

**Шишкарев Михаил Павлович**

Донской государственный технический университет  
Профессор  
Доктор технических наук  
Заслуженный изобретатель РФ  
*Shishkarev Mihail Pavlovich*  
*Don State Technical University*  
*Professor*  
E-Mail: shishkarevm@mail.ru

**Лущик Александр Алексеевич**

Донской государственный технический университет  
Аспирант  
*Lushik Aleksander Alekseevich*  
*Don State Technical University*  
*Postgraduate student*  
E-Mail: Aksis777@yandex.ru

**Угленко Антон Юрьевич**

Донской государственный технический университет  
Аспирант  
*Uglenko Anton Urievich*  
*Don State Technical University*  
*Postgraduate student*  
E-Mail: zanozaspin@yandex.ru

**Кобзев Кирилл Олегович**

Донской государственный технический университет  
Аспирант  
*Kobzev Kirill Olegovich*  
*Don State Technical University*  
*postgraduate student*  
E-Mail: Kobzevkirill1990@mail.ru

05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин»

**Основы методологии расчета и проектирования адаптивных фрикционных муфт с отдельным силовым замыканием**

Foundation of calculation and design of adaptive friction clutch with separate force closure

**Аннотация:** Математически обосновано, что в АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием усилия замыкания пар трения ОФГ иДФГ используются эффективно. Приведены зависимости расчета основных конструктивных параметров АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием.

**Abstract:** Mathematically proved, that in the second generation of the AFM with a separate force-force circuit friction pairs CRF and DFG are used efficiently. The dependences of the

calculation of the basic design parameters of the second generation of the AFM with a separate power circuit.

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

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

\*\*\*

Состояние вопроса. Отсутствие методик расчета и проектирования *адаптивных фрикционных муфт (АФМ)* второго поколения с отдельным силовым замыканием не позволяет создавать конструкции предохранительных устройств, эффективно защищающих от поломок узлы и детали современных машин и механизмов, и затрудняет их использование на практике. Созданные теоретические основы для выбора оптимальных конструктивных параметров АФМ, позволяющих достичь сочетание высокой нагрузочной способности и точности срабатывания, являются базой для разработки методик расчета и проектирования этих объектов.

Постановка задачи исследования. Разработка основ методик расчета конструктивных параметров и проектирования вариантов АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием.

Решение задачи. Разработанные в последнее время АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием пар трения *основной фрикционной группы (ОФГ)* и *дополнительной фрикционной группы (ДФГ)*, как показали исследования [1, 2], позволяют:

- существенно повысить предельные значения *коэффициента усиления (КУ)* по сравнению с базовым вариантом АФМ второго поколения и повысить, тем самым, точность срабатывания;
- получить различные формы кривых нагрузочной характеристики, в том числе кривую, имеющую точку максимума внутри интервала значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$  (где  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значение коэффициента трения). Граничные значения вращающего момента, принадлежащие указанной кривой, могут быть равны друг другу при определенной величине КУ.

Указанные особенности АФМ с отдельным силовым замыканием являются основой существенного повышения точности срабатывания.

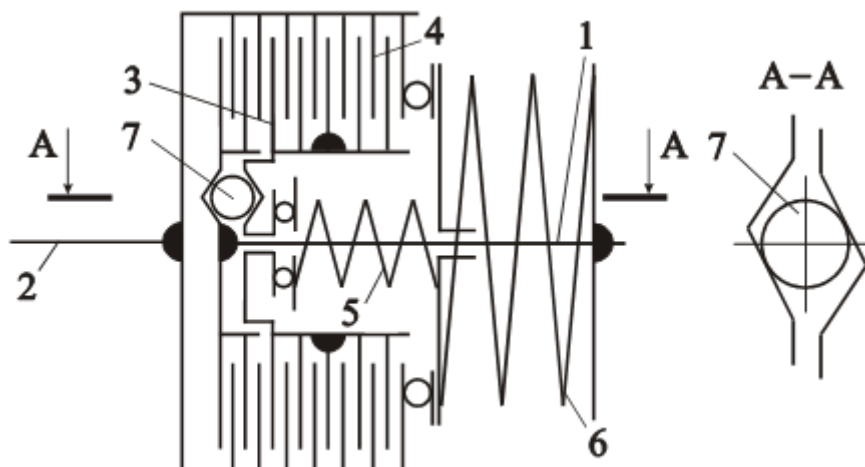
В настоящее время разработаны несколько различных конструктивно-компоновочных схем АФМ с отдельным силовым замыканием. Две наиболее изученные к настоящему времени схемы АФМ показаны на рис. 1 и на рис. 2.

