

УДК 621.838.222

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

Донской государственный технический университет, РФ

Тел.: 89081933393; E-mail: [shishkarev\\_m\\_p@mail.ru](mailto:shishkarev_m_p@mail.ru)

## ПРИЧИНЫ НИЗКОЙ ТОЧНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*В работе показано, что реальные адаптивные фрикционные муфты первого поколения обладают относительно невысокой точностью срабатывания вследствие постоянной величины коэффициента усиления в процессе автоматического регулирования. Невозможно создание адаптивной фрикционной муфты, полностью нечувствительной к изменению коэффициента трения.*

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, точность срабатывания, идеальная, коэффициент усиления, коэффициент трения.

M. P. Shishkarev

### THE REASONS FOR THE LOW ACCURACY OF OPERATION OF ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES OF THE FIRST GENERATION

*The paper shows that real adaptive friction clutches of the first generation have a relatively low response accuracy due to the constant value of the gain in the process of automatic control. It is impossible to create an adaptive friction clutch that is completely insensitive to changes in the coefficient of friction.*

**Keywords:** Adaptive friction clutch, accuracy of operation, ideal, gain, friction coefficient.

## 1. Введение

В работах [1, 2] приведена формула для определения значения коэффициента точности адаптивных фрикционных муфт (АФМ) с одноконтурной отрицательной обратной связью, т. е. АФМ первого поколения. Точность срабатывания АФМ характеризуется уровнем стабильности величины вращающего момента в течение регламентированного срока ее эксплуатации [3].

Анализ упомянутой формулы показал, что точность срабатывания АФМ зависит исключительно от собственного параметра муфт – коэффициента усиления (КУ) обратной связи. В указанных работах также установлено, что точность срабатывания АФМ повышается с увеличением КУ, однако при этом уменьшается величина номинального вращающего момента муфт [4].

Для компенсации уменьшения номинальной нагрузочной способности АФМ необходимо увеличение силы натяжения пружины, замыкающей пары трения, что требует использования более мощных пружин и приводит к росту массы и габаритных размеров муфт, практически прямо пропорциональному силе ее натяжения [5].

**Цель исследования.** Установление и научное обоснование причин низкой точности срабатывания АФМ первого поколения.

**Задачи исследования.** 1. Установление причин низкой точности срабатывания АФМ первого поколения 2. Оценка точности срабатывания «идеальной» АФМ. 3. Оценка перспектив конструктивных разработок муфт с одноконтурной отрицательной обратной связью без изменения принци-

пиальной схемы с целью повышения их точности срабатывания.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Для оценки точности срабатывания реальной АФМ введем понятие «идеальной» муфты, т. е. муфты, величина вращающего момента которой постоянна, равна ее номинальному (настроечному) вращающему моменту и не зависит от изменяющегося значения коэффициента трения. Очевидно, что величина коэффициента точности «идеальной» АФМ равна единице. Также очевидно, что точность срабатывания реальной АФМ можно оценивать степенью приближения ее точности срабатывания к точности срабатывания «идеальной» АФМ.

Для объективности оценки точности срабатывания АФМ будем полагать, что сравниваемые объекты оснащены одним и тем же типом обратной связи – одноконтурной отрицательной обратной связью [6, 7]. Это предположение в значительной степени облегчает процесс сравнения, поскольку позволяет использовать один и тот же параметр обратной связи АФМ.

Объектом исследования является АФМ, принципиальная схема которой изображена на рис. 1. Муфта состоит из двух полумуфт 1 и 2, которые связаны друг с другом пакетом фрикционных дисков 3 и 4. Диски 3 связаны, в свою очередь, со ступицей нажимного диска 5, который не имеет кинематической связи со ступицей полумуфты 1. Диски 4 связаны с барабаном полумуфты 2.

Связь дисков 3 с нажимным диском 5 и дисков 4 с полумуфтой 2 осуществляется с помощью шлицевого подвижного соединения, позволяющего передавать осевое усилие между дисками.

