

УДК 621.825.54

**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)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С БИФУНКЦИОНАЛЬНЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

*На примере адаптивной фрикционной муфты с бифункциональным управляющим устройством, выполняющим функции нажимного узла и отжимного стабилизирующего устройства, показана целесообразность назначения больших величин коэффициента усиления обратной связи для повышения точности срабатывания, и его минимальных величин для оптимального сочетания нагрузочной способности и точности срабатывания муфты.*

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, бифункциональное управляющее устройство, точность срабатывания, нагрузочная способность.

**M. P. Shishkarev**

## OPTIMIZATION OF OPERATION INDEXES OF THE ADAPTIVE FRICTIONAL CLUTCH WITH THE BIFUNCTIONAL ACTUATION DEVICE

*On an example of an adaptive frictional clutch with the bifunctional actuation device executing functions of a press node and the squeezing stabilising device, the expediency of assignment of the big magnitudes of an amplification factor of a feedback for heightening of exactitude of operation, and its minimum magnitudes for an optimum combination of load ability and exactitude of operation of a clutch is displayed.*

**Keywords:** an adaptive frictional clutch, the bifunctional actuation device, exactitude of operation, load ability.

### 1. Введение

Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) имеют в своем составе управляющее устройство (УУ), которое позволяет автоматически регулировать усилие прижатия друг к другу поверхностей трения, передающих нагрузку, в зависимости от текущей величины коэффициента трения [1]. Благодаря наличию обратной связи АФМ обеспечивают более высокую стабильность предельного вращающего момента при значительных колебаниях величины коэффициента трения и приближают по величине текущий предельный вращающий момент к настроечному (номинальному) вращающему моменту муфты.

Однако применяемые в современной технике АФМ обладают существенным недостатком, заключающимся в невысокой нагрузочной способности [1], что ограничивает возможности их применения.

Отмеченного недостатка лишена разработанная в последнее время АФМ с бифункциональным управляющим устройством (УУ) обратной связи [2]. В данной конструкции АФМ используется, как и в АФМ первого поколения, одноконтурная отрицательная обратная связь [3], однако, измененная компоновочная схема позволяет существенно повысить нагрузочную способность муфты. Изменение компоновочной схемы АФМ относится к расположению УУ между нажимным узлом и фрикционной группой муфты, в отличие от традиционных схем АФМ, в которых УУ располагается по другую сторону от фрикционной группы относительно нажимного узла.

Исследованием установлено, что нагрузочная способность и точность срабатывания АФМ с бифункциональным УУ увеличиваются по мере роста величины коэффициента усиления (КУ) обратной связи [4]. При постоянных радиальных габаритах АФМ увеличение нагрузочной способности возможно только за счет повышения силы при-

жания друг к другу пар трения фрикционной группы. Однако указанное увеличение силы прижатия ограничено допускаемым давлением на поверхностях фрикционных контактов [5]. В связи с этим реальное увеличение нагрузочной способности АФМ возможно за счет увеличения ее радиальных габаритов (при увеличении усилия прижатия друг к другу пар трения) или путем увеличения числа пар трения, что неизбежно ведет к увеличению осевых габаритов АФМ.

Увеличение нагрузочной способности АФМ с бифункциональным УУ и соответствующее ему увеличение габаритных размеров муфты ведет к росту ее массы и момента инерции, что ухудшает эксплуатационные характеристики привода и машины в целом.

С другой стороны, повышение точности срабатывания АФМ за счет увеличения КУ позволяет уменьшить действующие в приводе нагрузки и, тем самым, оптимизировать размеры и совокупную массу элементов привода, защищаемых муфтой от чрезмерных перегрузок.

Таким образом, можно предположить, что величина КУ АФМ с бифункциональным УУ, влияющая на нагрузочную способность и точность срабатывания, должна быть оптимальной для того, чтобы обеспечить оптимальные показатели привода машины. Критерием указанной оптимизации величины КУ может быть максимальный прирост нагрузочной способности АФМ при наибольшем увеличении точности ее срабатывания на любом участке изменения величины КУ.