Первый вариант АФМ показан на рис. 1. Две соосные одна другой полумуфты 1 и 2 кинематически связаны между собой двумя фрикционными группами – ОФГ 3 и ДФГ 4. Пары трения ОФГ замыкаются при помощи пружины 5, а общее силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ осуществляется одной пружиной 6.

Управляющее устройство 7 в АФМ общее и выполнено по традиционной для муфт данного типа схеме [3].

Особенностью первого варианта АФМ является такая компоновка узлов силового замыкания, при которой пружина 5 установлена «враспор» между ОФГ и пружиной 6. Таким

образом, величины усилий, замыкающих пары трения ОФГ и ДФГ неодинаковы, в отличие от базового варианта АФМ второго поколения.



**Рис. 1.** Принципиальная схема АФМ с отдельным силовым замыканием (вариант 1)

Отношение усилий  $F_n$  (усилие пружины 6) и  $F_{п1}$  (усилие пружины 5) можно изменять, варьируя, тем самым нагрузку, передаваемую АФМ, и предельное значение КУ, которое вычисляется по следующему соотношению:

$$C = \frac{1}{z_1(1-n)f_{\max}}, \quad (1)$$

где  $z_1$  – число пар поверхностей трения ДФГ;  $n$  – коэффициент, вычисляемый по формуле:

$$n = \frac{F_{п1}}{F_n}, \quad (2)$$

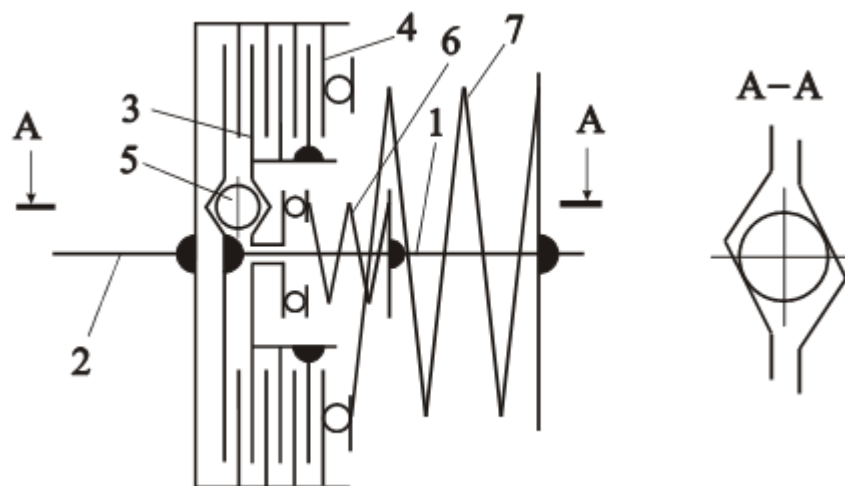
Учитывая компоновочную схему рассматриваемого варианта АФМ согласно рис. 1, всегда принимается  $n > 1$ .

Второй вариант АФМ с отдельным силовым замыканием показан на рис. 2. Как и первый вариант, муфта, выполненная по второму варианту, состоит из полумуфт 1 и 2, связанных одна с другой парами трения ОФГ 3 и ДФГ 4.

Управляющее устройство 5 выполнено по традиционной конструктивно-компоновочной схеме, и ничем не отличается от УУ первого варианта АФМ с отдельным силовым замыканием (см. рис. 1).

Как и в АФМ, выполненной по первому варианту, силовое замыкание во втором варианте АФМ осуществляется двумя пружинами 6 и 7:

- пружина 6 осуществляет замыкание пар трения ОФГ 3;
- пружина 7 замыкает как пары трения ОФГ 3, так и пары трения ДФГ 4.



**Рис. 2.** Принципиальная схема АФМ с отдельным силовым замыканием (вариант 2)

Схема силового замыкания в АФМ, выполненной по второму варианту, сходна со схемой замыкания пар трения ОФГ и ДФГ в первом варианте АФМ – пружина 7 осуществляет общее силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ, а пружина 6 – замыкание только пар трения ОФГ.

Разница заключается в том, что в первом варианте АФМ усилие замыкания пар трения ОФГ равно  $F_n$ , а усилие замыкания пар трения ДФГ – разности  $F_n - F_{n1}$ ; во втором варианте АФМ усилие замыкания пар трения ОФГ равно сумме сил  $F_n + F_{n1}$ , а усилие замыкания пар трения ДФГ – силе  $F_n$ .