### Устройство

отрицательной обратной связи муфты состоит из тел качения 6, которые размещены в скошенных гнездах, выполненных в жестко закрепленном на ступице полумуфты 1 упорном диске 7 и в нажимном диске 5 (см. рис. 1, сечение А-А).

Силовое замыкание пакета фрикционных дисков осуществляется пружиной 8, которая передает усилие через упорный подшипник 9.

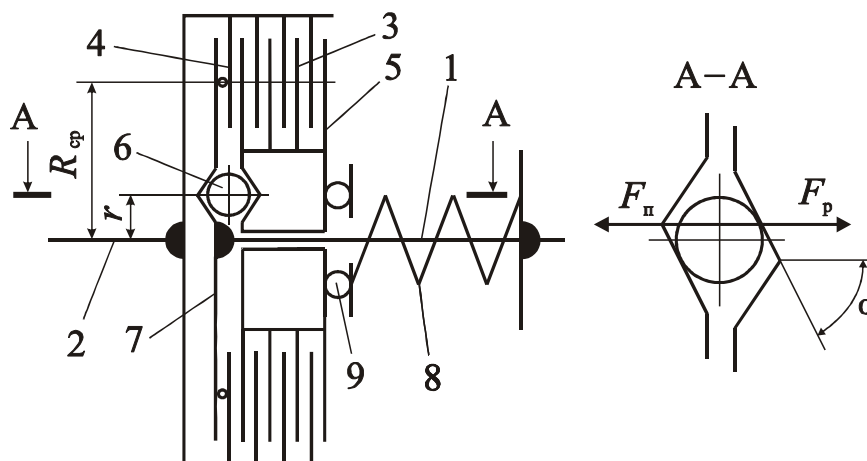


Рисунок – Принципиальная схема АФМ первого поколения со всеми ведущими парами

Часть вращающего момента от полумуфты 1 к полумуфте 2 передается за счет пары трения «фрикционный диск 4–упорный диск 7», оставшая часть – телами качения 6, получающими нагрузку от полумуфты 1 через упорный диск, к нажимному диску 5, затем – парами трения «диски 3–диски 4». Вследствие этого все пары трения АФМ разделены на ведущую (первая из перечисленных выше, их может быть несколько) и ведомые.

При одинаковом типе обратной связи общий вид математической модели АФМ также одинаков и имеет следующую форму:

$$T_{ni} = zR_{cp}f_i(F_n - F_{pi}), \quad (1)$$

где  $T_{ni}$  – текущий предельный вращающий момент АФМ;  $z$  – число пар трения фрикционной группы муфты;  $R_{cp}$  – средний радиус поверхностей трения фрикционных пар 3–4;  $f_i$  – текущий коэффициент трения;  $F_n$  – сила натяжения замыкающей пружины 8;  $F_{pi}$  – текущая распорная сила управляющего устройства (УУ) обратной связи.

В формуле (1) параметром, регулирующим стабильность величины вращающего момента  $T_{ni}$  при условии, что  $f_i = \text{var}$ , является распорная сила  $F_{pi}$ , поэтому именно этот параметр обратной связи следует принять в качестве объекта сравнения в сопоставляемых вариантах муфт.

В работе [4] найдена функциональная зависимость величины текущей распорной силы, действующей в АФМ первого поколения, от коэффициента трения в следующем виде:

$$F_{pi} = F_n \frac{zCf_i}{1 + zCf_i}, \quad (2)$$

где  $C$  – КУ обратной связи.

Преобразуем формулу (2) к следующему виду:

$$F_{pi} = F_n \left( 1 - \frac{1}{1 + zCf_i} \right). \quad (3)$$

В работе [4] также приведена аналогичная зависимость для «идеальной» АФМ, которая имеет вид:

$$F_{pi} = F_n \left( 1 - \frac{f_{\min}}{f_i} \right), \quad (4)$$

где  $f_{\min}$  – минимальный (настроечный) коэффициент трения.

