{cp} f_{\min}^2 f_{\max} (n-1) [z_1 (z_1 + 2) + 1]}{(n f_{\max} + z_1 f_{\min})(f_{\max} + z_1 f_{\min})}, \quad (14)$$

$$T_{3\max} - T'_{3\max} = F_n R_{cp} f_{\max} (n-1). \quad (15)$$

Аналогично соотношению (13) запишем, учитывая выражения (14) и (15):

$$\Delta T' = F_n R_{cp} f_{\max} (n-1) \frac{(n f_{\max} + z_1 f_{\min})(f_{\max} + z_1 f_{\min}) - f_{\min}^2 [1 + z_1 (z_1 + 2)]}{(n f_{\max} + z_1 f_{\min})(f_{\max} + z_1 f_{\min})}. \quad (16)$$

График функции  $\Delta T'(n)$ , построенный по соотношению (16), показан на рис. 2 (прямая 2). График построен по тем же исходным данным, что и кривая 1. При построении прямой 2 принято то же условие, что и при построении кривой 1 (см. выше).

График показывает следующее:

- функция (16) возрастает по аргументу  $n$ ;
- увеличение разности значений вращающих моментов при возрастании коэффициента  $n$  служит объяснением повышения точности срабатывания исследуемой АФМ.

*Вариант 3.* В соответствии с данным вариантом имеем  $n = m < 1$ . Поскольку, как показано выше (см. соотношение (3)), значение КУ обратной связи АФМ зависит только от одного из указанных коэффициентов –  $n$ , данный вариант идентичен по поставленному условию, а также с точки зрения исследования точности срабатывания АФМ, первому варианту (см. выше). В соответствии с этим показатели точности АФМ полностью соответствуют данному варианту ее выполнения, и дополнительное исследование не требуется.

**Обсуждение и результаты.** Результаты исследования показали, что на предельное значение КУ обратной связи и, следовательно, на точность срабатывания АФМ влияет только максимальное значение коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и расчетах АФМ второго поколения (базовый вариант) для определения оптимальных триботехнических характеристик пар трения с целью получения наиболее высокой нагрузочной способности и точности срабатывания.

### 3. Заключение

1. На предельное значение КУ обратной связи АФМ влияет только максимальное значение коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы.

2. С увеличением отношения максимального значения коэффициента трения в паре трения дополнительной фрикционной группы к максимальному значению коэффициента трения между ведущими парами трения основной фрикционной группы уменьшается точность срабатывания АФМ, если указанное отношение меньше едини-

цы.

3. С увеличением указанного в п. 2 отношения повышается точность срабатывания АФМ, если это отношение больше единицы.

4. Точность срабатывания АФМ выше при значении указанного в п. 2 отношения, меньшем единицы.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Эксплуатационные характеристики адаптивной фрикционной муфты второго поколения с раздельным силовым замыканием / Шишкарев М. П., Лущик А. А // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 3. – С. 28–31.

2. Шишкарев, М. П. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием / Шишкарев М. П., Угленко А. Ю. // Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14. № 1 (76). – С. 200–203.

3. Шишкарев, М. П. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения / Шишкарев М. П., Чан Ван Дык // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 5. – С. 33–38.

4. Шишкарев, М. П. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием / Шишкарев М.П., Угленко А. Ю. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 3. – С. 36–41.

5. Шишкарев, М. П. Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения / Шишкарев М. П. // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 36–39.

6. Шишкарев, М. П. Оптимизация компоновочного решения базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения / Шишкарев М. П // Вестник машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 7–10.

7. Шишкарев, М. П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт / Шишкарев М. П // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 3–6.

8. Шишкарев, М. П. Исследование эксплуатационных характеристик адаптивной фрикционной муфты второго поколения / Шишкарев М.П., Угленко А. Ю. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 4. – С. 21–26.

9. Шишкарев, М. П. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения / Шишкарев М. П., Чан Ван Дык // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.

10. Шишкарев, М. П. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения / Шишкарев М.П., Угленко А. Ю // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012. – № 10. – С. 3–6.

Поступила в редколлегию 21.03.2022 г.