

УДК 621.838.222

М. П. Шишкарев, д-р техн. наук, доцент

Донской государственной технической университет, Российская Федерация

Тел.: 89081933393; E-mail: shishkarev_m_p@mail.ru**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ (БАЗОВЫЙ ВАРИАНТ)**

В статье приведены результаты исследования адаптивной фрикционной муфты второго поколения (базовый вариант). Применение принципа отдельного силового замыкания фрикционных групп в муфте позволило повысить значение коэффициента усиления обратной связи, при котором обеспечивается адаптивный режим работы муфты в интервале возможных значений коэффициента трения, и точность срабатывания муфты. Показано, что наибольшая точность срабатывания муфты достигается в том случае, когда значение вращающего момента, передаваемого основной фрикционной группой, обращается в ноль при максимальном значении коэффициента трения.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, второе поколение, коэффициент усиления, отдельное силовое замыкание, точность срабатывания, коэффициент трения.

M. P. Shishkarev**IMPROVING THE ACTUATION ACCURACY OF THE SECOND GENERATION ADAPTIVE FRICTION CLUTCH (BASIC VERSION)**

The article presents the results of the study of the adaptive friction clutch of the second generation (basic version). The application of the principle of separation of power circuit groups of the friction clutch has improved the value of the coefficient gain feedback, which provides an adaptive mode the clutch interval of possible values of the friction coefficient and accuracy actuation of the clutch. It is shown that the greatest accuracy of the coupling operation is achieved when the value of the torque transmitted by the main friction group turns to zero at the maximum value of the coefficient of friction.

Keywords: adaptive friction clutch, second generation, gain factor, separate power closure, actuation accuracy, coefficient of friction.

1. Введение

Синтезированный в работе [1] и исследованный в работе [2] базовый вариант адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения имеет две фрикционные группы и комбинированную – отрицательно-нулевую обратную связь. Одна фрикционная группа охвачена отрицательной обратной связью, вторая фрикционная группа не охвачена обратной связью, т. е. имеет так называемую нулевую обратную связь.

Одним из основных эксплуатационных показателей предохранительных муфт любого типа, в том числе АФМ, является точность срабатывания, которая характеризует уровень стабильности значения предельного вращающего момента, передаваемого муфтой [3]. В работе [4] показано, что точность срабатывания базового варианта АФМ второго поколения несколько выше, чем точность срабатывания АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера) [5].

Несмотря на это, точность срабатывания АФМ второго поколения (базовый вариант) нельзя считать достаточной для удовлетворительного решения в некоторых случаях проблем защиты приводов машин от перегрузок. Причина этого заключается в том, что максимальное значение коэффициента усиления (КУ) отрицательной обратной связи, определяющего уровень точности срабатывания АФМ, ограничено ввиду того, что оно устанавливает границу между адаптивным и неадаптивным режимами работы в пределах интервала изменения коэффициента трения между элементами фрикционных групп [6].

Цель исследования: Изучение и разработка способа повышения точности срабатывания базового варианта АФМ второго поколения.

Задачи исследования: 1. Оценка влияния раздельного силового замыкания на величину КУ обратной связи. 2. Постановка условия наибольшей точности срабатывания АФМ. 3. Оценка влияния параметров АФМ на ее точность срабатывания.

2. Основное содержание и результаты работы

Рассмотрим принципиальную схему АФМ, показанную на рис. 1, а. По совокупности основных конструктивно-компоновочных признаков (число фрикционных групп, связь между ними, тип обратной связи) представленный вариант муфты относится к базовому варианту АФМ второго поколения [2].

Полумуфты 1 и 2 связаны одна с другой двумя фрикционными группами:

- основной (ОФГ), состоящей из дисков трения 3 и 4;

- дополнительной (ДФГ), включающей диски трения 5 и 6.

Диски 3 и 5 соединены с барабаном полумуфты 2, диски 4 и 6 – с нажимным диском 7, который лишен непосредственной кинематической связи с полумуфтой 1.

Управляющее устройство (УУ) муфты состоит из тел качения

8, которые расположены в гнездах с наклонными боковыми стенками, выполненных на обращенных друг к другу поверхностях нажимного диска 7 и упорного диска 9, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1 (рис. 1, б).

Силовое замыкание элементов пар трения ОФГ и ДФГ выполнено комбинированным и осуществляется при помощи двух пружин 10 и 11. Пружина 10 замыкает только элементы пар трения ОФГ, а пружина 11 – обе фрикционные группы.

