

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА РАЗДЕЛЬНОГО СИЛОВОГО ЗАМКЫВАНИЯ В АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТАХ

Зиновьев В.Е.

Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Аннотация.** Для третьего варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием определены границы изменения значения коэффициента усиления обратной связи, внутри которых муфта обладает наиболее высокой точностью срабатывания, если реализуется ее нагрузочная характеристика в форме кривой, монотонно возрастающей в интервале значений коэффициента трения. Разработан вариант отдельного силового замыкания, предусматривающий введение в конструкцию муфты дополнительной пружины в узле замыкания пар трения основной фрикционной группы.

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, отдельное замыкание, второе поколение, настройка, нагрузочная характеристика.

## THE IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLE OF SEPARATION OF POWER CIRCUIT IN THE ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES

Zinoviev V. E.

Rostov state University of Railways, Rostov-on-don, Russian Federation

**Abstract.** For the third variant of the adaptive friction clutch with a separate force closure, the boundaries of the change in the value of the feedback gain are determined, within which the clutch has the highest accuracy of operation, if its load characteristic is realized in the form of a curve monotonically increasing in the range of the friction coefficient values. A variant of separate power closure is developed, which provides for the introduction of an additional spring into the clutch design in the closure node of the thorn pairs of the main friction group.

**Keywords:** adaptive friction clutch, separate closure, second generation, adjustment, load characteristic.

**Состояние вопроса.** В работах [1, 2, 3, 4] приведены результаты исследований вариантов адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения с отдельным силовым замыканием. Показана, в частности, возможность реализации вариантов АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием пар трения фрикционных групп.

Установлено, что выбор варианта схемы отдельного силового замыкания в адаптивной фрикционной муфте второго поколения влияет на ограничение максимального значения коэффициента усиления обратной связи.

**Постановка задачи исследования.** Установление критерия выбора варианта схемы отдельного силового замыкания в АФМ второго поколения.

**Решение задачи.** Скорость изменения функции может быть оценена по абсолютной величине ее первой производной. Произвести указанную оценку в аналитической форме, используя соотношения, полученные в работах [5, 6], затруднительно, поэтому воспользуемся графическим способом, построив графики производных по аргументу  $C$  – коэффициенту усиления (КУ) обратной связи.

При построении графиков используем следующие исходные данные:  $f_{\min} = 0,1$ ,  $f_{\max} = 0,8$ ,  $z_1 = 1$ ,  $z = 6$ ,  $n = 8$ . Значения КУ  $C$  приняты в соответствии с интервалом их изменения согласно соотношению (5), т. е.  $C = 1,25 \dots 10$ . Здесь  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  – соответственно минимальный и максимальный коэффициенты трения,  $z$ ,  $z_1$  – число пар трения соответственно основной (ОФГ) и дополнительной (ДФГ) фрикционных групп,  $n$  – коэффициент, отражающий соотношение сил натяжения замыкающих пружин [7, 8, 9, 10].

Кривые 1 и 2, изображенные на рис. 1, построены по указанным соотношениям. На рис. 1 показаны модули указанных функций.

Графики показывают, что кривая 2 в интервале значений аргумента  $C$ , отложенном на оси

абсцисс, располагается выше кривой 1. Следовательно, все абсолютные значения, принадлежащие кривой 2, больше, чем значения, отложенные на кривой 1.

Это указывает на то, что скорость изменения (в данном случае – увеличения) функции, полученной в работе [11], при уменьшении КУ  $C$  выше при максимальной значении коэффициента трения.

Таким образом, для повышения точности срабатывания исследуемой АФМ необходимо увеличивать КУ  $C$ , предельным значением которого является верхнее граничное значение, назначаемое из интервала, определяемого соотношением, приведенным в работе [12].

Для исследуемого варианта АФМ ограничение максимального значения КУ  $C$  установим на основе уравнения равновесия сил, приложенных к нажимному диску:

$$F_p = F_{n1} + F_{n2} = F_{n2}(n + 1),$$

где  $F_p$  – распорная сила управляющего устройства;  $F_{n1}$ ,  $F_{n2}$  – силы натяжения пружин, замыкающих соответственно пары трения ОФГ и ДФГ.

