

УДК 621.838.222

М. П. Шишкарев, д-р техн. наук, проф.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, РФ

Тел.: 8 (908)-193-33-93; E-mail: shishkarev_m_p@mail.ru**ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БАЗОВОГО ВАРИАНТА АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ**

В статье приведены результаты исследования номинальной нагрузочной способности адаптивной фрикционной муфты второго поколения базового варианта. Показано, что адаптивная фрикционная муфта второго поколения (базовый вариант) может передавать более высокую, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, нагрузку при одинаковом числе пар трения. При увеличении коэффициента усиления муфты со всеми ведущими парами трения уменьшается предельное число пар трения основной фрикционной группы, при котором муфта обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, вращающий момент, коэффициент трения, коэффициент усиления, нагрузочная способность, поколение, фрикционная группа.

M. P. Shishkarev**OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE BASIC VERSION ADAPTIVE FRICTION CLUTCH OF THE SECOND GENERATION**

The article presents the results of a study of the rated load capacity of the basic version of the adaptive friction clutch of the second generation. It is shown that the adaptive friction clutch of the second generation (the basic version) can transmit a load higher than the safety friction clutch of the usual actuation accuracy with the same number of friction pairs. With an increase in the coupling gain with all leading friction pairs, the limiting number of friction pairs of the main friction group decreases, at which the coupling has a higher load capacity compared to the safety friction clutch of the usual actuation accuracy.

Keywords: adaptive friction clutch, torque, friction coefficient, gain, load capacity, generation, friction group.

1. Введение. Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) применяются на практике как устройства, предохраняющие узлы и детали машин от чрезмерных перегрузок вращающим моментом [1]. Повышенная стабильность предельного вращающего момента, ограничиваемого АФМ, позволяет не только надежно защищать от поломок элементы приводов машин, но и оптимизировать их массогабаритные параметры [2]. Благодаря этому использование АФМ создает определенные преимущества при защите деталей и узлов от разрушения и при экономии средств, затрачиваемых на изготовление машин.

Повышенная стабильность нагрузки, передаваемой АФМ, достигается за счет введения в ее конструкцию управляющего устройства (УУ) обратной связи, благодаря которому нестабильность коэффициента трения компенсируется при перегрузках посредством автоматического изменения усилия прижатия друг к другу пар трения [3].

Действие отжимной силы на пары трения уменьшает нагрузку, передаваемую АФМ, поэтому для обеспечения необходимой нагрузочной способности муфты требуется увеличение либо силы натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин), либо числа пар трения, либо их радиальных габаритных размеров. В любом из перечисленных случаев происходит увеличение габаритных размеров и массы АФМ.

АФМ второго поколения (базовый вариант) отличается от АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера [4]) введением в конструкцию дополнительной фрикционной группы, которая не охвачена обратной связью [5]. Основная фрикционная группа, как и в АФМ первого поколения, охвачена обратной отрицательной связью и не

претерпела каких-либо изменений.

Вследствие наличия в конструкции АФМ второго поколения (базовый вариант) фрикционной группы, не охваченной обратной связью, нагрузочная способность муфты выше, чем АФМ первого поколения. Точность срабатывания АФМ второго поколения (базовый вариант) также выше, чем точность срабатывания АФМ первого поколения, поскольку значение отжимной (распорной) силы, действующей на пары трения и отнесенной к единице изменения величины коэффициента трения, выше, чем у АФМ первого поколения.

Цель исследования. Оценка номинальной нагрузочной способности базового варианта АФМ второго поколения.

Задачи исследования. 1. Постановка условия более высокой номинальной нагрузочной способности АФМ второго поколения (базовый вариант) по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания [4]. 2. Исследование влияния числа пар трения основной фрикционной группы (ОФГ) на соотношение номинальной нагрузочной способности АФМ второго поколения (базовый вариант) и предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания. 3. Исследование влияния компоновочной схемы ОФГ АФМ второго поколения (базовый вариант) на номинальную нагрузочную способность.

2. Основное содержание и результаты работы

Вполне естественно, что сравнение нагрузочной способности АФМ второго поколения (базовый вариант) и предохранительной фрикционной муфты, обладающей обычной точностью срабатывания, необходимо производить при одинаковом числе пар трения фрикционных групп.

Под предохранительной фрикционной муфтой с обычной точностью срабатывания будем понимать муфту без устройства обратной связи, в которой предельное значение вращающего момента прямо пропорционально величине коэффициента трения.