Для уменьшения влияния трения на эксплуатационные показатели АФМ – номинальную нагрузочную способность и точность срабатывания – между подвижными и неподвижными (относительной полумуфты 1) элементами установлены упорные подшипники.

Значение вращающего момента T , передаваемого муфтой, равно сумме значений двух вращающих моментов – момента T_1 , равного моменту сил трения ОФГ, и момента T_2 , равного моменту сил трения ДФГ, т. е.

$$T = T_1 + T_2 . \tag{1}$$

При передаче вращающего момента на пары трения ОФГ, кроме сил натяжения пружин 10 и 11, действует распорная (отжимная) сила УУ, возникающая в результате взаимодействия между телами качения 8 и наклонными боковыми стенками гнезд (рис. 1, б). На основании этого запишем:

$$T_1 = z_1 R_{cp} f (F_{n1} + F_{n2} - F_p) , \tag{2}$$

где z_1 – число пар трения ОФГ; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения ОФГ; f –

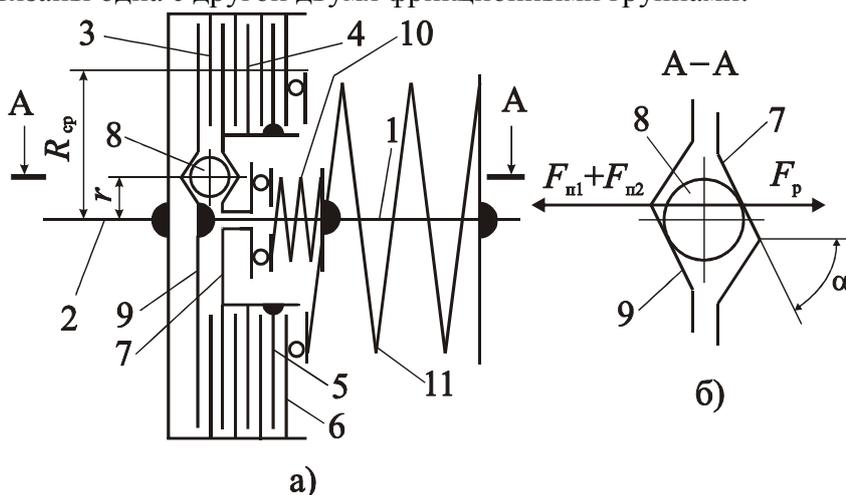


Рисунок 1. Принципиальная схема модернизированной АФМ второго поколения

коэффициент трения между элементами пар ОФГ; F_{n1}, F_{n2} – силы натяжения соответственно пружин 10 и 11; F_p – распорная (отжимная) сила УУ.

Значение вращающего момента, который передает ДФГ, определяется по следующей формуле:

$$T_2 = z_2 F_{n2} R_{cp} f, \quad (3)$$

где z_2 – число пар трения ДФГ. Остальные обозначения приведены выше.

При выводе формулы (3) принято условие, заключающееся в том, что значения средних радиусов поверхностей трения элементов пар ОФГ и ДФГ одинаковы.

На пары трения ДФГ распорная сила УУ не действует до тех пор, пока $F_p \leq F_{n2}$.

Нажимной диск 7 передает полный вращающий момент АФМ, поэтому значение распорной силы УУ определяется по следующей формуле:

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

где α – угол наклона боковой стенки гнезда под тело качения 8 (рис. 1, б, сечение А-А); r – радиус окружности, на которой расположены тела качения 8 (рис. 1, а).

Подставляя правую часть формулы (4) в формулу (2) и учитывая при этом формулы (1) и (3), находим в результате решения составленного уравнения относительно неизвестного члена T_1 :

$$T_1 = z_1 R_{cp} f \frac{F_{n1} + F_{n2} - z_2 F_{n2} C f}{1 + z_1 C f}, \quad (5)$$

где C – КУ обратной связи:

$$C = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha.$$

Подставляя правые части формул (3) и (5) в равенство (1), получаем:

$$T = R_{cp} f \frac{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2) F_{n2}}{1 + z_1 C f}. \quad (6)$$

Функция (6) является возрастающей по аргументу f в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$ (где f_{\min}, f_{\max} – соответственно минимальный и максимальный коэффициенты трения).

Функция (5) обращается в ноль при значении коэффициента трения, вычисляемом по соотношению:

$$f_1 = \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 C_k F_{n2}}. \quad (7)$$

Наибольшая точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда значение вращающего момента T при значении коэффициента трения, равном f_{\max} , будет наименьшим.