**Цель исследования.** Получение расчетных зависимостей для вычисления величины КУ АФМ с бифункциональным УУ, обеспечивающей оптимальное соотношение между нагрузочной способностью и точностью срабатывания муфты на конкретном участке изменения величины КУ.

**Задачи исследования.** 1. Определение оптимальных минимальных значений КУ обратной связи. 2. Исследование влияния на точность срабатывания АФМ значения КУ обратной связи.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Для решения поставленной задачи рассмотрим принципиальную схему АФМ с бифункциональным УУ, приведенную на рисунке. 1. Полумуфты 1 и 2 кинематически связаны между собой пакетом фрикционных дисков 3 и 4. Диски 3 связаны со ступицей нажимного диска 5 посредством подвижного в осевом направлении шлицевого соединения, диски 4 связаны с барабаном полумуфты 2 аналогичным способом. Нажимной диск 5 не имеет кинематической связи с полумуфтой 1 в окружном направлении.

Слева (по рисунку 1, а) пакет фрикционных дисков 3 и 4 опирается на упорный диск 6 посредством упорного подшипника 7, следовательно, нажимной диск 5 передает полный вращающий момент муфты.

Передача нагрузки от полумуфты 1 на нажимной диск 5 (в том случае, если полумуфта 1 является ведущей) или от нажимного диска на полумуфту 1 (если ведущей является полумуфта 2) осуществляется посредством тел качения 8. Последние размещены в скошенных гнездах нажимного диска 5 и опорного диска 9, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1 (см. рисунок 1, б, сечение А-А).

Силовое замыкание пакета фрикционных дисков 3 и 4 осуществляется за счет тангенциально установленных пружин 10, которые опираются на бобышки 11, закрепленные соответственно на нажимном 5 и жестко закрепленном на ступице полумуфты 1 опорном 9 дисках. Окружные силы пружин 10, действуя на нажимной диск 5, создают момент сил, благодаря которому тела качения 8 заклиниваются в гнездах между их

противоположными стенками (рис. 1, б, сечение А-А). В результате этого между телами качения и стенками гнезд возникает сила нормального давления (имеется в виду сила, приведенная к одному гнезду), осевая составляющая которой создает усилие замыкания пар трения фрикционной группы.

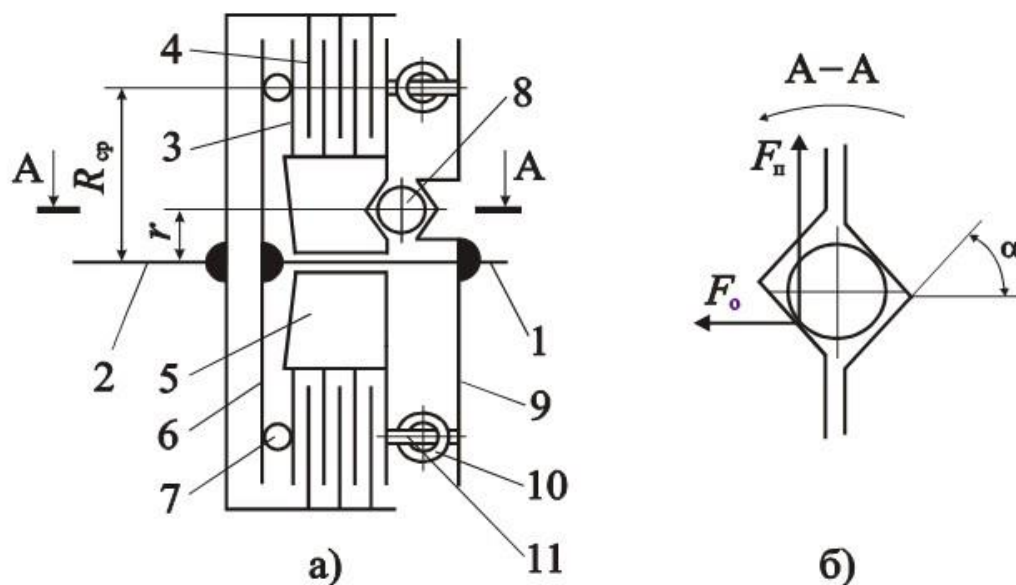


Рисунок 1. Принципиальная схема АФМ с бифункциональным УУ

Благодаря этому УУ АФМ, состоящее из дисков 5 и 9, а также из тел качения 8, выполняет одновременно функцию нажимного устройства, обеспечивающего возбуждение сил трения между парами фрикционной группы и, следовательно, передачу нагрузки муфтой.

