

**Кобзев Кирилл Олегович**

Kobzev Kirill Olegovich

Донской государственный технический университет

Don State Technical University

Аспирант / postgraduate student

E-Mail: Kobzevkirill1990@mail.ru

05.05.04 «Дорожные, строительные  
и подъемно-транспортные машины»

## **Исследование точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт с комбинированной обратной связью (часть 1)**

Research response accuracy adaptive friction clutch with combined feedback (part 1)

**Аннотация:** Существующие исследования и разработки базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения не имеют общей теоретической основы, позволяющей создавать надежные в эксплуатации конструкции предохранительных фрикционных муфт, которые обеспечивают надежную защиту приводов машин от перегрузок и другие высокие эксплуатационные характеристики. Для повышения точности срабатывания базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения величина коэффициента усиления должна быть переменной, подчиняющейся найденной закономерности. Принципиально реализовать вариант адаптивной фрикционной муфты, в котором при минимальном значении коэффициента трения отрицательная обратная связь не действует, невозможно на основе базового варианта.

**The Abstract:** The existing research and development base case adaptive clutch second generation does not have a general theoretical framework to build robust operation in the construction of safety clutches that provide reliable protection against overload drive cars and other high performance. To improve the accuracy of the basic version of adaptive response clutch second generation the gain should be a variable that obeys the laws found. In principle to implement the adaptive version of the friction clutch in which the minimum value of the coefficient of friction of negative feedback does not act, can not be based on the base case.

**Ключевые слова:** Адаптивная фрикционная муфта, коэффициент усиления, управляющее устройство, коэффициент трения.

**Keywords:** Adaptive friction clutch, gain control device, the coefficient of friction.

\*\*\*

### **Введение**

*Адаптивные фрикционные муфты (АФМ)* с отрицательно-нулевой обратной связью относятся к классу АФМ второго поколения[1]. Отличительными особенностями муфт данного класса являются:

- наличие в составе дополнительной фрикционной группы, которая не охвачена отрицательной обратной связью, как основная фрикционная группа, т. е. так называемой «нулевой» обратной связью;
- более высокие, при равных конструктивных параметрах, нагрузочная способность и точность срабатывания [2, 3].

В ряде работ, посвященных исследованию АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью, решаются задачи по установлению оптимальной величины коэффициента усиления (КУ) [4], максимизации нагрузочной способности [5], точности срабатывания [6] и др. Вместе с тем, общие вопросы, связанные с установлением оптимальных взаимодействий между отдельными параметрами муфты, и надавленные на ее оптимальное функционирование, в настоящее время еще не решены. Это не позволило создать основы общей теории АФМ с указанной обратной связью.

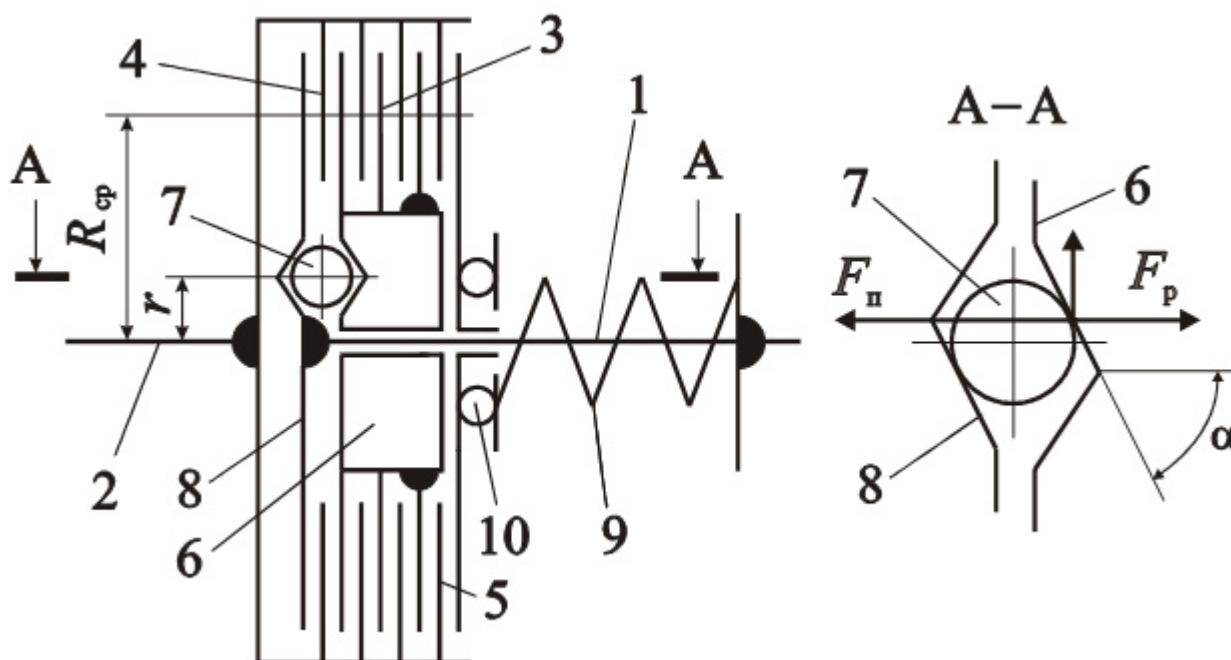
**Постановка задачи.** Исследование проблем повышения точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт с комбинированной обратной связью.