Формулы (3) и (4) имеют одинаковую общую структуру, однако в формуле (3) переменное значение коэффициента трения  $f_i$  представлено

двучленом в знаменателе вычитаемого, тогда как в формуле (4) – одночленом. Очевидно, что практическая идентичность зависимостей (3) и (4) может быть достигнута в том случае, когда  $zCf_i \ll 1$ , что при ограниченном значении коэффициента трения  $f_i$  (патологические процессы трения в данном случае не учитываются) требует значительного увеличения параметров  $z$  и  $C$  в отдельности или одновременно.

Технически осуществимое значительное увеличение параметров  $z$  и  $C$  приводит к резкому уменьшению значения приведенного коэффициента трения и, соответственно, величины вращающего момента АФМ [8].

Максимальная величина КУ АФМ с дифференцированными парами трения типа «ведущие пары – ведомые пары» ограничена в соответствии с неравенством

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}},$$

где  $f_{\max}$  – максимальный коэффициент трения.

Данное ограничение не позволяет достичь высокую точность срабатывания АФМ.

В «идеальной» АФМ зависимость (4) реализуется посредством автоматического изменения величины КУ в процессе эксплуатации в соответствии с формулой, полученной в работе [9] и имеющей следующий вид:

$$C_i = \text{const} - \frac{1}{zf_i}, \quad (5)$$

для АФМ со всеми ведущими парами трения.

В формуле (5) параметр  $\text{const}$  – постоянный параметр АФМ, равный

$$\text{const} = \frac{1}{zf_{\min}}. \quad (6)$$

В АФМ первого поколения (базовый вариант) величина КУ остается постоянной при изменении значения коэффициента трения, поскольку принципиальная схема муфты не позволяет автоматически осуществлять подобное изменение величины КУ.

Автоматическое регулирование с помощью передаточного механизма, который располагается между УУ и фрикционной группой, предполагает переменное передаточное отношение. Данный способ повышения точности срабатывания АФМ в настоящее время не нашел практического воплощения вследствие отсутствия конструктивных решений, оптимальных с точки зрения их применения в конструкциях АФМ.

Реализация «идеальной» нагрузочной характеристики (4) АФМ также

представляется невозможной по следующим соображениям. Каждой конкретной величине распорной силы  $F_{pi}$  должна соответствовать строго определенная величина КУ  $C_i$ . Действительно, объединяя формулы (5) и (6), получим

$$C_i = \frac{1}{z} \left( \frac{1}{f_{\min}} - \frac{1}{f_i} \right). \quad (7)$$

Используя зависимость (7), выразим параметр  $f_i$  через КУ  $C_i$  и подставим данное представление в формулу (4). Получаем:

$$F_{pi} = z F_n C_i f_{\min}. \quad (8)$$

При постоянных значениях параметров  $z$ ,  $F_n$ ,  $f_{\min}$  и  $C_i = \text{var}$  распорная сила  $F_{pi}$  прямо пропорциональна значению КУ [10]. Воспользовавшись формулой (1), запишем выражение для вычисления вращающего момента «идеальной» АФМ [11, 12] в том случае, когда коэффициент трения увеличивается от значения  $f_i$  до значения  $f_{i+1}$ , а перегрузка отсутствует

$$T'_{ni} = z R_{cp} f_{i+1} (F_n - F_{pi}). \quad (9)$$

В формуле (9) величина распорной силы  $F_{pi}$  соответствует значению коэффициента трения  $f_i$ .

При наступлении перегрузки величина установившегося вращающего момента АФМ вычисляется по следующему соотношению:

$$T_{ni+1} = z R_{cp} f_{i+1} (F_n - F_{pi+1}), \quad (10)$$

где  $F_{pi+1}$  – величина распорной силы, соответствующая значению коэффициента трения  $f_{i+1}$ .