Из этого следует, что во втором варианте АФМ с отдельным силовым замыканием усилия замыкания пар трения ОФГ и ДФГ используются эффективнее, чем в первом варианте АФМ.

Действительно, для второго варианта АФМ величина КУ вычисляется по следующей формуле [2]:

$$C_1 = \frac{1 + n_1}{z_1 f_{\max}}, \quad (3)$$

где  $n_1$  – коэффициент, вычисляемый по формуле:

$$n_1 = \frac{F_{n1}}{F_n}, \quad (4)$$

$F_{n1}$  – усилие пружины 6;  $F_n$  – усилие пружины 7.

Структурно формулы (2) и (4) одинаковые, однако для того, чтобы усилие замыкания пар трения ДФГ было меньше, чем усилие замыкания пар трения ОФГ (согласно условию отдельного силового замыкания), должно выполняться следующее неравенство:

$$F_{n1} > F_n. \quad (5)$$

Для первого варианта АФМ должно выполняться неравенство:

$$F_{n1} < F_n. \quad (6)$$

Сопоставление неравенств (5) и (6), а также формул (2) и (4) показывает, что  $n < n_1$ . Более того  $n < 1$ ,  $n_1 > 1$ .

Формулы для вычисления вращающих моментов первого и второго вариантов АФМ соответственно имеют вид [1, 2]:

$$T_{п1} = zF_{п}R_{ср}f \frac{z - (1-n)(Cf - 1)}{1 + (z-1)Cf}, \quad (7)$$

$$T_{п2} = F_{п}R_{ср}f \frac{z(1+n_1) + 1 - C_1f}{1 + (z-1)C_1f}, \quad (8)$$

где  $z$  – число пар поверхностей трения ОФГ.

Остальные параметры приведены выше.

В соотношениях (7) и (8) принято  $z_1=1$ . При этом условии достигается наибольшее значение КУ  $C$  и  $C_1$  (см. соотношения (1) и (3)) и максимальная точность срабатывания АФМ.

Из соотношений (1) и (3) найдем зависимость между коэффициентами  $n$  и  $n_1$ , приняв условие  $C=C_1$ . Получаем:

$$n_1 = \frac{n}{1-n}. \quad (9)$$

Условие  $C=C_1$  принято на основании известной закономерности влияния величины КУ АФМ на точность срабатывания [4]. При равенстве друг другу значений КУ первого и второго вариантов АФМ с отдельным силовым замыканием достигается приблизительно одинаковая точность их срабатывания. Это ставит сравниваемые варианты АФМ в равные условия.

Учитывая, что, согласно, исходному условию  $n_1 > 1$ , в соотношении (9) должно быть  $n > 0,5$ .

Подставив соотношение (9) в формулу (8) и заменив в последнем параметр  $C_1$  на параметр  $C$ , получаем:

$$T_{п2} = F'_{п}R_{ср}f \frac{z + 1 - (1-n)Cf}{(1-n)(1 + (z-1)Cf)}. \quad (10)$$

Далее примем  $T_{п1} = T_{п2}$ . Данное равенство также указывает на равные условия сравнения вариантов АФМ. В сравниваемых вариантах АФМ все параметры, кроме силы  $F'$ , приняты одинаковыми.

Используя принятые условия, а также соотношения (7) и (10), найдем зависимость между усилиями  $F_{п}$  и  $F'_{п}$ :

$$F'_{п} = F_{п} \frac{z(z - (1-n)(Cf - 1))(1-n)}{z + 1 - (1-n)Cf}. \quad (11)$$

Условие  $F_{\Pi}' < F_{\Pi}$  выполняется в том случае, если

$$\frac{z(z - (1-n)(Cf - 1))(1-n)}{z + 1 - (1-n)Cf} > 1. \quad (12)$$

Корни квадратного уравнения, эквивалентного квадратному неравенству (12), равны:

$$z_{1,2} = \frac{-((1-n)^2(Cf - 1) + 1) \pm \sqrt{((1-n)^2(Cf - 1) + 1)^2 + 4(1-n)(1 - (1-n)Cf)}}{-2(1-n)}. \quad (13)$$

С учетом отрицательного постоянного коэффициента при неизвестном второй степени в квадратном неравенстве, а также при  $D > 0$  (где  $D$  – дискриминант корней (13)), множество решений неравенства (12) запишем в следующем виде:

$$z \in \left( \frac{-A + \sqrt{D}}{-2B}; \frac{-A - \sqrt{D}}{-2B} \right). \quad (14)$$

