

УДК 621.825.54

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМИ ПАРАМИ ТРЕНИЯ

А.Е. ФОКИН, М.Д. ГАВРИЛЕНКО, М.П. ШИШКАРЕВ

(Институт энергетики и машиностроения Донского государственного технического университета)

На основе анализа многодисковой адаптивной фрикционной муфты конструкции Н.Д. Вернера была решена задача повышения точности срабатывания муфты без внесения существенных изменений в ее конструкцию.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, обратная связь, коэффициент усиления, коэффициент трения.

Введение. Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) оснащены одним или двумя устройствами обратной связи, что позволяет автоматически регулировать величину силы прижатия друг к другу пар трения в зависимости от изменяющегося в процессе эксплуатации значения коэффициента трения [1, 2]. Это повышает стабильность вращающего момента муфты при возникающих перегрузках [3]. Таким образом, АФМ обеспечивают более эффективную, чем предохранительные муфты обычной точности срабатывания других типов [4], защиту элементов привода машин от перегрузок и последующих разрушений.

Базовой моделью АФМ является муфта Н.Д. Вернера [4], в конструкции которой был впервые реализован принцип автоматического регулирования с помощью управляющего устройства (УУ) отрицательной обратной связи [5]. По конструктивно-компоновочной схеме муфта выполнена с дифференцированными (разделенными) парами трения фрикционной группы [4]. Принцип дифференциации заключается в том, что часть полного вращающего момента муфты передается между полумуфтами непосредственно парами трения, остальная часть – комбинированным способом, за счет чувствительных элементов УУ и сил трения, возникающих между фрикционными дисками.

Известные конструкции и проведенные исследования АФМ данного типа предполагают выполнение всех пар трения в виде одинакового сочетания фрикционных материалов [4].

Если применить в составе АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения различные сочетания материалов для ведущих и ведомых пар трения, то можно предположить влияние ведомой фрикционной группы на величину распорной силы и, в конечном счете, на точность срабатывания муфты. Данное предположение основано на том, что триботехнические характеристики неодинаковых сочетаний материалов пар трения – расчетное значение коэффициента трения, характер и величина его изменения (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения) также неодинаковы.

Решение задачи. Объект исследования – АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения – показан на рис.1.

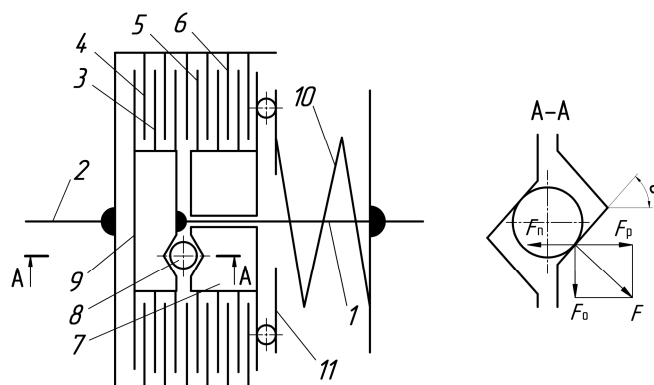


Рис.1. Принципиальная схема АФМ первого поколения

Полумуфты 1 и 2 связаны между собой пакетом фрикционных дисков 3–6. Диски 5 соединены со ступицей нажимного диска 7 и имеют возможность перемещения относительно него в осевом направлении. Нажимной диск лишен кинематической связи с полумуфтой 1 в окружном направлении. Диски 4 и 6 соединены аналогичным способом с барабаном полумуфты 2.

УУ обратной связи состоит из тел качения 8, которые размещены в гнездах переменной глубины, выполненных в нажимном диске 7 и в упорном диске 9, жестко закрепленном на ступице полумуфты 1 (см. рис.1, сечение А–А).

Силовое замыкание пакета дисков 3–6 осуществляется нажимной пружиной 10, поставленной в муфту с предварительным натяжением. Сила отдачи пружины передается на нажимной диск посредством упорного подшипника 11, что позволяет снизить силу трения между пружиной и нажимным диском.

