

УДК 621.838.222

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

Донской государственной технической университет, РФ

Тел.: 89081933393; E-mail: [shishkarev\\_m\\_p@mail.ru](mailto:shishkarev_m_p@mail.ru)**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПЕРЕГРУЗОК В АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТАХ С ПЕРЕМЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ**

*В работе раскрывается механизм возникновения перегрузок в адаптивной фрикционной муфте первого поколения с переменным значением коэффициента усиления обратной связи. Показано, что адаптивная фрикционная муфта с отрицательной обратной связью и переменным значением коэффициента усиления обратной связи не обеспечивает полной стабилизации номинального вращающего момента, что обусловлено необходимостью в процессе автоматического регулирования приложения дополнительных усилий для увеличения распорной силы при изменении значения коэффициента трения.*

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, отрицательная обратная связь, переменное значение, коэффициент усиления обратной связи, коэффициент трения, перегрузка.

**M. P. Shishkarev****THEORETICAL BASIS FOR ESTIMATING THE LEVEL OF OVERLOADS IN ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES WITH VARIABLE GAIN**

*The paper reveals the mechanism of overload in the adaptive friction clutch of the first generation with a variable value of the feedback gain. It is shown that an adaptive friction clutch with negative feedback and a variable value of the feedback gain does not provide complete stabilization of the nominal torque, which is due to the need to apply additional forces in the process of automatic control to increase the spacer force when the coefficient of friction changes.*

**Keywords:** adaptive friction coupling, negative feedback, variable value, feedback gain, friction coefficient, overload.

**1. Введение**

Результатами исследований, изложенными в работах [1, 2], являются функциональные зависимости значения распорной силы управляющих устройств (УУ) адаптивных фрикционных муфт (АФМ) от изменяющегося с течением времени значения коэффициента трения между элементами фрикционных пар. При реализации этих зависимостей значение вращающего момента АФМ при срабатывании сохраняется постоянным и не зависит от значения коэффициента трения [3, 4].

Указанная особенность, в отличие от АФМ с постоянным значением коэффициента усиления (КУ) обратной связи, обусловлена КУ с переменным значением.

**Цель исследования.** Установление факторов, влияющих на величину перегрузки, вносимой АФМ в кинематическую цепь привода машины.

**Задачи исследования.** 1. Анализ процесса срабатывания АФМ с переменным значением КУ обратной связи. 2. Оценка уровня перегрузок, вносимых в привод машины или механизма АФМ с переменным значением КУ обратной связи.

**2. Основное содержание и результаты работы**

Предмет исследования – принципиальная схема АФМ первого поколения с переменным значением КУ обратной связи – показан на рисунке.

Муфта [4] содержит соосные одна другой полумуфты 1 и 2, кинематическая связь между которыми в окружном направлении осуществляется пакетом фрикционных дисков 3. Управляющее устройство состоит из тел качения 4, размещенных в гнездах со скошенными боковыми стенками (рисунок, сечение А-А) опорного диска 5, который

жестко закреплен на полумуфте 1, и втулки 6, связанной в окружном направлении с нажимным диском 7 при помощи направляющей шпонки. Нажимной диск с полумуфтой 1 непосредственно не связан.

Втулка 6 поджата в направлении тел качения 4 при помощи пружины 8, поставленной с предварительным натяжением и опирающейся справа (по рисунку) на нажимной диск. Силовое замыкание пар трения 3 осуществляется пружиной 9.

Боковые стенки гнезд под тела качения 4 профилированы кривыми линиями (рисунок, сечение А-А), уравнение которых приведено в работе [5]. Благодаря этому величина КУ автоматически изменяется в зависимости от текущего значения коэффициента трения между элементами пар трения 3 и передаваемой нагрузки в результате перемещения тел качения 4 относительно боковых стенок гнезд и изменения величины угла давления  $\alpha_i$  (рисунок, сечение А-А). Одновременно с этим изменяется величина осевой деформации пружины 8 и усилие замыкания элементов пар трения 3, причем, уменьшение указанного усилия компенсирует увеличение коэффициента трения, что теоретически обеспечивает постоянство момента сил трения фрикционной группы.