Поскольку значение вращающего момента T_2 при значении коэффициента трения, равном f_{\max} , постоянное, условие минимума значения вращающего момента T будет выполняться в том случае, когда $T_1=0$, также при значении коэффициента трения, равном f_{\max} . Таким образом, при $f_1 = f_{\max}$ из формулы (7) находим:

$$C_k = \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 F_{n2} f_{\max}}. \quad (8)$$

В данном случае значение коэффициента точности АФМ [7] вычисляется по следующей формуле:

$$K_T = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \times \frac{z_2 F_{n2} [1 + z_1 C f_{\min}]}{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2) F_{n2}} \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что значение коэффициента точности уменьшается по мере уменьшения силы F_{n2} , что вытекает из формулы, полученной в результате подстановки правой части соотношения (8) в формулу (9):

$$K_T = \frac{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2 m) F_{n2}}{z_1 F_{n1} + (z_1 + z_2) F_{n2}}, \quad (10)$$

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

Формула (10) показывает, что точность срабатывания АФМ повышается также с уменьшением числа пар трения z_2 ДФГ.

Представим $F_{n1} = n F_{n2}$ (где n – коэффициент; $n \neq 1$). Тогда формулу (10) запишем в следующем виде, исключаящем силовые факторы F_{n1} и F_{n2} :

$$K_T = \frac{z_1 n + z_1 + z_2 m}{z_1 n + z_1 + z_2} \quad (11)$$

Рассмотрим дополнительно два варианта АФМ: при $C < C_k$ и $C > C_k$. При выполнении неравенства $C > C_k$ (значение КУ C_k определяется по формуле (8)), согласно соотношению (7), справедливо неравенство $f_1 < f_{\max}$. Это означает, что функция (5) обратится в ноль внутри интервала $f_{\min} \dots f_{\max}$, а не на его верхней границе, как это имеет место при $C = C_k$.

Равенство $T_1 = 0$ тождественно равенству $F_p = F_{n1} + F_{n2}$, т. е. в интервале значений коэффициента трения $f_1 \dots f_{\max}$ в муфте будет действовать положительная обратная связь.

В указанном интервале вращающий момент будет передаваться парами трения ДФГ, и при увеличении коэффициента трения распорная сила УУ возрастет, что приведет к перемещению вправо (по рис. 1, а) нажимного диска 7 и дополнительной осадке пружин 10 и 11.

Каждое новое промежуточное равновесное состояние нажимного диска, описываемое соответствующим уравнением, будет характеризоваться текущим значением силы $F'_{n2} > F_{n2}$. Поэтому при значении коэффициента трения $f = f_{\max}$ значение вращающего момента АФМ будет больше, чем вращающий момент T_2 , вычисляемый по формуле (3) при указанном значении коэффициента трения.

Кроме того, увеличение КУ, согласно формуле (6), приведет к уменьшению вращающего момента T при значении $f = f_{\min}$.

В математической форме, изложенное выше, можно описать следующим образом. Распорная сила УУ в данный период работы АФМ вычисляется по следующей формуле:

$$F_p = \frac{T_2}{r} \operatorname{tg} \alpha = z_2 R_{cp} f \frac{F_p - F_{n1} - F_{n2}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

откуда получаем:

$$F_p = z_2 C f \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 C f - 1}.$$

В рассматриваемый период времени выполняется неравенство $F_p > F_{n1} + F_{n2}$, поэтому усилие замыкания пар трения ДФГ равно F_p . На основании этого находим:

$$T_2' = z_2 F_p R_{cp} f = z_2^2 R_{cp} C f^2 \frac{F_{n1} + F_{n2}}{z_2 C f - 1}. \quad (12)$$

Сопоставление вращающих моментов T_2 (по формуле (3)) и T_2' при значении коэффициента трения f_{max} показывает, что $T_2' > T_2$.

Таким образом, при условии $C > C_k$ тонность срабатывания АФМ будет снижена.

В том случае, если $C < C_k$, то при значении коэффициента трения $f = f_{max}$ функция (5) не обращается в нуль, и значение максимального вращающего момента АФМ будет определяться по формуле (6), а значение коэффициента точности – по формуле

$$K_T = \frac{f_{max} (1 + z_1 C^* f_{min})}{f_{min} (1 + z_1 C^* f_{max})}. \quad (13)$$

В формуле (13) параметр C^* – КУ обратной связи, удовлетворяющий условию $C^* < C_k$.

Формула (13) идентична по структуре формуле для определения значения коэффициента точности АФМ первого поколения [8, 9].