Первоначальный крутящий момент, недостаточный для возбуждения задающего воздействия (распорной силы) в УУ, АФМ передает с помощью ведущей фрикционной группы 3–4 в режиме работы предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания. При росте нагрузки упорный диск 9 и фрикционные диски 3 сместятся относительно нажимного диска 7 и фрикционных дисков 5 на некоторый угол до тех пор, пока не произойдет заклинивание распорных элементов 8 между стенками гнезд. В передаче вращающего момента начнет участвовать ведомая фрикционная группа, в результате чего возникнет распорная сила F_p (см. рис. 1, сечение А–А), которая ослабляет действие пружины 10 и регулирует момент трения между фрикционными дисками. Муфта начнет работать в адаптивном режиме.

Пропорционально увеличению нагрузки и величины коэффициента трения будет расти распорная сила. Этот процесс протекает до тех пор, пока сила нормального давления между поверхностями трения станет недостаточной для возбуждения момента трения, и АФМ начнет буксовать.

Согласно поставленному условию, рассматриваемая АФМ выполнена в многодисковом исполнении как ведущей фрикционной группы, представленной упорным диском 9 и фрикционными дисками 3 и 4, так и ведомой фрикционной группы, состоящей из нажимного диска 7 и фрикционных дисков 5 и 6. Пары трения ведущей и ведомой фрикционной группы выполнены из материалов с различными средними коэффициентами трения и с различным характером их изменения при эксплуатации. В соответствии с этим при исследовании будем рассматривать две автономные фрикционные группы с обособленными характеристиками.

Суммарный вращающий момент T , передаваемый муфтой, складывается из моментов ведущей и ведомой фрикционных групп:

$$T = T_1 + T_2, \quad (1)$$

где T_1 – момент, передаваемый ведущей фрикционной группой; T_2 – момент, передаваемый ведомой фрикционной группой.

Момент T_1 определяется по формуле:

$$T_1 = R_{cp} f_1 z_1 N, \quad (2)$$

где N – величина нормального давления между фрикционными дисками; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков; f_1 – коэффициент трения между парами ведущей фрикционной группы; z_1 – число пар трения ведущей фрикционной группы.

Величина силы нормального давления между фрикционными дисками равна:

$$N = F_{\Pi} - F_p, \quad (3)$$

где F_{Π} – сила натяжения пружины; F_p – распорная (отжимная) сила, возникающая между телами качения 8, нажимным 7 и упорным 9 дисками.

Подставим правую часть выражения (3) в формулу (2), в результате чего получим:

$$T_1 = R_{cp} f_1 z_1 (F_{\Pi} - F_p). \quad (4)$$

Так как момент, поступающий на ведомую фрикционную группу от ведущей фрикционной группы, передается с помощью механизма УУ, то можно записать:

$$T_2 = F_o r, \quad (5)$$

где F_o – окружная сила, возникающая на распорных элементах 8 (см. рис.1, сечение А-А); r – радиус окружности, на которой расположены тела качения.

Момент T_2 , который способна передать ведомая фрикционная группа, определяется по формуле:

$$T_2 = R_{cp} f_2 z_2 (F_{II} - F_P), \quad (6)$$

где z_2 – число пар поверхностей трения ведомой фрикционной группы; f_2 – коэффициент трения между парами ведомой фрикционной группы.

Для того чтобы ведомая фрикционная группа передавала момент, должно выполняться условие равновесия между моментом, передаваемым УУ, и моментом, который способна передать ведомая фрикционная группа, т.е.

$$F_o r = R_{cp} f_2 z_2 (F_{II} - F_P). \quad (7)$$

Подставим выражения (4) и (5) в соотношение (1), в результате чего получим:

$$T = R_{cp} f_1 z_1 (F_{II} - F_P) + F_o r. \quad (8)$$

Подставим выражение (7) в соотношение (1). После преобразования получим выражение для вращающего момента АФМ:

$$T = R_{cp} (f_1 z_1 + f_2 z_2) (F_{II} - F_P). \quad (9)$$

Из схемы действия сил, показанной на рис.1, найдем:

$$F_o = \frac{F_P}{\tan \alpha}, \quad (10)$$

где α – угол наклона стенок гнезд переменной глубины.