В множестве решений (14) принято:

$$A = (1-n)^2(Cf - 1) + 1;$$

$$B = 1 - n;$$

$$D = ((1-n)^2(Cf - 1) + 1)^2 + 4(1-n)(1 - (1-n)Cf).$$

Утверждение  $D > 0$  принято с учетом соотношения (1) (при  $z_1 = 1$ ). В данном случае многочлен в квадратных скобках второго слагаемого дискриминанта корней (13) запишем в следующем виде:

$$\frac{f_{\max} - f}{f_{\max}}. \quad (15)$$

Очевидно, что выражение (15) положительное при всех значениях коэффициента трения  $f$ , кроме значения  $f = f_{\max}$ , когда оно обращается в ноль. Это подтверждает справедливость принятия условия  $D > 0$ .

Обратимся к выражению (14). Нижнее граничное значение в множестве решений (14), очевидно, отрицательное, что противоречит физическому смыслу параметра  $z$ . Более того, полуобласть решений в выражении (14), равная

$$\frac{-A + \sqrt{D}}{-2B}; 0,$$

также содержит отрицательные значения параметра  $z$  (кроме правого граничного значения, равного нулю), и не может быть принята во внимание в дальнейшем исследовании.

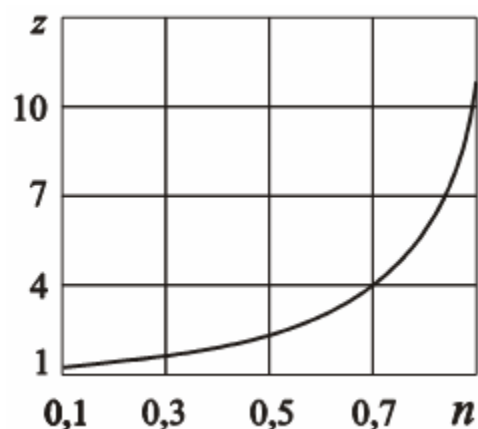
Наоборот, верхнее граничное значение в множестве решений (14) положительное, следовательно, далее будем рассматривать именно правую полуобласть решений в виде

$$0; \frac{-A - \sqrt{D}}{-2B}. \quad (16)$$

Для оценки верхнего граничного значения параметра  $z$  в выражениях (14) и (16) воспользуемся графическим способом. В качестве основы для построения графика примем функцию  $z(n)$  согласно выражению, определяющему верхнее граничное значение параметра  $z$  в множестве решений (14).

При построении графика будем учитывать зависимость (1) (при  $z_1 = 1$ ), определяющую в данном случае переменный характер параметра  $C$  в функции коэффициента  $n$ .

При построении графика зададимся следующими исходными данными:  $f_{\max} = 0,8$ ,  $f = 0,1$ .



**Рис. 3.** График зависимости числа пар трения от коэффициента  $n$

Значение коэффициента трения  $f$  принято исходя из того, что оно принимается равным минимальной величине, характерной для расчета номинального вращающего момента АФМ [5].

Анализ кривой, изображенной на рис. 3, показывает, что при небольших значениях коэффициента  $n$ , близких к нулю, ограничение сверху параметра  $z$  жесткое и не превышает единицы. Однако при значениях коэффициента  $n$ , близких к единице, ограничение сверху параметра  $z$  становится гораздо менее жестким и соответствует значениям, применяемым на практике.

Именно значения коэффициента  $n$ , близкие к единице, используются на практике для применения больших значений КУ и для получения высокой точности срабатывания АФМ [1].

Таким образом, получены доказательства того, что на практике выполняется, поставленное условие  $F_{\Pi}' < F_{\Pi}$ .

Результаты исследования могут быть использованы при разработке частных методик расчета и проектирования АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием.

### **Выводы**

1. Математически доказано, что во втором варианте АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием усилия замыкания пар трения ОФГ и ДФГ используются более эффективно, чем в первом варианте АФМ.

2. Приведены зависимости для расчета основных конструктивных параметров первого и второго вариантов АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Шишкарёв М.П., Лущик А.А. Эксплуатационные характеристики адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием // Тракторы и сельхозмашины.–2013.–№3.–с.28-31.
2. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении.–2012.–№10.–С.3-7.
3. Дьяченко С.К., Киркач Н.Ф. Предохранительные муфты. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 122 с.
4. Запорожченко Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.
5. Шишкарёв М.П. Эффективность применения адаптивных фрикционных муфт // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 1. – С. 27–31.