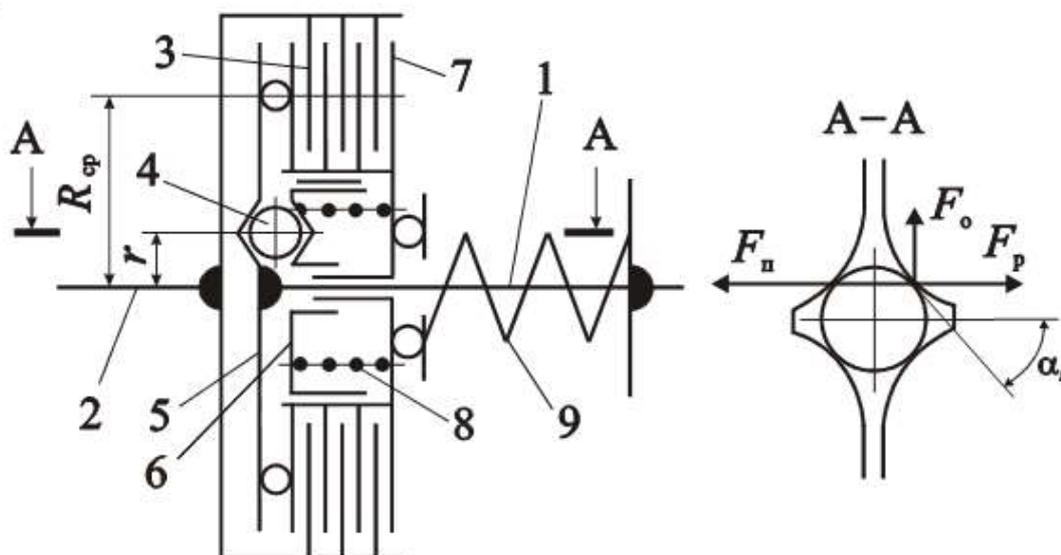


Рисунок 1. Принципиальная схема АФМ первого поколения с переменным значением КУ обратной связи

При оснащении АФМ УУ с отрицательной одноконтурной обратной связью упомянутая зависимость имеет следующий вид [5, 6]:

$$F_{p,i} = F_n \left( 1 - \frac{f_{\min}}{f_i} \right), \tag{1}$$

где  $F_{p,i}$  – текущее значение распорной силы УУ;  $F_n$  – значение усилия замыкания фрикционного узла АФМ;  $f_{\min}$  – минимальное значение коэффициента трения между элементами фрикционных пар;  $f_i$  – текущее значение коэффициента трения.

Формула (1) записана для случая, когда настройка АФМ производится по коэффициенту трения  $f_{\min}$  [7, 8].

Для установления функциональной зависимости значения КУ от коэффициента трения, необходимой для дальнейшего исследования, запишем в общем виде выражение по определению текущего значения вращающего момента АФМ [9]:

$$T_i = zR_{\text{cp}}f_i(F_{\text{п}} - F_{\text{p},i}), \quad (2)$$

где  $z$  – число пар трения фрикционного узла АФМ;  $R_{\text{cp}}$  – средний радиус поверхностей трения фрикционных пар. Остальные обозначения приведены выше.

Значение распорной силы УУ определяется по следующей формуле:

$$F_{\text{p},i} = \frac{T}{r} \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  – текущее значение угла давления распорных элементов УУ;  $r$  – радиус окружности, на которой расположены распорные элементы УУ.

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

$$F_{\text{p},i} = zC_i f_i(F_{\text{п}} - F_{\text{p},i}),$$

откуда находим, с учетом формулы (1):

$$C_i = \frac{1}{zf_{\text{min}}} \left( 1 - \frac{f_{\text{min}}}{f_i} \right). \quad (4)$$

В формуле (4) и выше параметр  $C_i$  – текущее значение КУ обратной связи, определяемое по формуле

$$C_i = \frac{R_{\text{cp}}}{r} \operatorname{tg} \alpha_i.$$

Сопоставление формул (1) и (4) показывает, что текущее значение КУ изменяется, в зависимости от коэффициента трения, по тому же закону, что и распорная сила УУ.

В АФМ с переменным значением КУ увеличение распорной силы обусловлено соответствующим увеличением КУ за счет изменения значения угла давления  $\alpha_i$ , которое происходит в результате возрастания вращающего момента, передаваемого распорными элементами УУ [10].

Определим, с учетом данного обстоятельства, значение прироста вращающего момента АФМ, необходимого для увеличения текущего угла давления  $\alpha_i$  в связи с наступлением перегрузки при изменении текущего значения коэффициента трения  $f_i$ . Попутно заметим, что после увеличения вращающего момента, когда КУ достигает соответствующего значения, срабатывание АФМ произойдет при настроечном значении вращающего момента.

Очевидно, что максимальный прирост вращающего момента АФМ произойдет в

случае увеличения коэффициента трения от значения  $f_{\min}$  до значения  $f_{\max}$  – максимального коэффициента трения.

При случайном увеличении коэффициента трения от значения  $f_{\min}$  до значения  $f_{i+1}$  распорная сила  $F_{p,i}$  равна нулю, если перегрузка на ведомых частях АФМ отсутствует, т. е. значение момента сил сопротивления, действующего на муфту, равно ее настроечному вращающему моменту [11].

Действительно, при значении  $f_i = f_{\min}$  значение распорной силы  $F_{p,i}$  равно нулю согласно соотношению (1). В этом случае, в соответствии с формулой (2), значение вращающего момента АФМ равно

$$T_{\min} = zF_{\Pi}R_{\text{cp}}f_{\min}, \quad (5)$$

и, поскольку без наступления перегрузки муфта продолжает передавать этот же вращающий момент, распорная сила отсутствует.

Однако значение потенциального вращающего момента, который виртуально способна передать АФМ в данный период времени, равно

$$T_{\Pi} = zF_{\Pi}R_{\text{cp}}f_{i+1}, \quad (6)$$

при по-прежнему отсутствующей распорной силе.