Подставив правую часть соотношения (10) в (7) и решив составленное уравнение относительно неизвестного члена F_P , получим:

$$F_P = z_2 F_{II} \frac{f_2}{1 + z_2 C f_2}, \quad (11)$$

где C – коэффициент усиления (КУ) обратной связи:

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

Подставим выражение (11) в формулу (9). После преобразования получим:

$$T = F_{II} R_{cp} \frac{z_1 f_1 + z_2 f_2}{1 + z_2 C f_2}. \quad (12)$$

Структура формулы (12) сходна со структурой формулы для вычисления величины вращающего момента АФМ с одинаковым сочетанием материалов всех пар трения [4]:

$$T_{II} = z F_{II} R_{cp} \frac{f}{1 + (z-1) C f}, \quad (13)$$

где z – общее число пар трения фрикционной группы; f – коэффициент трения между фрикционными парами указанного варианта АФМ.

Точность срабатывания АФМ характеризуется коэффициентом точности K_T , который вычисляется как отношение максимальной величины вращающего момента, при котором может сработать муфта, к минимальной величине вращающего момента [4]. Максимальный и минимальный вращающие моменты соответствуют максимальному и минимальному значениям коэффициента трения. На основании этого и с учетом формулы (12) запишем:

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

где $f_{1,2\min}$, $f_{1,2\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения, которые в различные периоды времени может принимать коэффициент трения соответственно для пар трения ведущей и ведомой фрикционных групп.

При исследовании в качестве рабочей гипотезы примем предположение о том, что вектор изменения величин коэффициентов трения f_1 и f_2 одинаков в результате воздействия на пары трения различных случайных факторов [7].

Поскольку, согласно поставленному условию, средние значения коэффициентов трения f_1 и f_2 неодинаковы, будем считать, что и величины однонаправленных изменений их под воздействием одних и тех же случайных факторов неодинаковы. Будем считать, что ведущие и ведомые пары трения АФМ работают в одинаковых условиях.

Поскольку различные сочетания материалов пар трения неодинаково реагируют на изменение условий эксплуатации и связанное с этим действие случайных факторов, вызывающих соответствующее изменение величины коэффициента трения относительно его исходного значения, рассмотрим следующие возможные случаи:

- средний коэффициент трения ведущих пар больше, чем средний коэффициент трения ведомых пар;
- средний коэффициент трения ведомых пар больше, чем средний коэффициент трения ведущих пар;
- увеличение коэффициента трения ведущих пар больше, чем увеличение коэффициента трения ведомых пар;
- увеличение коэффициента трения ведущих пар меньше, чем увеличение коэффициента трения ведомых пар.

При наступлении каждого из перечисленных случаев в отдельности соотношение предельных величин вращающих моментов, передаваемых ведущими и ведомыми парами трения, будет изменяться. Поскольку, согласно соотношению (6), величина силы F_p зависит от величины вращающего момента, передаваемого ведомыми парами трения, и влияет на точность срабатывания АФМ, в указанных случаях, очевидно, произойдет изменение точности срабатывания муфты.

Исследуем, в связи с этим, влияние различных соотношений величин коэффициентов трения, которые они могут принимать для ведущих и ведомых пар трения в отдельности, на точность срабатывания АФМ. Для этого введем коэффициент, характеризующий отношение величин коэффициентов трения $f_{1\max}$ и $f_{2\max}$, т.е.

$$n = \frac{f_{2\max}}{f_{1\max}}. \quad (15)$$

Необходимо отметить, что различные сочетания материалов пар трения дают различные значения минимального коэффициента трения. В соответствии с этим введем коэффициент, выражающий отношение величин коэффициентов трения $f_{1\min}$ и $f_{2\min}$, т.е.

$$p = \frac{f_{2\min}}{f_{1\min}}. \quad (16)$$

Разделим числитель и знаменатель в соотношении (14) на $f_{1\max}$ и на $f_{1\min}$. В результате получаем, учитывая соотношения (15) и (16):

$$K_T = \frac{(z_1 + z_2 n)(1 + z_2 C p f_{1\min})m}{(z_1 + z_2 p)(1 + z_2 C n f_{1\max})}, \quad (17)$$

где $m = f_{1\max} / f_{1\min}$ – ширина интервала изменения величины коэффициента трения ведущих пар.