**Решение задачи.** Принципиальная схема адаптивно фрикционной муфты приведена на рис. Две полумуфты 1 и 2 кинематически связаны одна с другой посредством двух фрикционных групп:

- основной фрикционной группы (ОФГ), состоящей из дисков трения 3 и 4;
- дополнительной фрикционной группы (ДФГ), включающей диск трения 5 и нажимной диск 6.

Диски трения 3 связаны со ступицей нажимного диска 6 способом, позволяющим им сохранить свободу перемещения в осевом направлении относительно последнего. Диски 4 и 5 связаны аналогичным способом с барабаном полумуфты 2.

Нажимной диск 6 не имеет кинематической связи в окружном направлении со ступицей полумуфты 1, исключая незначительные по величине силы трения между ними, которое далее учитываться не будет.



**Рис.** Принципиальная схема АФМ второго поколения

Количество пар трения ДФГ принимается равным единице, как это рекомендовано в работе [2]. Это связано с необходимостью увеличения КУ, потребного для максимального повышения точности срабатывания муфты.

Управляющее устройство (УУ) муфты выполнено в виде тел качения 7, в качестве которых могут быть использованы шарики, как в данном примере, или ролики [7]. Тела качения расположены в скошенных гнездах, выполненных на взаимообращенных торцах

нажимного диска 6 и упорного диска 8, который жестко закреплен на ступице полумуфты 1 (см. рис., сечение А-А).

Тела качения 7 расположены в гнездах с осевым и окружным зазорами (на рис., сечение А-А, показано положение тел качения заклиненных в гнездах между их противоположными стенками, что соответствует передаче муфтой нагрузки). Это необходимо для того, чтобы обеспечить силовое замыкание пар трения ОФГ с помощью пружины 9, поставленной с предварительным натяжением. Усилие пружины на фрикционный диск 5 передается через упорный подшипник 10.

Полный вращающий момент  $T_{\Pi}$ , передаваемый муфтой, складывается из суммы двух моментов:

- момента  $T_2$ , передаваемого парами трения ОФГ;
- момента  $T_2$ , передаваемого парами трения ДФГ.

В соответствии с этим можно записать:

$$T_{\Pi} = T_1 + T_2. \quad (1)$$

В процессе работы муфты АФМ на пары трения ОФГ действует, кроме силы натяжения пружины 9, распорная (отжимная) сила, в связи с чем запишем:

$$T_1 = zR_{cp}f(F_{\Pi} - F_p), \quad (2)$$

где  $z$  - число пар поверхностей трения ОФГ;  $R_{cp}$  - средний радиус поверхностей трения ОФГ и ДФГ (изменяет одинаковым для обеих фрикционных групп);  $F_{\Pi}$  - сила натяжения пружины 9;  $F_p$  - распорная сила, действующая на нажимной диск 6.