Элементарный прирост величины вращающего момента АФМ, с учетом формул (8) – (10), вычисляется по соотношению:

$$\Delta T = z^2 F_n R_{cp} f_{\min} f_{i+1} (C'_{i+1} - C_i). \quad (11)$$

В соотношении (11)  $C'_{i+1} = C_i + \Delta C_i$  (где  $\Delta C_i$  – элементарный прирост текущей величины КУ).

Заменив  $\Delta C_i$  на  $dC_i$  и интегрируя функцию (11) получаем формулу полного прироста величины вращающего момента в результате увеличения КУ от  $C_i$  до  $C_{i+1}$ :

$$\Delta T = \int_{C_i}^{C_{i+1}} z^2 F_n R_{cp} f_{\min} f_{i+1} dC_i = z^2 F_n R_{cp} f_{\min} f_{i+1} (C_{i+1} - C_i),$$

или, с учетом формулы (7)

$$\Delta T = \frac{z F_n R_{cp} f_{\min} (f_{i+1} - f_i)}{f_i}.$$

С учетом изложенного выше величина коэффициента точности «иде-

альной» АФМ вычисляется по следующей формуле:

$$K_{\tau} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}.$$

Таким образом, при перегрузке «идеальная» АФМ будет кратковременно передавать вращающий момент, величина которого превышает величину номинального вращающего момента муфты.

**Обсуждение и результаты.** Установленная причина относительно невысокой точности срабатывания реальных АФМ с одноконтурной отрицательной обратной связью, которая заключается в несоответствии величины КУ обратной связи каждому текущему значению коэффициента трения, определила способ ее устранения, состоящий в разработке принципиальной схемы муфт с автоматическим регулированием величины КУ обратной связи, функционально связанной с изменяющимся значением коэффициента трения по найденной зависимости.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке конструктивной схемы, исследовании и расчетах АФМ первого поколения с одноконтурной отрицательной обратной связью, обладающей повышенной точностью срабатывания.

### 3. Заключение

1. Реальные АФМ с одноконтурной отрицательной обратной связью обладают относительно невысокой точностью срабатывания вследствие постоянной величины КУ в процессе автоматического регулирования, что не может компенсировать их недостаток, заключающийся в повышенной конструктивной сложности.

2. «Идеальная» АФМ при автоматическом регулировании и увеличении коэффициента трения требует дополнительного вращающего момента, связанного с необходимостью увеличения КУ.

3. Исследование и установление причин относительно невысокой точности срабатывания реальных АФМ первого поколения показали бесперспективность дальнейших конструктивных разработок муфт с одноконтурной отрицательной обратной связью без изменения принципиальной схемы с целью повышения точности их срабатывания.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Анализ эксплуатационных характеристик вариантов адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / Шишкарев М. П. Угленко А.Ю. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 8. – С. 44–48.
2. Шишкарев, М. П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 3–6.

3. Шишкарёв, М. П. Условие и возможность реализации высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт / Шишкарёв М. П. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 3. – С. 3–6.

4. Шишкарёв, М. П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения с дифференцированными парами трения (ч. 2) / М.П. Шишкарёв // Известия ОрелГТУ. – 2008. – № 3-2/271 (546). – С. 67–71.

5. Шишкарёв, М.П. Влияние величины коэффициента усиления на массу адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // 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; заявл. 28.07.82; опубл. 23.11.83, Бюл. № 43. – 6 с.: ил.

7. Шишкарёв, М. П. Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения / М.П. Шишкарёв // Изв. вузов. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 14–17.

8. Шишкарёв, М. П.. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М.П. Шишкарёв, А. А. Луцкич // 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 / М. П. Шишкарёв // 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. Практическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с переменным значением коэффициента усиления / М.П. Шишкарёв, Ву Тьен Зунг // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 3. – С. 3–7.

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

12. Шишкарёв, М. П. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью / М. П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 9. – С. 25–32.

Поступила в редколлегию 26.02.2023 г.