В связи с тем, что УУ муфты выполняет две функции, данной муфте присвоено указанное название.

В рассматриваемой АФМ использована возможность регулирования силы натяжения пружин 10 и, следовательно, величины передаваемого вращающего момента (устройство для изменения силы натяжения пружин на рис. 1 не показано).

Формула для вычисления величины предельного вращающего момента, передаваемого муфтой, приведена в работе [6] и имеет следующий вид:

$$T_{\text{н}} = z F_{\text{н}} R_{\text{cp}} C \frac{f}{1 + z C f}, \tag{1}$$

где  $z$  – число пар трения 3–4;  $F_{\text{н}}$  – суммарная начальная сила натяжения пружин 10;  $R_{\text{cp}}$  – средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков 3 и 4;  $f$  – коэффициент трения между фрикционными дисками 3 и 4;  $C$  – КУ отрицательной обратной связи АФМ:

$$C = \frac{R_{\text{cp}}}{r} \operatorname{tg} \alpha, \tag{2}$$

$\alpha$  – угол скоса гнезд под тела качения 8 (рис. 1, б, сечение А-А);  $r$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения 8 (рис. 1, а).

Далее будем считать, что  $\alpha = \text{const}$ .

Для оценки точности срабатывания предохранительных муфт, в том числе АФМ, используется коэффициент точности [7], величина которого для рассматриваемой муфты вычисляется, с учетом соотношения (1), по формуле:

$$K_T = \frac{f_{\max}(1 + zCf_{\min})}{f_{\min}(1 + zCf_{\max})}, \quad (3)$$

где  $f_{\max}$  – максимальное значение, которое может принимать коэффициент трения в реальных условиях эксплуатации АФМ;  $f_{\min}$  – соответственно минимальное значение коэффициента трения.

Функция (1) возрастает по аргументу  $C$  при  $f = \text{const}$ , как установлено в работе [8]. Функция (2), согласно данным работы [1], убывающая по аргументу  $C$ . Формально, с данной точки зрения, оптимальной по критерию нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ будет максимально возможная величина КУ  $C$ . Для АФМ любого типа эта величина составляет 5...6 [9], поскольку, во-первых, дальнейшее увеличение КУ  $C$  не приводит к существенному повышению точности срабатывания муфты, во-вторых, при указанных значениях КУ  $C$  муфта работает неустойчиво при передаче нагрузок, близких по величине к предельным [9].

Однако, как отмечено выше, увеличение КУ  $C$  приводит к соответствующему увеличению габаритов и массы АФМ. В соответствии с этим, увеличение нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ с бифункциональным устройством за счет увеличения КУ  $C$  представляется рациональным только до определенного предела.

Определение оптимальной величины КУ  $C$ , обеспечивающей оптимальную нагрузочную способность и соответствующую ей точность срабатывания АФМ будем производить по критерию максимального повышения величины вращающего момента муфты в определенном интервале изменения величины КУ  $C$ . Действительно, при меньшем увеличении вращающего момента в равных интервалах изменения величины КУ  $C$  требуется больший относительный прирост габаритных размеров и массы муфты, следовательно, в данном случае рассматриваемый вариант нельзя считать оптимальным.

Для определения оптимальной величины КУ  $C$  воспользуемся следующим приемом. При разбиении общего интервала изменения величины КУ  $C$  на отдельные равные друг другу участки примем следующую зависимость:

$$C_i = nC_{i-1}, \quad (4)$$

где  $C_i$  – увеличенное (последующее) значение КУ  $C$  при варьировании его величины;  $n$  – коэффициент:  $n > 1$ ;  $C_{i-1}$  – предыдущее значение КУ  $C$ .

В формуле (3) полагаем, что  $n = \text{const}$ , поскольку речь идет о равных участках разбиения общего интервала значений КУ  $C$ .