В случае возникновения и нарастания перегрузки начинает увеличиваться вращающий момент, передаваемый АФМ. Вместе с этим начинается действие распорной силы, которая, очевидно, также увеличивается по мере нарастания перегрузки, действующей на АФМ.

На основании этого формула (6) принимает следующий вид:

$$T_{\Pi,i} = zR_{\text{cp}}f_{i+1}(F_{\Pi} - F_{p,i}). \quad (7)$$

В формуле (7) значение распорной силы  $F_{p,i}$  по-прежнему определяется по формуле (1).

Используя формулу (3), запишем следующее соотношение:

$$F_{p,i} = \frac{T_i C_i}{R_{\text{cp}}}. \quad (8)$$

После подстановки правой части формулы (8) в равенство (7) и некоторых преобразований, с учетом формулы (4) получаем:

$$T_{\Pi,i} = zF_{\Pi}R_{\text{cp}}f_{i+1} \frac{f_{\min}}{f_i}. \quad (9)$$

Формула (9) отражает закономерность изменения значения потенциального вращающего момента в зависимости от исходного значения коэффициента трения  $f_i$ .

Из данной формулы следует, что максимальное значение вращающего момента  $T_{п.макс}$  будет при значениях коэффициента трения  $f_{i+1} = f_{max}$  и  $f_i = f_{min}$ .

Для нахождения значения прироста вращающего момента АФМ при увеличении коэффициента трения в условиях действия перегрузки обратимся к рис. 1, на котором схематично изображен процесс изменения значения вращающего момента АФМ в соответствии с изменением значения коэффициента трения.

Допустим, что первоначальное значение коэффициента трения составляло  $f_i$ . Этому значению соответствовало значение КУ  $C_i$  согласно формуле (4). После увеличения коэффициента трения до значения  $f_{i+1}$  АФМ не будет реагировать на это увеличение до тех пор, пока не наступит перегрузка. Очевидно, что в этом случае срабатывание муфты не произойдет, поскольку значение КУ  $C_i$  не будет соответствовать новому значению коэффициента трения.

Наступление перегрузки приведет к увеличению распорной силы, что, в свою очередь, сопровождается увеличением КУ [12]. Очевидно, что это будет замедлять увеличение вращающего момента АФМ.

**Обсуждение и результаты.** Принципиальная невозможность достижения полной стабилизации величины предельного вращающего момента АФМ с отрицательной обратной связью и переменным значением КУ обусловлена необходимостью приложения к муфте определенной дополнительной внешней нагрузки для перемещения отжимных элементов УУ с целью обеспечения их угла давления, соответствующего текущему значению коэффициента трения.

В связи с этим точность срабатывания АФМ с отрицательной обратной связью и переменным значением КУ, равная точности срабатывания «идеальной» АФМ, не может быть достигнута.

Результаты исследования, приведенные в настоящей работе, носят сугубо теоретический характер и предназначены для использования в качестве отправной точки при изучении уровня перегрузок в АФМ других типов, имеющих переменное значение КУ обратной связи.

### 3. Заключение

АФМ с отрицательной обратной связью и переменным значением КУ обратной связи не обеспечивает полной стабилизации номинального вращающего момента, что обусловлено необходимостью в процессе автоматического регулирования приложения дополнительных усилий для увеличения распорной силы при изменении коэффициента трения.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев М. П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения с дифференцированными парами трения (ч. 2) // Известия ОрелГТУ. – 2008. – № 3-2/271 (546). – С. 67–71.
2. Шишкарев М. П., Лущик А. А., Угленко А. Ю. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет: монография. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.
3. Шишкарев М. П. Условие и возможность реализации высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении.

нии. – 2008. – № 3. – С. 3–6.

4. А. с. 1430633 СССР, МПК<sup>4</sup> F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарёв (СССР). – № 4048607/25–27; Заявлено 26.02.86; Опубл. 15.10.88. Бюл. № 38. – 3 с.: ил.

5. Шишкарёв М. П. Влияние величины коэффициента усиления на массу адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 2. – С. 88–93.

6. А. с. 1055915 СССР, МПК<sup>3</sup> F 16 D 7/02, F 16 D 13/04. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарёв (СССР). – № 3475963/25–27; Заявлено 28.07.82; Опубл. 23.11.83. Бюл. № 43. – 6 с.: ил.

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

8. Шишкарёв М. П., Лущик А. А. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 25–28 февраля 2014 г., Ростов н/Д, 2014. – С. 206–209.

9. Шишкарёв М. П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVIII междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В. С. Балакирева – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 72–76.

10. Шишкарёв М. П. Повышение надежности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 4. – С. 6–9.

11. Шишкарёв М. П. Распределение нагрузки в муфте Н.Д. Вернера и выбор ее параметров // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 8–11.

12. Шишкарёв М. П., Ву Тьен Зунг. Практическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с переменным значением коэффициента усиления // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 3. – С. 3–7.

Поступила в редколлегию 25.01.2024 г.