Коэффициенты n и p – параметры переменные, поскольку переменными считаем параметры $f_{1\min}$, $f_{1\max}$, $f_{2\min}$ и $f_{2\max}$. Коэффициент m – величина также переменная. Данное условие принято в связи с тем, что рассматриваются различные сочетания материалов пар трения как для ведущих, так и для ведомых пар трения. Для конкретных сочетаний материалов ведущих и ведомых пар трения величины указанных коэффициентов трения остаются постоянными.

Аналитический метод исследования функции (17) с помощью определения условий существования ее минимума и убывания функции не дает возможности оценить величину коэффициента точности АФМ по сравнению с величиной коэффициента точности муфты, имеющей одинаковую величину коэффициента трения для всех фрикционных пар. В связи с этим используем графический способ, выбрав в качестве аргумента коэффициент n . Указанный выбор объясняется тем, что данный коэффициент характеризует изменение величины коэффициента трения между парами ведомой фрикционной группы. За счет последней формируется распорная сила УУ обратной связи, от которой зависит точность срабатывания АФМ.

Коэффициенты p и m в соотношении (17) будем считать вспомогательными аргументами, в меньшей степени влияющими на точность срабатывания АФМ, как показывает соотношение (16). Эти коэффициенты понадобятся для построения графиков функции (17) при их соответствующих значениях для оценки влияния последних на точность срабатывания АФМ.

Графики функции $K_T(n)$, построенные по соотношению (17), приведены на рис. 2. Кривая 1 построена при $f_{1\min}=0,1$, $f_{1\max}=0,6$, $m=6$, кривая 2 – при $f_{1\min}=0,14$, $f_{1\max}=0,7$, $m=5$, кривая 3 – при $f_{1\min}=0,16$, $f_{1\max}=0,7$, $m=4,375$, прямая 4 – при $f_{1\min}=0,16$, $f_{1\max}=0,8$, $m=5$. Прямая 5 отражает точность срабатывания АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения и с одинаковыми коэффициентами трения всех пар фрикционной группы, и приведена для сравнения.

При построении всех графиков на рис.2 принято $z_1=2$, $z_2=6$, $C=1,25$. В АФМ с одинаковыми коэффициентами трения всех пар параметр z относится к ведомым парам трения. Прямая 5 построена при $m=6$.

Анализ полученных результатов. Как и предполагалось выше, применение в АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения неодинаковых значений коэффициентов трения ведущих и ведомых пар привело к изменению точности срабатывания муфты по сравнению с аналогичной АФМ, в составе которой все пары трения – ведущие и ведомые – имеют одинаковое значение коэффициента трения. Графики, приведенные на рис.2, показывают:

- практически при всех значениях коэффициента p точность срабатывания исследуемой АФМ уменьшается по мере увеличения коэффициента n (кривые 1–3). Это означает, что применение сочетаний материалов пар трения ведомой фрикционной группы с коэффициентом трения, большим, чем у ведущих пар трения, снижает точность срабатывания муфты;
- наиболее заметное снижение точности срабатывания АФМ имеет место при меньших значениях коэффициента p и при достаточно больших значениях коэффициента n (кривая 1, участок, соответствующий значениям $n=1,2...1,5$);
- увеличение коэффициента p приводит к повышению точности срабатывания муфты (кривые 1–3, прямая 4). Следовательно, для увеличения точности срабатывания АФМ необходимо, чтобы минимальное значение коэффициента трения между ведомыми парами было как можно больше, чем минимальный коэффициент трения между ведущими парами трения;