При оценке степени увеличения нагрузочной способности АФМ в результате варьирования величины КУ  $C$  воспользуемся следующим отношением:

$$p = \frac{T_n(C_i)}{T_n(C_{i-1})}, \tag{5}$$

где  $T_n(C_i)$ ,  $T_n(C_{i-1})$  – предельный вращающий момент АФМ соответственно при увеличенном и предыдущем значении КУ  $C$ .

Выразив из соотношения (3) параметр  $C_{i-1}$  через параметр  $C_i$  и используя соотношение (1), получим, с учетом формулы (4), следующее выражение:

$$p = \frac{nC_i f_{\min} (1 + C_i f_{\min} / n)}{C_i f_{\min} (1 + zC_i f_{\min})} = \frac{n + zC_i f_{\min}}{1 + zC_i f_{\min}}. \tag{6}$$

Для установления возможности максимума функции (5) продифференцируем ее один раз по переменной  $C_i$ , в результате чего получим:

$$p'(C_i) = \frac{zf_{\min}(1-n)}{(1+zC_i f_{\min})^2}. \tag{7}$$

Поскольку  $n > 1$ , производная (6) отрицательна во всем интервале изменения величины КУ  $C$ , следовательно, функция (5) максимума в указанном интервале не имеет и является убывающей. Поэтому увеличение КУ  $C$  нецелесообразно по принятому критерию.

Для оценки скорости убывания функции (5) рассмотрим графики, изображенные

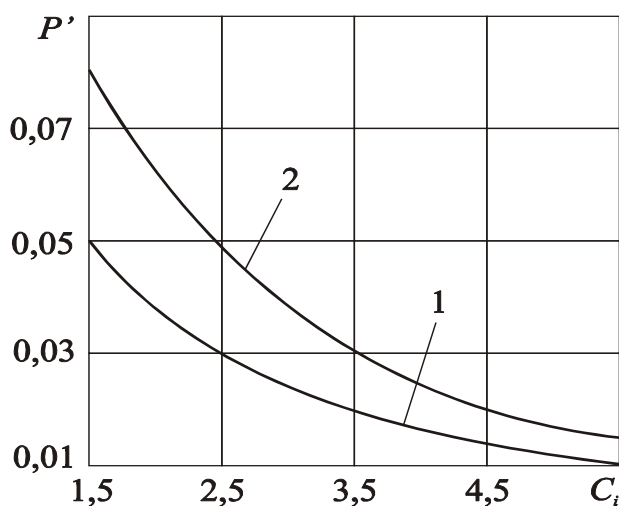


Рисунок. 2. Зависимость параметра  $p'$  от КУ  $C_i$

на рис. 2. Графики построены по следующим исходным данным:  $z=6$ ,  $f_{\min}=0,1$ . Кривая 1 построена при  $n=1,3$ , кривая 2 – при  $n=1,5$ . При построении графиков использована формула (6).

Графики показывают, что наибольшая скорость убывания функции (5) при изменении величины КУ  $C_i$  в области небольших значений ( $C_i=1...1,5$ ). При изменении КУ  $C_i$  в области больших значений ( $C_i=3,5...5,5$ ) скорость убывания функции (5) заметно (в 2,5...5 раз) падает. Поэтому в случае использования АФМ с достаточно большой первоначальной величиной КУ  $C_i$  (4...5) его увеличение с целью повышения

нагрузочной способности муфты может быть оправданным.

Изменение величины коэффициента  $n$  приводит к изменению модуля производной (6), однако на ее характер не влияет.

Изменим подход к оптимизации величины КУ  $C$  по установленному критерию. Новый подход основан на оптимизации величины комплексного параметра, включающего параметры  $C$  и  $K_T$ . Теоретическое обоснование данного подхода заключается в следующем.

Увеличение КУ  $C$ , сопровождаемое повышением точности срабатывания АФМ, приводит к увеличению габаритных размеров и массы привода машины. Однако повышение точности срабатывания АФМ позволяет уменьшить максимальные напряжения, действующие в деталях привода при перегрузках и, соответственно, их размеры и массу.