На пару трения ДФГ распорная сила не действует, поэтому для вращающего момента  $T_2$  запишем:

$$T_2 = F_p R_{cp} f \quad (3)$$

При конструктивно-компоновочной схеме ОФГ, построенной по типу «ведущая пара трения – ведомые пары трения», как это показано на рис. 1, распорная сила УУ формируется за счет вращающего момента  $T_2$  и вращающего момента, который передает ведомые пары трения ОФГ.

В рассматриваемом случае ведомыми считаются те пары трения 3-4, в которых диски 3 связаны со ступицей нажимного диска 6 (см. рис.).

В соответствии с изложенным можно записать:

$$F_p = \frac{T_2 + T_3}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

где  $T_3$  - вращающий момент, передаваемый вращающий момент парами трения ОФГ;  $\alpha$  - угол скоса боковой стенки гнезда под тело качения 7 (см. рис., сечение А-А);  $r$  - радиус окружности, на которой расположены тела качения 7 (см. рис.).

С учетом принятого числа пар трения ОФГ, а также того, что по соображениям точности срабатывания АФМ, число ведущих пар трения ОФГ принимается равным единице

[7], запишем:

$$T_3 = (z-1)R_{cp}f(F_{п} - F_{p}) \quad (5)$$

Подставив в формулу (4) правые части соотношений (3) и (5), найдем:

$$F_{p} = zF_{п}C \frac{f}{1+(z-1)cf} \quad (6)$$

где  $C$  - коэффициент усиления (КУ) обратной связи АФМ, вычисляемый по формуле:

$$C = \frac{R_{cp}}{r} tg\alpha \quad (7)$$

Зная зависимость для вычисления величины распорной силы, можно получить формулу для вращающего момента  $T_1$ , подставив в соотношение (2) правую часть выражения(6):

$$T_1 = zF_{п}R_{cp}f \frac{1-Cf}{1+(z-1)Cf} \quad (8)$$

После подстановки правых частей соотношений (3) и (8) в равенство (1), получим после некоторых преобразований:

$$T_{п} = F_{п}R_{cp}f \frac{z+1-Cf}{1+(z-1)Cf} \quad (9)$$

В исследованиях [2, 3] установлено влияние величины коэффициента усиления  $C$  на точность срабатывания базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения, которая повышается с увеличением  $C$ . Однако, в этих же исследованиях показано, что на практике точность срабатывания муфты ограничена из-за имеющегося предела величины КУ (см. выше).

Исследуем влияние отдельных параметров АФМ на ограничение величины КУ  $C$ . При фиксированной величине  $C$  на формирование распорной силы влияют:

- вращающий момент, создаваемый парами трения ОФГ, которые непосредственно связаны с нажимным диском;
- вращающий момент, передаваемый парой трения ДФГ.

Используя в качестве исходной формулу (4), найдем составляющие распорной силы АФМ, учитывая изложенное выше:

$$F_{p1} = \frac{T_2}{r} tg\alpha \quad (10)$$

$$F_{p2} = \frac{T_3}{r} tg\alpha \quad (11)$$

Вращающий момент  $T_2$  вычисляется из соотношения (3).

Для получения зависимости по вычислению вращающего момента  $T_3$  воспользуемся формулами (5) и (6), подставив правую часть последней в первую. В результате получим:

$$T_3 = (z-1)F_n R_{cp} f \frac{1-Cf}{1+(z-1)Cf} \quad (12)$$

Используя соотношения (3) и (12) в выражениях (10) и (11), найдем:

$$F_{p1} = F_n Cf \quad (13)$$

$$F_{p2} = (z-1)F_n Cf \frac{1-Cf}{1+(z-1)Cf} \quad (14)$$

Используя соотношения (13) и (14), составим условия раздельного ограничения сверху величины КУ С в следующем виде:

$$F_{p1} \leq F_n \quad (15)$$

$$F_{p2} \leq F_n \quad (16)$$

Записанные условия (14) и (15) обусловлены тем, что в случае невыполнения любого из них муфта переходит в режим неадаптивного устройства с пониженной точностью срабатывания [2, 3].

После подстановки в соотношение (15) и (16) соответственно правых частей выражений (13) и (14) получим следующие формулы для ограничения сверху величины КУ С:

$$C_1 \leq \frac{1}{f_{\max}} \quad (17)$$

$$-(z-1)C_2^2 f_{\max}^2 \leq 1 \quad (18)$$

В соотношениях (17) и (18) вместо параметра  $f$  принято  $f_{\max}$ , поскольку данная замена обеспечивает работу АФМ в адаптивном режиме в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ .

Анализ показывает, что условие (18) выполняется даже в форме неравенства. Это свидетельствует о том, что распорная сила, возбуждаемая частью пар трения ОФГ, связанной с нажимным диском, не превышает силу  $F_n$  ни при каких величинах КУ С.

С другой стороны, согласно условию (17), распорная сила  $F_{p1}$  становится равной силе  $F_n$  при определенной величине КУ С1, которая может быть меньше, чем величина КУ С2.

Следовательно, работа пары трения ДФГ накладывает более жесткие ограничения на величину КУ С, что в свою очередь, ограничивает точность срабатывания АФМ. Очевидно, что доминирующее влияние пары трения ДФГ необходимо уменьшить.

Для обоснования выдвинутой гипотезы видоизменим формулу (3), введя в ее правую часть поправочный коэффициент  $n$ :

$$T_2 = nF_n R_{cp} f \quad (19)$$

Данный коэффициент сомножитель может в равной степени относиться как к параметру  $F_n$ , так и к параметру  $R_{cp}$ . Очевидно, как показано выше, что для уменьшения доминирующего влияния пары трения ДФГ на величину КУ С должно быть  $n < 1$ .

Используя формулу (19), а также выражение (5) в соотношении (4), найдем для новой

распорной силы:

$$F_p = F_n Cf \frac{z-1+n}{1+(z-1)Cf} \quad (20)$$

В соответствии с приведенной выше последовательностью расчета, найдем, с учетом соотношения (2) и (20):

$$T_1 = zF_n R_{cp} f \frac{1-nCf}{1+(z-1)Cf} \quad (21)$$

Соответственно, используя соотношения (19) и (21) в равенстве (1), найдем

$$T_n' = F_n R_{cp} f \frac{z-(Cf-1)n}{1+(z-1)Cf} \quad (22)$$

Представив ранее найденное выражение в виде

$$T_n = F_n R_{cp} f \frac{z-(Cf-1)}{1+(z-1)Cf} \quad (23)$$

Сравним его правую часть и правую часть соотношения (22).

Очевидно, что при равных величинах параметров, входящих в соотношения (22) и (23), а также учитывая, что  $n < 1$ , будет  $T_n' > T_n$ .

Таким образом, уменьшив величину вращающего момента передаваемого парой трения ДФГ и сохранив при этом величину КУ С, можно получить положительный эффект модернизированного варианта АФМ в виде повышенной нагрузочной способности.

Указанный положительный результат объясняется меньшей величиной распорной силы, действующей в модернизированном варианте АФМ. На это указывает сравнение правых частей соотношения (6) и (20).

Исследуем точность срабатывания обоих вариантов АФМ. Точность срабатывания предохранительных муфт, в том числе АФМ, оценивается коэффициентом точности, который для базового и модернизированного вариантов соответственно равен:

$$K_{T1} = \frac{f_{\max} (z+1-Cf_{\max}) [1+(z-1)Cf_{\min}]}{f_{\min} (z+1-Cf_{\min}) [1+(z-1)Cf_{\max}]} \quad (24)$$

$$K_{T2} = \frac{f_{\max} (z-(Cf_{\max}-1)n) [1+(z-1)Cf_{\min}]}{f_{\min} (z-(Cf_{\min}-1)n) [1+(z-1)Cf_{\max}]} \quad (25)$$

При одинаковых величинах параметров сравниваемых вариантов АФМ, в том числе КУ С, сопоставление точности их срабатывания сводится к проверке справедливости равенства

$$K_{T1} = K_{T2}$$

что, с учетом правых частей соотношений (24) и (25), дает:

$$\frac{z+1-Cf_{\max}}{z+1-Cf_{\min}} = \frac{z-(Cf_{\max}-z)n}{z-(Cf_{\min}-1)n}$$

После некоторых математических преобразований составленного предполагаемого равенства приходим к следующему равенству:

$$zC(n-1) = 0$$

Очевидно, что при  $n < 1$  (см. выше) последнее равенство не выполняется, а его левая часть отрицательна. Следовательно, принятое выше исходное условие не выполняется и  $K_{T1} < K_{T2}$ .