В АФМ второго поколения (базовый вариант) в качестве пар трения, упомянутых выше, будем считать пары трения основной фрикционной группы.

Рассмотрим принципиальную схему АФМ второго поколения (базовый вариант), которая показана на рис. 1. Муфта состоит из полумуфт 1 и 2, которые связаны между собой двумя пакетами фрикционных дисков: диски 3 и 4 образуют основную фрикционную группу (ОФГ), а нажимной диск 5 и диск трения 6 – дополнительную фрикционную группу (ДФГ).

В варианте АФМ, показанном на рис. 1, ОФГ выполнена по схеме дифференциации пар трения типа «ведущие пары – ведомые пары» [6]. Это реализовано в схеме благодаря тому, что упорный диск 7, жестко закрепленный на ступице полумуфты 1, непосредственно передает нагрузку на смежный с ним диск 4, кото-

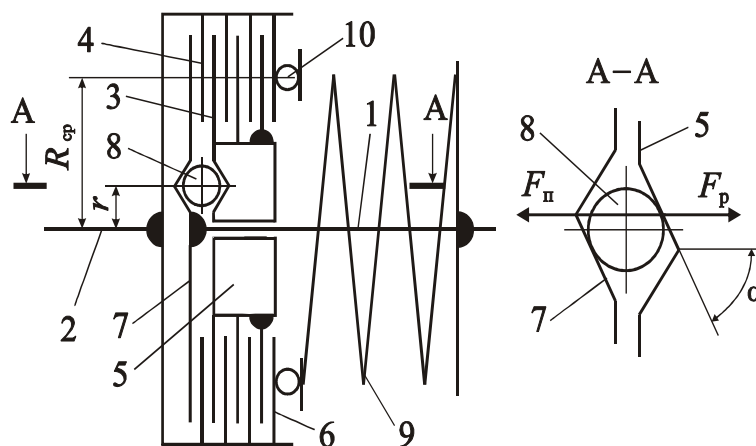


Рисунок 1. Принципиальная схема АФМ второго поколения (базовый вариант).

рый связан с барабаном полумуфты 2. Остальная часть нагрузки в ОФГ передается дисками 3, связанными со ступицей нажимного диска 5, на диски 4.

Нажимной диск 5 лишен непосредственной кинематической связи в окружном направлении со ступицей полумуфты 1. Передача вращающего момента от полумуфты 1 на нажимной диск осуществляется посредством тел качения 8, расположенных в гнездах с наклонными боковыми стенками (рис. 1, сечение А-А). Гнезда выполнены на взаимно-обращенных торцевых поверхностях нажимного и упорного дисков.

Силовое замыкание дисков трения ОФГ и ДФГ осуществляется при помощи пружины 9, поставленной в муфту с предварительным натяжением. Усилие пружины на фрикционные диски передается через упорный подшипник 10.

Формула для вычисления предельного вращающего момента (момента срабатывания) АФМ имеет следующий вид [5]:

$$T_{\text{п}} = F_{\text{п}} R_{\text{ср}} f \frac{z+1-Cf}{1+(z-1)Cf}, \quad (1)$$

где $F_{\text{п}}$ – сила натяжения пружины 9; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус поверхностей трения дисков ОФГ и ДФГ; f – коэффициент трения между фрикционными дисками ОФГ и ДФГ; z – число пар трения ОФГ; C – коэффициент усиления (КУ) обратной связи:

$$C = \frac{R_{\text{ср}}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

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

Согласно рекомендациям, изложенным в работе [5], по условию достижения наибольшей точности срабатывания число пар трения ДФГ в формуле (1) принято равным единице.

Значение предельного вращающего момента предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания вычисляется по формуле [4]:

$$T_{\text{п1}} = z_1 F_{\text{п}} R_{\text{ср}} f, \quad (2)$$

где z_1 – число пар трения фрикционной группы муфты.

Согласно принятому выше условию должно выполняться условие $z = z_1$. Значения остальных параметров сравниваемых объектов приняты одинаковыми.

Подставляя в предполагаемое неравенство $T_{\text{п}} > T_{\text{п1}}$ правые части равенств (1) и (2) и решая неравенство

$$-Cfz^2 + Cfz + (1-Cf) > 0, \quad (3)$$

относительно неизвестного z , находим следующие корни эквивалентного квадратного уравнения:

$$z_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{4/(Cf) - 3}}{-2}. \quad (4)$$

Для нахождения решений, удовлетворяющих неравенству (3), исследуем дискриминант в корнях (4). Для этого примем в качестве коэффициента трения его минимальное значение f_{min} , которое соответствует номинальному вращающему моменту АФМ и предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания [7]. Другие значения коэффициента трения не будут приняты во внимание, поскольку они

соответствуют режиму перегрузки муфт.