Таким образом, при увеличении нагрузочной способности АФМ уменьшается относительное рассеяние величины предельного вращающего момента муфты за счет повышения точности ее срабатывания. В соответствии с этим комплексной характеристикой оптимизации величины КУ  $C$  должно быть произведение величины номинального вращающего момента на величину коэффициента точности, т. е:

$$p_1 = T_{\text{ном}} K_T. \quad (8)$$

С учетом формулы (1), а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [10], можно записать:

$$T_{\text{ном}} = zF_{\text{н}} R_{\text{ср}} C \frac{f_{\text{min}}}{1 + zCf_{\text{min}}}. \quad (9)$$

После подстановки правых частей соотношений (2) и (8) в формулу (7) получим:

$$p_1 = zF_{\text{н}} R_{\text{ср}} C \frac{f_{\text{max}}}{1 + zCf_{\text{max}}}. \quad (10)$$

В качестве критерия оптимальности изменения величины КУ  $C$  необходимо принять минимальное значение коэффициента  $p_1$ . Функция (9) возрастает по аргументу  $C$ , причем, характер ее изменения идентичен характеру изменения функции (1) по аргументу  $f$  [11]. Это означает, что увеличение нагрузочной способности АФМ при возрастании КУ  $C$  не может компенсировать повышение точности срабатывания муфты. Следовательно, абсолютное рассеяние величины предельного вращающего момента АФМ с увеличением КУ  $C$  будет возрастать, что неблагоприятно скажется на прочности узлов и деталей привода машины.

Следовательно, критерием оптимальности должна быть минимальная величина коэффициента  $p_1$ . Минимальным значениям последнего соответствуют минимальные величины КУ  $C$ .

Заметим, что, согласно соотношению (1), номинальная нагрузочная способность АФМ с бифункциональным УУ будет равна номинальной нагрузочной способности АФМ первого поколения [12], если принять  $C=1$ . В соответствии с этим, при оптимизации величины КУ  $C$  необходимо, с целью получения эффекта повышения нагрузочной способности АФМ с бифункциональным УУ, ограничивать минимальную величину КУ  $C$ , соблюдая условие  $C > 1$ .

Из соотношения (1) следует также, что АФМ с бифункциональным УУ нецеле-

сообразно использовать при величинах КУ  $C$ , таких, что  $C < 1$ , поскольку в данном случае ее нагрузочная способность будет ниже, чем у АФМ первого поколения, со значительным уменьшением точности срабатывания.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ с бифункциональным УУ для выбора оптимального значения коэффициента усиления обратной связи.

### 3. Заключение

По критерию максимального прироста величины вращающего момента АФМ с бифункциональным УУ оптимальными являются минимальные значения КУ обратной связи. Максимальная точность срабатывания муфты при этом не достигается.

При использовании АФМ с большой начальной величиной КУ целесообразно ее увеличение с целью повышения нагрузочной способности муфты.

По комплексному критерию оптимальности величины КУ, основанному на показателях нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ с бифункциональным УУ оптимальными являются минимальные значения КУ.

При оптимизации величины КУ необходимо ее ограничение снизу значением, равным единице.

При значениях КУ, меньших единицы, точность срабатывания АФМ с бифункциональным УУ меньше, чем точность срабатывания АФМ первого поколения.

### 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. Повышение надежности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 4. – С. 6–9.
3. Шишкарев М. П. Условие и возможность реализации высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 3. – С. 3–6.
4. Шишкарев М. П., Луцник А. А., Угленко А. Ю. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет: монография. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.
5. Шишкарев 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. Шишкарев (СССР). – № 3475963/25–27; Заявлено 28.07.82; Опубл. 23.11.83. Бюл. № 43. – 6 с.: ил.
7. Шишкарев М. П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 3–6.
8. Шишкарев М. П., Луцник 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. Шишкарев 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. А. с. 1430633 СССР, МПК<sup>4</sup> F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарев (СССР). – № 4048607/25–27; Заявлено 26.02.86; Опубл. 15.10.88. Бюл. № 38. – 3 с.: ил.

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

12. Шишкарев 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 15.02.2024 г.