Решая данное уравнение с учетом ранее найденного соотношения [13], получаем:

$$C_n = \frac{n + 1}{z_1 f_{\max}}. \quad (9)$$

Для того чтобы максимальное значение КУ, согласно неравенству (5), не выходило за допустимый предел, в соответствии с соотношением (9), значение коэффициента  $n$  должно удовлетворять неравенству:

$$n > z_1 m - 1,$$

где  $m = f_{\max} / f_{\min}$  – коэффициент относительной ширины интервала изменения коэффициента трения.

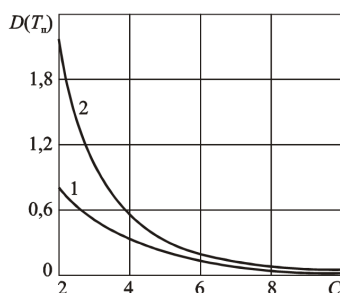


Рисунок 1 - Зависимости производных функций от КУ

С учетом поставленных выше условий высокой точности срабатывания АФМ запишем выражение для вычисления коэффициента точности:

$$K_T = \frac{f_{\max} [z(1 + n) - z_1 (Cf_{\max} - 1)] [1 + (z - 1)Cf_{\min}]}{f_{\min} [z(1 + n) - z_1 (Cf_{\min} - 1)] [1 + (z - 1)Cf_{\max}]}. \quad (10)$$

График зависимости  $K_T(C)$ , построенный по соотношению (10), показан на рис. 2. При построении кривой приняты следующие исходные данные:  $f_{\min} = 0,1$ ,  $f_{\max} = 0,8$ ,  $z = 6$ . Значение коэффициента  $n$  принято с учетом найденного выше ограничения и составило  $n = 8$  (при  $z_1 = 1$ ).

График показывает, что рассматриваемый вариант АФМ при  $C \geq 8$  обладает точностью срабатывания, позволяющей включить ее в состав муфт с высокой точностью срабатывания.

Значения КУ, принятые при построении графика, были определены с учетом интервала согласно соотношению (5), при этом наибольшее значение  $C$ , согласно соотношению (9), не превышало его предельно допустимого значения.

**Вариант 4.** В данном варианте АФМ предусматривается замыкание пар трения ОФГ усилием, равным  $F_{n1} - F_{n2}$ , а пар трения ДФГ – усилием, равным  $F_{n2}$ . Такая схема силового замыкания может быть осуществлена следующим образом:

– пары трения ОФГ замыкаются при помощи двух пружин: одна пружина поставлена между нажимным диском и жестким упором, закрепленным на ступице полумуфты 1, вторая – между нажимным диском и упомянутой пружиной. Силы натяжения пружин соответственно равны  $F_{n1}$  и  $F_{n2}$ ;

– пары трения ДФГ замыкаются усилием, равным  $F_{n2}$ , следовательно, силы натяжения пружин, одна из которых установлена между нажимным диском и второй пружиной, осуществляет нажатие пар трения ОФГ, а вторая осуществляет нажатие пар трения ДФГ, равны друг другу. При этом пружина, осуществляющая силовое замыкание пар трения ДФГ, работает автономно, т. е. ее усилие не является функцией усилий обеих пружин, осуществляющих замыкание пар трения ОФГ.

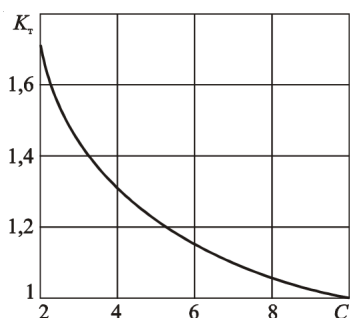


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента точности АФМ от КУ обратной связи

В соответствии с предложенной схемой силового замыкания пар трения ОФГ и ДФГ в рассматриваемом варианте АФМ запишем:

$$T_1 = zR_{cp}f(F_{n1} - F_{n2} - F_p), \quad (11)$$

$$T_2 = z_1F_{n2}R_{cp}f, \quad (12)$$

где  $T_1, T_2$  – вращающие моменты, передаваемые соответственно ОФГ и ДФГ;  $R_{cp}$  – средний радиус поверхностей трения пар ОФГ и ДФГ;  $f$  – коэффициент трения;  $F_p$  – распорная сила.