Таким образом, при одинаковой величине КУ С базовый вариант АФМ обладает большей, чем модернизированный вариант, точностью срабатывания.

Комплексная оценка эксплуатационных характеристик АФМ производится при помощи специального показателя – коэффициента оценки, который вычисляется по формуле:

$$K_o = \frac{T_{н.у.}}{K_T} \quad (26)$$

где  $T_{н.у.}$  - условный номинальный вращающий момент АФМ.

Момент  $T_{н.у.}$  вычисляется с учетом номинального вращающего момента без учета параметров, входящих в формулу для вычисления последнего и не имеющих размерности.

Исходя из сказанного и учитывая соотношения (22), (23), (24) и (25), после подстановки последних в формулу (26) найдем выражения для вычисления величин коэффициента  $K_o$  для сравниваемых вариантов АФМ:

$$K_{01} = \frac{f_{\min}^2 (z+1-Cf_{\min})^2 [1+(z-1)Cf_{\max}]}{f_{\max} (z+1-Cf_{\max}) [1+(z-1)Cf_{\min}]^2} \quad (27)$$

$$K_{02} = \frac{f_{\min}^2 [z-(Cf_{\min}-1)n]^2 [1+(z-1)Cf_{\max}]}{f_{\max} [1+(z-1)Cf_{\min}]^2 [z-(Cf_{\max}-1)n]} \quad (28)$$

Предположим, что  $K_{01} > K_{02}$ , тогда, с учетом соотношений (27) и (28), найдем:

$$2z + (1 - Cf_{\min})(1 + n) > 0$$

Последнее неравенство, при  $C = 1/f_{\max}$  (условие, использованное для получения этого неравенства), безусловно, выполняется. Это свидетельствует о том, что по совокупности показателей нагрузочной способности и точности срабатывания базовый вариант АФМ превосходит ее модернизированный вариант.

## Выводы

1. Существующие исследования и разработки базового варианта АФМ второго поколения не имеют общей теоретической основы, позволяющей создавать надежные в эксплуатации конструкции предохранительных фрикционных муфт, которые обеспечивают надежную защиту приводов машин от перегрузок и другие высокие эксплуатационные характеристики.
2. Для повышения точности срабатывания базового варианта АФМ второго поколения величина КУ С должна быть переменной, подчиняющейся найденной

закономерности.

3. Установлено, что принципиально реализовать вариант АФМ, в котором при минимальном значении коэффициента трения отрицательная обратная связь не действует, невозможно на основе базового варианта.
4. Установлено, что в модернизированном варианте АФМ существует минимальное значение коэффициента, характеризуемого отношением величины силы замыкания пар трения ДФГ к силе замыкания пар трения ОФГ, при повышении которого АФМ по совокупной оценке нагрузочной способности и точности срабатывания эффективнее, чем базовый вариант АФМ.
5. Наибольшей точностью срабатывания обладает вариант АФМ, имеющий число пар трения ДФГ, большее единицы, при равенстве друг другу величин вращающего момента, соответствующих значениям коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , и при наличии максимума величины вращающего момента внутри интервала изменения коэффициента трения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шишкарёв М.П. Адаптивные фрикционные муфты. Исследование, конструкции и расчет. Науч. издание. – Ростов н/Д: Изд-во РГАСХМ, 2002. – 228 с.
2. 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.
3. Шишкарёв М.П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт / Вестн. машиностроения. – 2005. – № 12. – С. 17–18.
4. Шишкарёв М.П. Об ограничениях при выборе параметров некоторых типов адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 7. – С. 8–11.
5. Шишкарёв М.П. Теоретические основы применения комбинированной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 16–19.
6. Шишкарёв М.П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел второго 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.
7. Есипенко Я.И. и др. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки / Я.И. Есипенко, А.З. Паламаренко, М.К. Афанасьев. – Киев: Техніка, 1972. – 168 с.

**Рецензент:** Чукарин Александр Николаевич, зав. кафедрой «Основы проектирования машин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Ростовский государственный университет путей сообщения», доктор технических наук, профессор.