Исследуем возможность выполнения следующего условия:

$$\frac{4}{Cf_{\min}} - 3 \geq 0. \quad (5)$$

Для оценки возможности выполнения условия (5) зададим дополнительное условие, которое заключается в необходимости ограничения значений КУ C в соответствии с принятой конструктивно-компоновочной схемой АФМ. Указанное ограничение имеет следующий вид [5]:

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}}, \quad (6)$$

где f_{\max} – максимальный коэффициент трения.

Подставив правую часть соотношения (6) (при условии равенства) в формулу (5), получаем:

$$4 \geq 3 \frac{f_{\min}}{f_{\max}}. \quad (7)$$

Соотношение (7) выполняется даже в форме неравенства, поскольку справедливо неравенство $f_{\min} < f_{\max}$. Следовательно, при выполнении условия (6) дискриминант в формуле (4) положителен. Соответственно этому множество решений, удовлетворяющих неравенству (3), принадлежит следующему интервалу:

$$z \in \left(\frac{-1 + \sqrt{4/(Cf - 3)}}{-2}; \frac{-1 - \sqrt{4/(Cf - 3)}}{-2} \right). \quad (8)$$

В выражении (8) левая часть в скобках отрицательная, поскольку при указанном выше ограничении значения КУ справедливо следующее неравенство:

$$\frac{4}{Cf - 3} > 1.$$

Следовательно, нижняя граница интервала значений z равна нулю.

Верхняя граница интервала зависит от значений f_{\min} и C , т. е. от значения коэффициента трения f_{\max} .

Обозначим

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = m,$$

где m – относительная ширина интервала изменения коэффициента трения.

С учетом введенного обозначения верхнее граничное значение интервала запишем как

$$z_{\max} = \frac{1 + \sqrt{4m - 3}}{2}. \quad (9)$$

График зависимости (9) показан на рис. 2 (кривая 1). При построении графика принято $f_{\min} = 0,1$. В скобках на графике указаны значения КУ C , соответствующие значениям m и вычисленные по формуле (6) (в форме равенства).

График показывает, что с увеличением ширины интервала значений коэффициента трения увеличивается и параметр z_{max} . Это означает, что при $z \leq z_{max}$ АФМ второго поколения (базовый вариант) обладает большей нагрузочной способностью, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, имеющая такое же число фрикционных пар, что ОФГ исследуемой АФМ.

Наоборот, при $z > z_{max}$ АФМ второго поколения (базовый вариант) может передавать меньший, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, предельный вращающий момент.

Рассмотрим случай, когда АФМ второго поколения (базовый вариант) и предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания работают при повышенном (по сравнению со значением f_{min}) коэффициенте трения. В данном случае значение коэффициента относительной ширины интервала m становится меньше, чем его исходное значение f_{min} , что, вероятно, повлияет на значение параметра z_{max} .

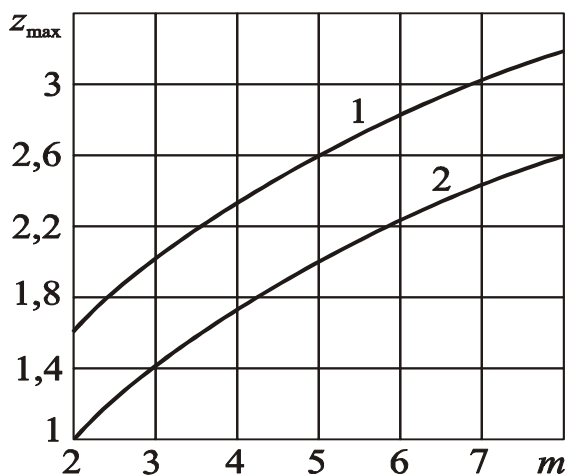


Рисунок 2. Зависимости максимального числа пар трения ОФГ от коэффициента m

(кривая 1). В скобках по оси абсцисс отложены значения коэффициента трения, при которых происходит срабатывание муфты.

График показывает, что при всех значениях коэффициента трения, превышающих f_{min} , нагрузочная способность АФМ второго поколения (базовый вариант) выше, чем предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, если число пар трения ОФГ не превышает значения, отмеченного кривой 1 на рис. 3.