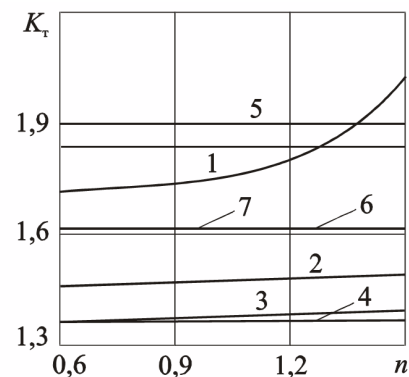


Рис.2. Графики зависимостей $K_T(n)$

– при всех значениях коэффициента p , таких, что $p > 1$, и коэффициента n , кроме $n = 1,5$, точность срабатывания АФМ с неодинаковыми значениями коэффициентов трения ведущих и ведомых пар выше, чем точность срабатывания АФМ с одинаковыми значениями коэффициента трения ведущих и ведомых пар при одинаковой ширине интервала изменения коэффициента трения (рис. 2, парные графики 1–5, 2–6, 3–7).

Графики 5, 6 и 7 (см. рис.2) построены по зависимости [4]:

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

где $f_{\min}$, $f_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения коэффициента трения для рассматриваемого случая. (Обозначения остальных параметров в последней формуле см. выше).

При построении графиков 5, 6 и 7 приняты те же значения параметров C , $m = f_{\max}/f_{\min}$ и z – числа пар трения, связанных с нажимным диском (см. рис. 1).

Аналитическое исследование точности срабатывания АФМ. Графический способ исследования функции (17) показал, что рассматриваемая АФМ имеет при определенных соотношениях триботехнических характеристик пар трения преимущество по точности срабатывания по отношению к АФМ с одинаковыми значениями коэффициента трения всех пар. Однако, как отмечено выше, графический способ не дает решения задачи оптимизации параметров АФМ в целом и триботехнических характеристик пар трения в частности.

В качестве теоретической основы упомянутой оптимизации в инженерных расчетах необходимо в аналитической форме установить либо минимум функции (17), либо (при отсутствии минимума) условия, способствующие ее уменьшению. Для этого найдем первую производную функции (17):

$$D(K_T)_n = \frac{z_2 m (1 + z_2 C p f_{1\min})(z_1 - C f_{1\max})}{(z_1 + z_2 p)(1 + z_2 C n f_{1\max})^2}. \quad (18)$$

Функция (17) минимальная, если ее производная обращается в нуль. На основе этого найдем, что условие обращения в минимум функции должно выполняться, если

$$p = \frac{z_1 - C f_{1\max}}{z_2 C f_{1\min}(C f_{1\max} - z_1)}. \quad (19)$$

Анализ выражения (19) показывает, что для обращения производной в нуль коэффициент p должен быть отрицательным, что противоречит его физическому смыслу (см. выше). Следовательно, функция (17) по аргументу n является возрастающей и минимума не имеет.

Замечание. Указанный вывод сделан при условии, что в соотношении (18) выполняется неравенство:

$$z_1 - C f_{1\max} > 0. \quad (20)$$

Величина КУ C принимается максимальной и ограничена сверху значением [6]:

$$C \leq \frac{1}{z_1 f_{1\max}}.$$

Таким образом, неравенство (20) выполняется в том случае, если

$$\frac{f_{1\max}}{f_{2\max}} < 1. \quad (21)$$

Поскольку рассматриваются различные варианты сочетаний максимальных величин коэффициентов трения ведущих и ведомых пар, то возможен случай, когда неравенство (21) не выполняется. Тогда, согласно соотношению (18), производная функции (17) в соответствии с выражением (19) положительна и увеличение коэффициента n приводит к уменьшению точности сра-

батывания АФМ. Если же неравенство (21) выполняется, то производная отрицательна, т. е. увеличение коэффициента n приводит к повышению точности срабатывания муфты.

Интерпретируя неравенство (21), запишем, с учетом соотношения (15)

$$n > 1.$$

Следовательно, одним из условий высокой точности срабатывания АФМ является большая, чем единица, величина коэффициента n . Наоборот, меньшая, чем единица, величина коэффициента n свидетельствует о более низкой точности срабатывания муфты.