Для сопоставления точности срабатывания АФМ при различных значениях КУ (критическом значении, меньше и больше критического) воспользуемся графическим способом. Для этого запишем формулу по определению значения коэффициента точности K_T при условии $C > C_k$, воспользовавшись соотношениями (6) (при значении коэффициента трения $f = f_{min}$) и (11) (при значении коэффициента трения $f = f_{max}$):

$$K_T = \frac{z_2^2 C f_{max}^2 (n+1)(1 + z_1 C f_{min})}{f_{min} (z_2 C f_{max} - 1)(z_1 n + z_1 + z_2)}. \quad (14)$$

Комбинированный график, построенный по формулам (11), (13) и (14), показан на рис. 2. При построении кривой 1 в соответствии с изложенными выше рекомендациями приняты следующие исходные данные: $z_1=6$, $n=8$, $f_{min}=0,1$, $f_{max}=0,8$, $m=8$, $z_2=1$. Кривая 2 построена при значении $n=12$ с целью выявления влияния коэффициента n на точность срабатывания АФМ.

Анализ графиков показывает следующее:

- кривая точности срабатывания АФМ имеет точку минимума, соответствующую значению КУ $C = C_k$. В области значений $C < C_k$ увеличение КУ приводит к повышению точности срабатывания АФМ. В области значений КУ $C > C_k$ точность срабатывания АФМ резко снижается и становится меньше, чем точность срабатывания неадаптивной предохранительной фрикционной муфты;

- увеличение коэффициента n приводит к повышению точности срабатывания АФМ при значении КУ $C = C_k$. При значениях КУ $C < C_k$ и $C > C_k$ изменение значе-

ния коэффициента n не приводит к изменению точности срабатывания муфты.

В базовом варианте АФМ второго поколения максимальное значение КУ ограничено значением $C = 1/f_{\max}$ по критерию достижения максимальной точности срабатывания при $z_2 = 1$ [10, 11]. При принятом выше значении коэффициента трения f_{\max} , параметрах z_1 , z_2 и f_{\min} значение коэффициента точности муфты равно 1,89, т. е. значительно (в 1,67 раза) больше, чем значение коэффициента точности исследуемой АФМ.

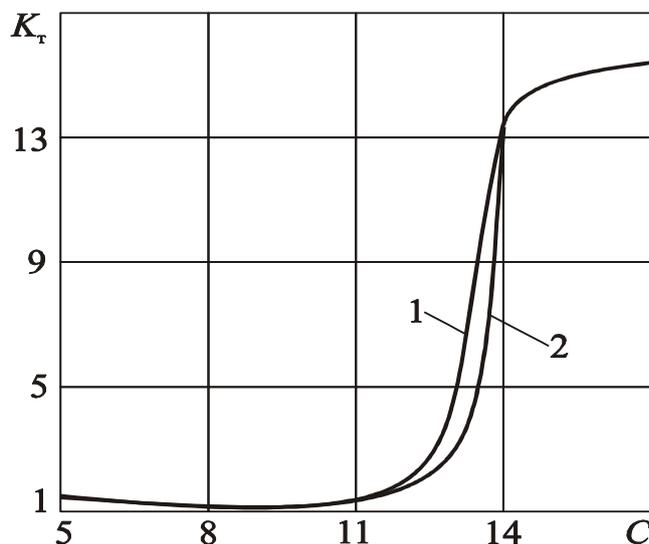


Рисунок 2. Зависимости коэффициента точности от коэффициента усиления УУ

ээффициента n это означает виртуальное уменьшение КУ относительно значения, определяемого по формуле (8) [12]. Поскольку при $C < C_k$ точность срабатывания АФМ не зависит от значения коэффициента n (см. формулу (13)), при его увеличении виртуальное уменьшение значения КУ приведет к снижению точности срабатывания муфты.

Если в результате настройки муфты произойдет уменьшение значения коэффициента n , то значение КУ, удовлетворяющее условию обращения в ноль функции (5), также становится меньше. Следовательно, в данном случае будет справедливо неравенство $C > C_k$, что, согласно рис. 2, приведет к резкому снижению точности срабатывания АФМ.

Таким образом, оптимальным представляется способ настройки АФМ, при котором в результате изменения значений сил натяжения пружин соотношение между этими силами остается неизменным. Постоянство значения коэффициента n обеспечивается за счет назначения соответствующих значений коэффициентов осевой жесткости пружин, для определения которых запишем следующее равенство:

$$n = \frac{F_{n1}}{F_{n2}} = \frac{F_{n1} + \Delta F_{n1}}{F_{n2} + \Delta F_{n2}}, \tag{15}$$

где ΔF_{n1} , ΔF_{n2} – прирост соответственно сил натяжения пружин 10 и 11.