График также показывает, что с уменьшением m , т. е. с увеличением коэффициента трения, при котором происходит срабатывание АФМ, требуется меньшее число пар трения ОФГ для того чтобы ее нагрузочная способность была больше, чем предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания при тех же условиях.

Если срабатывание муфты происходит при максимальном значении коэффициента трения, то АФМ второго поколения (базовый вариант) должна иметь только одну пару трения ОФГ для того чтобы ее нагрузочная способность была выше, чем предо-

График зависимости $z_{max}(m)$ для указанного случая приведен на рис. 3

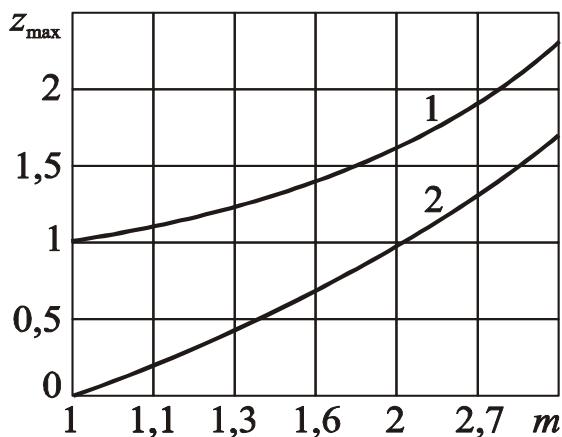


Рисунок 3. Зависимости максимального числа пар трения ОФГ от коэффициента m при повышенном коэффициенте трения

хранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания.

Если конструктивно-компоновочная схема АФМ второго поколения (базовый вариант) построена по типу «все пары трения ведущие», то формула для определения предельного вращающего момента имеет следующий вид:

$$T_{\text{п}} = F_{\text{п}} R_{\text{ср}} f \frac{z+1-Cf}{1+zCf}. \quad (10)$$

Поставив условие, аналогичное указанному выше, и учитывая соотношение (10), получаем следующее неравенство:

$$z^2 Cf < 1 - Cf. \quad (11)$$

Неравенство (11) выполняется при следующих значениях z_{max} :

$$z_{\text{max}} < \sqrt{\frac{1}{Cf_{\text{min}}} - 1},$$

или, с учетом ограничения максимального значения КУ,

$$z_{\text{max}} < \sqrt{m-1}. \quad (12)$$

График зависимости $z_{\text{max}}(m)$, построенный с использованием формулы (12), показан на рис. 2 кривой 2.

Сопоставление кривых 1 и 2 на рис. 2 показывает, что АФМ со всеми ведущими парами трения ОФГ должна иметь более жесткие ограничения максимального числа пар трения данной фрикционной группы для обеспечения более высокой нагрузочной способности по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания.

Что касается соотношения нагрузочной способности АФМ со всеми ведущими парами трения ОФГ и предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания при значении коэффициента трения, отличающимся от значения f_{min} , соответствующий график показан на рис. 3 (кривая 2).

Данный график показывает следующее:

– ограничение максимального числа пар трения ОФГ у АФМ со всеми ведущими парами трения более жесткие, чем у АФМ с дифференцированными парами трения (кривая 1), при всех значениях коэффициента трения;

– начиная со значения коэффициента трения $f=0,4$, АФМ со всеми ведущими парами трения ОФГ не имеет преимуществ по нагрузочной способности по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания.

Теоретическое обоснование полученных результатов

С уменьшением КУ C (см. рис. 2) уменьшается и распорная сила, возникающая между телами качения 8 и нажимным диском 5 (рис. 1). При увеличении коэффициента трения это резко повышает силу трения между фрикционными дисками ОФГ и ее

нагрузочную способность.

Доля вращающего момента, приходящаяся на каждую пару трения ОФГ, также возрастает, поэтому увеличивается и отношение величины нагрузки, передаваемой одной парой трения, к нагрузке пары трения «нажимной диск 5 – диск трения 6».

Последняя из упомянутых пар трения эквивалентна по величине передаваемой нагрузки паре трения в предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания, следовательно, может быть увеличено число пар трения ОФГ, связанных с нажимным диском 5, и общее число пар трения ОФГ при величине распорной (отжимной) силы устройства обратной связи, обеспечивающей более высокую нагрузочную способность АФМ второго поколения (базовый вариант) [11].

Если АФМ выполнена со всеми ведущими парами трения ОФГ, распорная (отжимная) сила будет больше, чем в варианте муфты с дифференцированными парами трения ОФГ, следовательно, нагрузочная способность пар трения ОФГ снижается. В этом случае уменьшается и предельное число пар трения ОФГ (по отношению к АФМ с дифференцированными парами трения ОФГ), за счет которых данный вариант АФМ способен передавать нагрузку, более высокую, чем нагрузка предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания (рис. 2, кривая 2).