Установим возможность существования минимума функции (17) по аргументу p . Первая производная функции равна:

$$D(K_T)_p = \frac{z_2 m (z_1 + z_2 n) (Cf_{1\min} - z_1)}{(z_1 + z_2 p)^2 (1 + z_2 C n f_{1\max})}. \quad (22)$$

Корень уравнения $z_2 m (1 + z_2 n) (Cf_{1\min} - z_1) = 0$ имеет вид:

$$n = -\frac{1}{z_2},$$

и, очевидно, отрицателен. Это противоречит физическому смыслу коэффициента n , следовательно, минимума функции (17) по аргументу p нет. Производная (22) отрицательна, поскольку:

$$Cf_{1\min} - z_1 = \frac{f_{1\min}}{f_{2\max}} - 1 < 0,$$

следовательно, точность срабатывания АФМ повышается при увеличении коэффициента p .

Выводы. Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что применение в конструкции АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения неодинаковых сочетаний материалов последних дает определенный положительный эффект с точки зрения точности срабатывания муфты. Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании новых конструкций АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения, обладающих более высокой точностью срабатывания при неизменных габаритах и массе.

Библиографический список

1. Есипенко Я.И. и др. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки / Я.И. Есипенко, А.З. Паламаренко, М.К. Афанасьев. – Киев: Техніка, 1972. – 168 с.
2. Шишкарёв М.П. Адаптивные фрикционные муфты. Исследование, конструкции и расчет: науч. изд. / М.П. Шишкарёв. – Ростов н/Д: Изд-во РГАСХМ, 2002. – 228 с.
3. Запорожченко Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания / Р.М. Запорожченко // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – №1. – С.48–52.
4. Поляков В.С. Справочник по муфтам / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш, О.А. Ряховский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. – 352 с.
5. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Особые линейные и нелинейные системы / А.А. Воронов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
6. Шишкарёв М.П. Распределение нагрузки в муфте Н.Д. Вернера и выбор ее параметров / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2001. – №6. – С.8–11.
7. Шишкарёв М.П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – №2. – С.13–15.

Материал поступил в редакцию 07.12.10.

References

1. Esipenko Ya.I. i dr. Mufty povyshennoi tochnosti ograniчениya nagruzki / Ya.I. Esipenko, A.Z. Palamarenko, M.K. Afanas'ev. Kiev: Tehnika, 1972. 168 s. – In Russian.
2. Shishkarev M.P. Adaptivnye frikcionnye mufty. Issledovanie, konstrukcii i raschet: nauch. izd. / M.P. Shishkarev. Rostov n/D: Izd-vo RGASHM, 2002. 228 s. – In Russian.
3. Zaporozhenko R.M. O harakteristikah predohranitel'nyh frikcionnyh muft povyshennoi tochnosti srabatyvaniya / R.M. Zaporozhenko // Izv. vuzov. Mashinostroenie. 1971. №1. S.4852. – In Russian.
4. Polyakov V.S. Spravochnik po muftam / V.S. Polyakov, I.D. Barbash, O.A. Ryahovskii. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1974. 352 s. – In Russian.
5. Voronov A.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Osoby lineinye i nelineinye sistemy / A.A. Voronov. – 2-e izd., pererab. – M.: Energoizdat, 1981. – 304 s. – In Russian.
6. Shishkarev M.P. Raspredelenie nagruzki v mufte N.D. Venera i vybor ee parametrov / M.P. Shishkarev // Vestn. mashinostroeniya. – 2001. №6. – S.811. – In Russian.
7. Shishkarev M.P. Uroven' peregruzki pri srabatyvanii adaptivnyh frikcionnyh muft / M.P. Shishkarev // Vestn. mashinostroeniya. – 2006. №2. S.13-15. – In Russian.

A.E. FOKIN, M.D. GAVRILENKO, M.P. SHISHKAREV

RESEARCH OF ADAPTIVE FRICTION CLUTCH WITH DIFFERENTIATED FRICTION PAIRS

The problem of the clutch operation accuracy increase without introducing material changes into its construction is solved on the ground of N.D. Verner's construction of the adaptive lamellar clutch which friction group consists of disks made from the materials with different friction values.

Key words: adaptive friction clutch, feedback, magnification factor, friction factor.