Как и выше, введем для данного варианта АФМ коэффициент  $n$ , равный:

$$n = \frac{F_{n1}}{F_{n2}}.$$

Согласно принятой схеме силового замыкания пар трения ОФГ, а также общего принципа раздельного силового замыкания в АФМ второго поколения, имеем  $n > 1$ .

Распорная сила определяется по следующей формуле:

$$F_p = \frac{T_2 + T_3}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол давления тел качения управляющего устройства;  $r$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения управляющего устройства.

Все обозначения параметров, входящих в последнюю формулу, приведены выше.

С учетом того, что параметр  $T_3$  представляет собой вращающий момент, который передают пары трения, непосредственно связанные с нажимным диском, запишем формулу для вычисления распорной силы:

$$F_p = F_{n2}Cf \frac{(z-1)(n-1) + z_1}{1 + (z-1)Cf}. \quad (13)$$

Сопоставление формулы (13) с ранее найденными соотношениями показывает ее отличие, следовательно, для рассматриваемого варианта значение распорной силы при одинаковых значениях конструктивных параметров отличается от величин распорной силы предшествующих вариантов.

Подставляя правую часть формулы (13) в выражение (11) и суммируя вращающие моменты  $T_1$  и  $T_2$ , находим полный вращающий момент АФМ:

$$T_n = F_{n2}R_{cp}f \frac{z(n-1) + z_1(1-Cf)}{1 + (z-1)Cf}. \quad (14)$$

Ограничение максимального значения КУ  $C$  находим на основе решения следующего уравнения:

$$F_p = F_{n1} - F_{n2} = F_{n2}(n-1).$$

Подставляя в данное уравнение соотношение (13) и решая его относительно неизвестного  $C$ , получаем:

$$C = \frac{n-1}{z_1 f_{\max}}. \quad (15)$$

Ограничение максимального значения КУ  $C$ , согласно соотношению (15), получено при максимальном значении вращающего момента  $T_n$ , соответствующем максимальному коэффициенту трения.

Ограничение максимального значения КУ  $C$ , как показывает соотношение (15), также отличается от аналогичных ограничений данного параметра в предшествующих вариантах АФМ, согласно ранее полученным выражениям, а также выражению (9).

Для рассматриваемого варианта АФМ справедлив интервал значений КУ  $C$ , внутри которого муфта обладает наибольшей точностью срабатывания, согласно соотношению (5), полученному при исследовании варианта 3. В этом случае, с учетом ограничения согласно соотношению (15) и ограничения максимального значения КУ  $C$ , согласно соотношению (5), находим ограничение значения коэффициента  $n$ :

$$n < z_1 m + 1. \quad (16)$$

Для рассматриваемого варианта АФМ значение коэффициента точности, с учетом соотношения (14), определяется по следующей формуле:

$$K_T = \frac{f_{\max} [z(n-1) + z_1(1 - Cf_{\max})][1 + (z-1)Cf_{\min}]}{f_{\max} [z(n-1) + z_1(1 - Cf_{\min})][1 + (z-1)Cf_{\max}]} \quad (17)$$

График зависимости  $K_T(C)$ , построенный с учетом соотношения (17), показан на рис. 3. При построении графика приняты те же исходные данные, что и при построении графика, изображенного на рис. 2. Значение коэффициента  $n$  принято с учетом ограничения, определяемого по соотношению (16), и при  $m = 8$  и  $Z_1 = 1$  составило  $n = 8$ .

Значения аргумента  $C$  приняты с учетом величины интервала, согласно соотношению (5), который при  $f_{\min} = 0,1$  и  $f_{\max} = 0,8$  составил 2...10.

Анализ графика, изображенного на рис. 3, показывает, что точность срабатывания рассматриваемого варианта АФМ при значениях  $C = 2...5$  практически не отличается от точности срабатывания третьего варианта (см. рис. 3). При значениях КУ  $C > 5$  точность срабатывания рассматриваемого варианта АФМ несколько выше, чем точность срабатывания третьего варианта АФМ.

По количественному показателю, характеризующему точность срабатывания, рассматриваемый вариант АФМ также можно отнести к предохранительным муфтам, обладающим особо высокой точностью срабатывания при значениях КУ, равных 8...10.