Из равенства (15) находим:

$$n = \frac{F_{n1}}{F_{n2}} = \frac{\Delta F_{n1}}{\Delta F_{n2}}. \tag{16}$$

Задача выбора значений коэффициентов осевой жесткости пружин заключается

Влияние значения КУ на точность срабатывания АФМ, показанное на графике (рис. 2), позволяет найти оптимальный способ настройки муфты. При настройке муфты на заданное значение номинального вращающего момента происходит одновременное изменение сил натяжения пружин F_{n1} и F_{n2} . При этом, в зависимости от величин коэффициентов осевой жесткости пружин, может изменяться или оставаться постоянным значение коэффициента n .

В процессе настройки муфты значение КУ остается постоянным, поэтому при увеличении ко-

в том, чтобы значение, равное отношению прироста сил пружин 10 и 11, оставалось постоянным и равным значению коэффициента n . Прирост сил натяжения пружин 10 и 11 соответственно равен:

$$\begin{aligned}\Delta F_{n1} &= c_1 x, \\ \Delta F_{n2} &= c_2 x,\end{aligned}\tag{17}$$

при одинаковом значении осадки пружин под действием одного и того же регулировочного элемента. В формулах (17) c_1 и c_2 – коэффициенты осевой жесткости соответственно пружин 10 и 11, x – осевая осадка пружин.

Подставляя формулы (17) в равенство (16), получаем:

$$n = \frac{c_1}{c_2}.\tag{18}$$

Поскольку значение коэффициента осевой жесткости пружины постоянное, заданное значение коэффициента n может быть получено путем назначения значений параметров c_1 и c_2 в соответствии с формулой (18).

При уменьшении значения осадки пружин в результате регулирования АФМ соотношения (16) и (18) остаются справедливыми.

Компоновочная схема АФМ обеспечивает соотношение (18) (при $n > 1$): пружина 10 имеет меньший, по сравнению с пружиной 11, средний радиус витков.

Результаты исследования могут быть использованы при расчете и проектировании АФМ с отдельным силовым замыканием пар трения ОФГ и ДФГ.

Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Повысить значение КУ, при котором обеспечивается адаптивный режим работы муфты в интервале возможных значений коэффициента трения за счет отдельного силового замыкания пар трения фрикционных групп в АФМ, и повысить точность срабатывания муфты.

2. Установить, что наибольшая точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда значение вращающего момента, передаваемого ОФГ, обращается в ноль при максимальном значении коэффициента трения. Этому условию соответствует определенное значение КУ, которое зависит от соотношения исходных сил замыкания фрикционных групп.

3. Доказать, что на точность срабатывания муфты влияет число пар трения ДФГ. Наибольшая точность срабатывания АФМ достигается при числе пар трения ДФГ, равном единице.

4. Показать, что для сохранения достигаемой точности срабатывания АФМ при ее настройке на необходимый вращающий момент отношение значений коэффициентов осевой жесткости замыкающих пружин должно равняться отношению их сил натяжения.

5. Установить, что увеличение отношения значений сил натяжения замыкающих пружин ОФГ и ДФГ приводит к увеличению КУ и точности срабатывания АФМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М. П. Шишкарев, А. А. Лущик // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Состояние и

перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 25-28 февраля 2014 г. – Ростов н/Дону, 2014. – С. 206-209.

2. Шишкарев, М. П. Оптимизация компоновочного решения базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 7-10.

3. Шишкарев, М. П. Влияние точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт на массу привода машины / М.П. Шишкарев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 3. – С. 6-12.

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

5. А. с. 1055915 СССР, МПК³ F 16 D 7/02, F 16 D 13/04. Предохранительная фрикционная муфта / М.П. Шишкарев (СССР). – № 3475963/25–27; заявл. 28.07.82; опубл. 23.11.83. Бюл. № 43. – 6 с.: ил.

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

7. Шишкарев, М. П. Функциональные связи между характеристиками предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 8-10.

8. 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.

9. Фокин, А. Е. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения / А. Е. Фокин, М. Д. Гавриленко, М. П. Шишкарев // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11. – № 1 (52). – С. 49-56.

10. Шишкарев, М. П. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М.П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 10. – С. 40-46.

11. Шишкарев, М. П. Анализ способов настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2009. – № 8. – С. 29–32.

12. Шишкарев, М. П. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М. П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 5. – С. 33-38.

Поступила в редколлегию 22.03.2021 г.