При увеличении коэффициента трения предельный вращающий момент АФМ увеличивается согласно соотношениям (1) и (10). Следовательно, возрастает и распорная (отжимная) сила УУ, что приводит к ограничению передаваемой нагрузки, которую без буксования может передавать каждая пара трения ОФГ [12].

В предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания распорная сила отсутствует, поэтому ограничение передаваемой нагрузки связано только с числом пар трения и значением коэффициента трения.

По отношению к АФМ с дифференцированными парами трения ОФГ ограничение числа пар трения указанной фрикционной группы в АФМ со всеми ведущими парами трения при увеличении коэффициента трения носит тот же характер. Разница заключается в том, что при значениях $f \geq 0,4$ муфта не имеет преимуществ по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания с точки зрения нагрузочной способности. Это представляется положительным обстоятельством, поскольку означает меньшие перегрузки при увеличении коэффициента трения.

АФМ второго поколения (базовый вариант) может иметь значение КУ C , меньшее, чем значение отношения $1/f_{\max}$. В формулах (9) и (12) это означает более высокое значение коэффициента m и, как следствие, увеличение предельного значения параметра z_{\max} . Это объясняется уменьшением распорной силы и соответствующим увеличением нагрузочной способности пар трения ОФГ. Однако в данном случае уменьшается точность срабатывания АФМ.

Обсуждение и результаты.

Установлена возможность АФМ второго поколения (базовый вариант) передавать более высокую, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, нагрузку при одинаковом числе пар трения последней и ОФГ.

Результаты исследования показали, что более высокая нагрузочная способность АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения ОФГ, по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания, может быть достигнута при увеличении коэффициента трения до определенного значения и при более жестких ограничениях числа пар трения ОФГ.

Увеличение КУ АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения уменьшает предельное число пар трения ОФГ, при котором муфта обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

Результаты исследования могут быть использованы в практике расчета и проектирования, а также при эксплуатации АФМ второго поколения (базовый вариант) в тех случаях, когда при заданной нагрузке, которую должна передавать предохранительная муфта, необходима повышенная точность ограничения нагрузки.

3. Заключение.

1. В отличие от АФМ первого поколения АФМ второго поколения (базовый вариант) может передавать более высокую, чем предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания, нагрузку при одинаковом числе пар трения последней и ОФГ АФМ.

2. Увеличение ширины интервала изменения коэффициента трения приводит к увеличению числа пар трения ОФГ АФМ, при котором она обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

3. При числе пар трения ОФГ АФМ, не превышающем определенного установленного значения, ее нагрузочная способность при повышенном значении коэффициента трения больше, чем нагрузочная способность предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания.

4. С увеличением коэффициента трения нагрузочная способность АФМ выше, чем нагрузочная способность предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, при меньшем числе пар трения ОФГ.

5. При максимальном коэффициенте трения более высокая нагрузочная способность АФМ, по сравнению с нагрузочной способностью предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, достигается только при одной паре трения ОФГ.

6. Для достижения более высокой нагрузочной способности, по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания, АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения ОФГ должна иметь более жесткие, чем АФМ с дифференцированными парами трения, ограничения по числу пар трения ОФГ.

7. При увеличении коэффициента трения до определенного значения АФМ второго поколения (базовый вариант) со всеми ведущими парами трения ОФГ не имеет преимуществ по нагрузочной способности по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания.

8. При увеличении КУ АФМ со всеми ведущими парами трения уменьшается предельное число пар трения ОФГ, при котором муфта обладает более высокой нагрузочной способностью по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения / М. П. Шишкарев // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
2. Шишкарев, М. П. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбини-

рованной обратной связью / М. П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 9. – С. 25–32.

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

4. 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.

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

6. 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.

7. Шишкарев, М. П. Оптимальный способ настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2006. – № 3. – С. 16–19.

8. Шишкарев, М. П. Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев. – Ростов н/Д.: ГОУ Рост. гос. акад. с-х. машиностроения, 2008. – 148 с.

9. 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.

10. Шишкарев, М. П. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М.П. Шишкарев, А. Ю. Угленко / Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14. – № 1 (76). – С. 200–203.

11. Шишкарев, М. П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 2. – С. 42–44.

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

Поступила в редколлегию 31.01.2023 г.