Упрощение конструкции четвертого варианта АФМ с отдельным силовым замыканием. Наличие третьей (дополнительной) пружины в четвертом варианте АФМ усложняет ее конструкцию. Между тем, разность сил  $F_{n1} - F_{n2}$ , действующих на пары трения ОФГ, может быть заменена силой  $F_{n1}$  одной пружины, равной указанной разности.

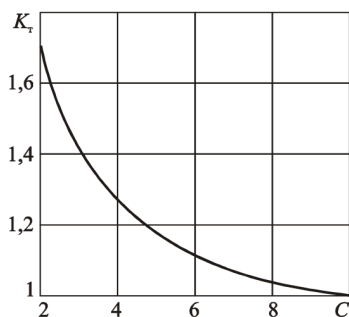


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента точности АФМ от КУ обратной связи

С формальной точки зрения подобная замена не влияет на математические выкладки, приведенные выше, поскольку всегда можно сделать замену:

$$F_{n1}' = F_{n1} - F_{n2}. \quad (18)$$

В формуле (18) значение силы  $F_{n1}$  выбирается в зависимости от значения номинального вращающего момента АФМ, назначаемого по условиям ее эксплуатации.

С учетом принятой схемы силового замыкания в рассматриваемом варианте АФМ при расчете, проектировании и настройке муфты должно выполняться следующее условие:

$$F_{n1} - F_{n2} > F_{n2},$$

откуда следует:

$$F_{n1} > 2F_{n2}. \quad (19)$$

Именно при выполнении условия (19) можно назначать значения коэффициента  $n > 1$ .

При реализации равенства (18) принципиальная схема отдельного силового замыкания четвертого варианта АФМ сводится к схеме первого варианта муфты, рассмотренной выше. Принципиальным отличием четвертого варианта АФМ является определенное соотношение между значениями усилий замыкания пар трения ОФГ и ДФГ.

Результаты исследования могут быть использованы при выборе необходимого варианта АФМ с раздельным силовым замыканием, его расчете и проектировании с учетом условий эксплуатации.

Выводы:

1. Для третьего варианта АФМ с раздельным силовым замыканием определены границы изменения КУ, внутри которых муфта обладает наиболее высокой точностью срабатывания, если реализуется ее нагрузочная характеристика в форме кривой, монотонно возрастающей в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ . Точность срабатывания АФМ повышается с увеличением КУ в пределах указанных границ его значений.

2. Разработан вариант раздельного силового замыкания в АФМ второго поколения, который является аналогом первого варианта с определенным соотношением значений усилий замыкания пар трения ОФГ и ДФГ. Данный вариант имеет две разновидности, одна из которых в конструктивном отношении полностью повторяет упомянутый вариант АФМ, вторая предусматривает введение в конструкцию АФМ дополнительной пружины в узле замыкания пар трения ОФГ.

3. В отличие от первого варианта раздельного силового замыкания вариант АФМ, упомянутый в п. 2, обладает более высокой точностью срабатывания.

4. В упомянутом в п. 2 варианте АФМ усилие замыкания пар трения ОФГ должно, по меньшей мере, в два раза превышать усилие замыкания пар трения ДФГ.

#### Список использованных источников

1. Обоснование наибольшей точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 11. – С. 20–26.

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

3. Анализ эксплуатационных характеристик вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием // М.П. Шишкарев, А.Ю. Угленко // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 8. – С. 25–29.

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

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

6. Компонентные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами // М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2003. – № 7. – С. 7–12.

7. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13–15.

8. О функциях адаптивных предохранительных фрикционных муфт // М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 7. – С. 7–8.

9. Шишкарев М.П. Исследование режима перегрузки АФМ второго поколения (базовый вариант) // В сборнике: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Сборник статей 8-й международной научно-практической конференции в рамках 18-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2015». 2015. С. 182–186.

10. Шишкарев, М.П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения // М.П. Шишкарев // 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.

11. Компонентная базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // М.П. Шишкарев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 7. – С. 16–20.

12. Шишкарев, М.П. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием / М.П. Шишкарев, А.А. Луцки / В сборнике: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф., в рамках 17-й Международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2014», Ростов н/Д, 2014. – С. 206–209.

13. Шишкарев, М.П. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкция и расчет. Монография // М.П. Шишкарев, А.А. Луцки, А.Ю. Угленко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР.