



УДК 621.838.222

**М.П. Шишкарёв**  
ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет» (ДГТУ)  
г. Ростов-на-Дону, Россия  
E-mail: shishkarevm@mail.ru  
Дата поступления 15.04.2019

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ СО СМЕШАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

### Аннотация

На основе синтезированных структурно-функциональной и принципиальной схем адаптивной фрикционной муфты с положительно-отрицательной обратной связью, действующей в режиме параллельного автоматического регулирования, разработана математическая модель, позволившая исследовать зависимость предельного вращающего момента муфты от коэффициента трения и коэффициента усиления обратной связи.

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, положительно-отрицательная, коэффициент трения, обратная связь, коэффициент усиления, точность срабатывания.

### Введение

В работах [1, 2] приведены результаты исследований адаптивной фрикционной муфты (АФМ) со смешанной отрицательно-нулевой обратной связью. Муфта имеет две фрикционные группы, одна из которых охвачена обратной отрицательной связью по возмущающему воздействию [3] – коэффициенту трения между элементами фрикционных пар. На вторую фрикционную группу обратная связь не действует, т. е. имеет место так называемая «нулевая» обратная связь, и значение ее момента сил трения изменяется прямо пропорционально значению коэффициента трения.

Благодаря этой особенности, как отмечено в указанных работах, точность срабатывания муфты повышается по сравнению с АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера [4]) на 25...30 %.

Исследование показало, что АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью может работать в режиме с положительной обратной связью [3], т. е. когда задающее (усилие пружинного или другого типа замыкателя пар трения) и управляющее воздействия на входе сумматора имеют одинаковые знаки. При этом из работы выключается обратная отрицательная связь, а управляющее воздействие (распорная (отжимная) сила) управляющего устройства (УУ)

муфты становится больше, чем задающее воздействие, при увеличении возмущающего воздействия.

Данный режим работы не характерен для муфт подобного типа, поскольку при ее существующей конструктивно-компоновочной схеме приводит к резкому уменьшению точности срабатывания и может иметь место в том случае, когда значение коэффициента усиления (КУ) обратной отрицательной связи превышает его предельное (максимальное) значение.

Причина данного явления объясняется прогрессирующим увеличением момента сил трения дополнительной фрикционной группы (ДФГ) в результате повышения силы нормального давления на поверхностях трения в условиях роста значения коэффициента трения [2].

Характерной особенностью упомянуто АФМ является комбинированный сигнал на входе сумматора УУ, состоящий из выходного сигнала основной фрикционной группы (ОФГ), охваченной обратной отрицательной связью, и выходного сигнала ДФГ, которая не охвачена обратной связью.

АФМ с обратной отрицательной связью (АФМ первого поколения), а также АФМ с комбинированной обратной связью, включающей обратную отрицательную связь, обладают характерной особенностью

стью, заключающейся в том, что их точность срабатывания повышается с увеличением КУ [4]. В связи с этим ограничение максимального значения КУ в АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью, обусловленное изменением режима работы муфты, приводит к соответствующему ограничению ее максимальной точности срабатывания.

Максимальная точность срабатывания АФМ данного типа в ряде случаев практического применения не отвечает современным требованиям, предъявляемым к устройствам защиты приводов машин от перегрузок.

В работе [5] приведены результаты исследования АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью косвенного регулирования. Входной сигнал УУ обратной отрицательной связи в данной АФМ формируется за счет ДФГ, которая не охвачена обратной связью (т. е. имеет место нулевая обратная связь). Вследствие этого входной сигнал УУ и его выходной сигнал изменяются сильнее при изменении коэффициента трения, что приводит, как показало исследование, к повышению точности срабатывания АФМ.

Как показали расчеты, точность срабатывания исследованной АФМ также недостаточна для того чтобы в ряде случаев практического применения обеспечить надежную защиту деталей и узлов привода машины от выхода их из строя.

Как показали исследования, АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и косвенным регулированием обеспечивает максимальное значение вращающего момента внутри интервала изменения коэффициента трения, исключая его граничные значения. Это достигается при определенных значениях КУ, причем максимальной точностью срабатывания АФМ обладает при значении КУ, близком к предельному. Это свидетельствует о том, что перепад значений максимального вращающего момента и момента, соответствующего одному из граничных значений коэффициента трения, значителен, что говорит о недостаточно высокой точности срабатывания АФМ.

Увеличение выходного сигнала ДФГ

и, соответственно, входного сигнала УУ приводит к более значительному уменьшению момента сил трения ОФГ при определенном увеличении коэффициента трения. Это свидетельствует о том, что значение коэффициента трения, соответствующее максимальному вращающему моменту АФМ, будет смещено в область меньших значений.

Как показали исследования АФМ, нагрузочная характеристика которых имеет максимум внутри интервала изменения коэффициента трения, именно указанное обстоятельство косвенно свидетельствует о более высокой точности срабатывания АФМ.

Изложенное выше является предпосылкой для теоретического обоснования применения принципа косвенного регулирования на основе комбинированной – положительно-отрицательной обратной связи, каждая компонента которой работает с другой компонентой в параллельном режиме.

На основе изложенного, **задача исследования** заключается в синтезе структурно-функциональной и принципиальной схем АФМ с положительно-отрицательной обратной связью параллельного действия с косвенным регулированием, а также установлении зависимостей для определения оптимальных значений параметров обратной связи, позволяющих получить максимальную точность срабатывания муфты.

### Основная часть

Принцип косвенного регулирования предполагает структурную независимость УУ обратной связи и ОФГ. Структурно-функциональная схема АФМ, удовлетворяющая указанной особенности муфты, приведена на рисунке 1. Муфта состоит из двух фрикционных групп – основной (ОФГ) и дополнительной (ДФГ) (все обозначения приведены на схеме). Выходной сигнал ДФГ в форме вращающего момента  $T_2$  поступает в УУ, выходной сигнал которого в форме распорной силы  $F_p(t)$  ( $t$  – время) подается на сумматор сигналов С.

На сумматор также поступает сигнал  $F_n$  – задающее воздействие нажимного

устройства УН. Задающее воздействие необходимо для первоначального возбуждения силы трения между поверхностями

трения ДФГ в те периоды времени, когда нагрузка, передаваемая АФМ, невелика и меньше номинальной нагрузки.

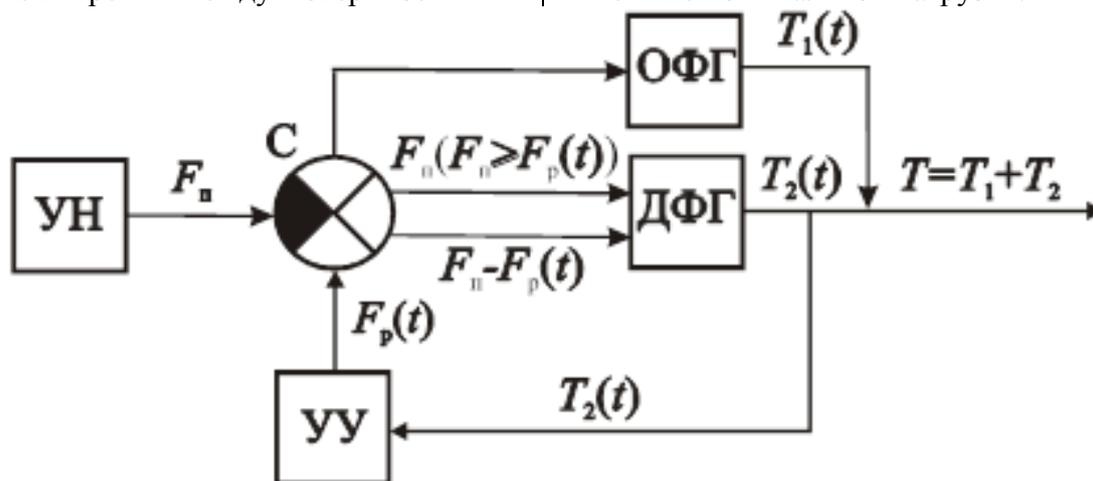


Рисунок 1. Структурно-функциональная схема АФМ со смешанной обратной связью параллельного действия

Входные сигналы  $F_p(t)$  и  $F_n$  имеют одинаковые знаки, в соответствии с чем на выходе сумматора С возможно появление выходного сигнала следующего вида:

–  $F_n$ , если выполняется условие

$$F_n \geq F_p(t).$$

Данное условие выполняется в том случае, когда внешняя (по отношению к АФМ) нагрузка не превышает номинальный вращающий момент муфты, равный ее минимальному вращающему моменту [6];

–  $F_n - F_p(t)$  – во всех остальных случаях.

Выходной сигнал УУ поступает в ОФГ, следовательно, на ОФГ действует обратная отрицательная связь.

Одновременно с этим выходной сигнал УУ поступает в ДФГ, вызывая действие на нее в режиме работы положительной обратной связи. В этом случае выходной сигнал имеет вид  $F_p(t)$  или в эквивалентной форме –  $F_n + \Delta F_p(t)$  (где  $\Delta F_p(t)$  – прирост распорной силы УУ), а данное действие обеспечивается тем же УУ, которое создает обратную отрицательную связь. Таким образом, УУ АФМ по функциональному назначению является комбинированным.

Выходной параметр АФМ – предельный вращающий момент  $T$  – является сум-

мой вращающего момента  $T_2$  и вращающего момента  $T_1$  ОФГ (рис. 1), причем ОФГ не участвует в возбуждении управляющего воздействия  $F_p(t)$ .

В зависимости от значения возмущающего воздействия  $f(t)$ , т. е. коэффициента трения между фрикционными парами ОФГ и ДФГ, изменяются предельный вращающий момент  $T_2$  и управляющее воздействие  $F_p(t)$ , благодаря чему осуществляется автоматическое регулирование предельных значений вращающих моментов  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T$ .

Принципиальная схема АФМ со смешанной обратной связью и косвенным регулированием показана на рис. 2. Муфта состоит из полумуфт 1 и 2, которые кинематически связаны между собой двумя фрикционными группами – ОФГ, содержащей диски трения 3 и 4, и ДФГ, состоящей из фланца нажимного диска 5 и фрикционного диска 6.

Диски 3 смонтированы на стакане 7, который установлен на втулке 8, расположенной на ступице полумуфты 1 и связанной с ней посредством направляющей шпонки 9. Соединение дисков 3 со стаканом 7 осуществляется при помощи шлицев, благодаря чему обеспечивается возмож-

ность их перемещения в осевом направлении.

Диски 4 связаны аналогичным способом с барабаном полумуфты 2.

Нажимной диск 5 установлен на ступице полумуфты 1 с возможностью перемещения относительно нее в окружном и осевом направлениях, а фрикционный диск 6 связан с барабаном полумуфты 2 при помощи способа, аналогичного описанному выше.

Фрикционный диск 6 справа (по рисунку 2) опирается через упорный подшипник 10 на упор 11, жестко закрепленный на ступице полумуфты 1.

Силовое замыкание пар трения ОФГ

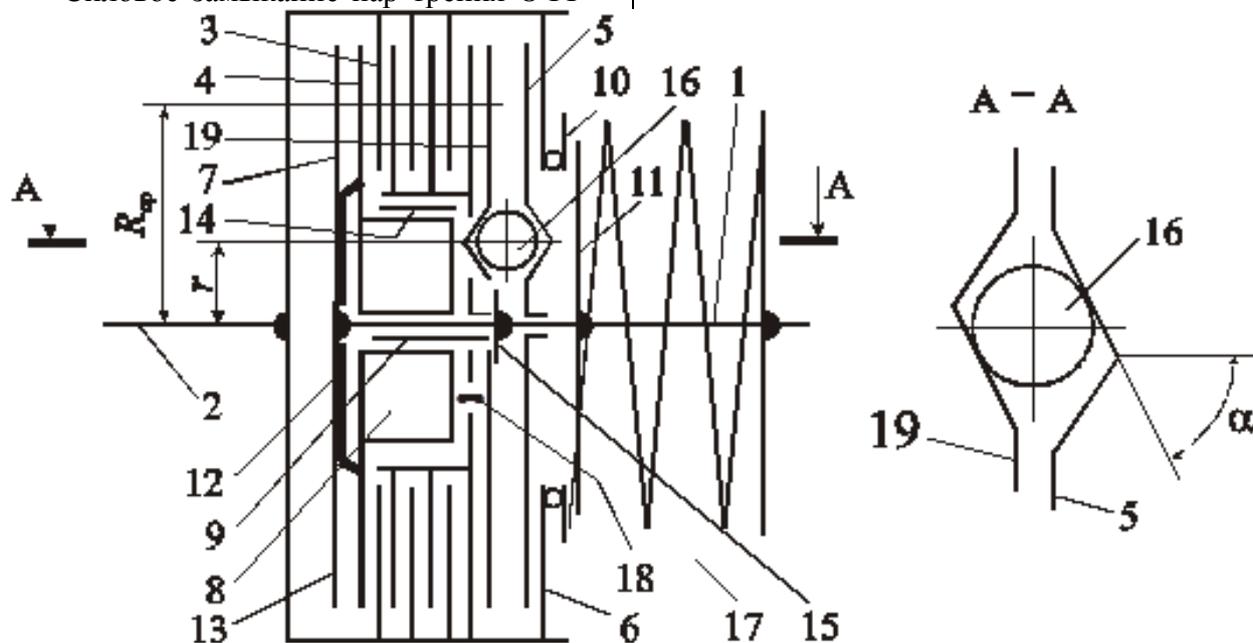


Рисунок 2. Принципиальная схема АФМ со смешанной обратной связью параллельного действия

УУ муфты состоит из тел качения (шариков) 16, которые размещены в гнездах со скошенными боковыми стенками нажимного диска 5 и втулки 8 (рис. 2, сечение А-А).

Для создания первоначального усилия замыкания пары трения ДФГ справа (по рис. 2) ее элементы поджаты пружиной 17, сила натяжения которой передается через упорный подшипник 10.

Толкатели 18 расположены в аксиальных отверстиях фланца стакана 7 между втулкой 8 и ведущим фланцем 19 нажимного диска 5.

Ведущий фланец 19 связан в окружном направлении со ступицей полумуфты 1

осуществляется при помощи тарельчатой пружины 12, расположенной между упорным диском 13, жестко закрепленным на ступице полумуфты 1, и фланцем втулки 8. Пакет дисков трения 3 и 4 в данном случае расположен между фланцем втулки 8 и фланцем стакана 7.

Связь в окружном направлении между стаканом 7 и втулкой 8 осуществляется при помощи направляющей шпонки 14. Справа стакан 7 опирается на упор 15, закрепленный на ступице полумуфты 1, благодаря чему исключается воздействие силы натяжения пружины 12 на элементы ДФГ.

при помощи шпонки 9 и, как и стакан 7, опирается справа (по рис. 2) на упор 15.

Таким образом, силовое замыкание пары трения ДФГ осуществляется как за счет действия пружины (при передаче минимальных нагрузок, когда распорная сила, возникающая в результате действия УУ, меньше силы пружины 17), так и за счет действия распорной силы УУ, если уровень передаваемых нагрузок такой, что распорная сила больше первоначальной силы натяжения пружины 17.

Передача нагрузки между полумуфтами 1 и 2 осуществляется по двум параллельным силовым потокам:

– от полумуфты 1 (в том случае, если

она ведущая) посредством шпонки 9 на втулку 8, затем на стакан 7 при помощи шпонки 14 на диски трения 3, которые за счет сил трения передают нагрузку на диски 4;

– от полумуфты 1 посредством шпонки 9 на втулку 8, затем при помощи шариков 16 – на нажимной диск 5, который посредством сил трения передает нагрузку на фрикционный диск 6, который передает нагрузку на полумуфту 2.

В соответствии с изложенным выше предельный вращающий момент, который без буксования может передавать муфта, определяется по следующей формуле:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{п1}} + T_{\text{п2}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{п1}}$  – предельный вращающий момент, передаваемый парами трения ОФГ;  $T_{\text{п2}}$  – предельный вращающий момент, передаваемый парой трения ДФГ.

Вращающий момент, передаваемый дисками трения ОФГ, определяется по формуле:

$$T_{\text{п1}} = zR_{\text{cp}}f(F_{\text{п1}} - F_{\text{p}}), \quad (2)$$

где  $z$  – число пар поверхностей трения ОФГ;  $R_{\text{cp}}$  – средний радиус поверхностей трения дисков 3 и 4;  $f$  – текущий коэффициент трения;  $F_{\text{п1}}$  – первоначальная сила натяжения пружины 12;  $F_{\text{p}}$  – распорная (отжимная) сила, возникающая на шариках 16 при передаче нагрузки.

Если нагрузка, передаваемая муфтой, такова, что выполняется условие

$$F_{\text{p}} < F_{\text{п2}},$$

где  $F_{\text{п2}}$  – первоначальная сила натяжения пружины 17, то значение предельного вращающего момента, который в данный период времени может передать ОФГ, определяется по формуле:

$$T_{\text{п1}}^* = zR_{\text{cp}}f(F_{\text{п1}} - F_{\text{п2}}). \quad (3)$$

Для указанного периода времени предельный вращающий момент, передаваемый ДФГ, равен

$$T_{\text{п2}}^* = z_1F_{\text{п2}}R_{\text{cp}}f, \quad (4)$$

где  $z_1$  – число пар поверхностей трения ДФГ.

Суммируя, согласно формуле (1), правые части соотношений (3) и (4), находим

выражение для определения полного вращающего момента муфты:

$$T_{\text{п}}^* = R_{\text{cp}}f[zF_{\text{п1}} - (z - z_1)F_{\text{п2}}]. \quad (5)$$

Поскольку приведенное выше соотношение между силами  $F_{\text{p}}$  и  $F_{\text{п2}}$  выполняется не только при передаче небольших внешних (по отношению к муфте) нагрузок, но и при небольших значениях коэффициента трения, величина вращающего момента  $T_{\text{п}}^*$  оказывает существенное влияние на точность срабатывания муфты. Поэтому важным представляется обеспечение наибольшего значения вращающего момента  $T_{\text{п}}^*$ . Это может быть достигнуто следующими независимыми один от другого способами:

– одинаковыми или близкими друг к другу значениями параметров  $z$  и  $z_1$ , при этом должно выполняться неравенство  $z > z_1$ ;

– минимизацией значения силы  $F_{\text{п2}}$ .

В последнем случае минимальное значение силы  $F_{\text{п2}}$  может быть найдено по формуле (5). Учитывая, что, согласно данным работы [6], номинальное значение вращающего момента, передаваемого предохранительной фрикционной муфтой, в том числе АФМ, определяется при настройке муфты по минимальному значению коэффициента трения, заменим в формуле (5) параметр  $T_{\text{п}}^*$  на параметр  $T_{\text{н}}$  ( $T_{\text{н}}$  – номинальный вращающий момент муфты). Произведя математические преобразования, получаем:

$$F_{\text{п2}} = \frac{zF_{\text{п1}}R_{\text{cp}}f_{\text{min}}T_{\text{н}}}{z - z_1}, \quad (6)$$

где  $f_{\text{min}}$  – минимальный коэффициент трения.

Таким образом, при передаче вращающего момента, не превышающего вращающий момент  $T_{\text{н}}$ , распорная сила УУ не должна быть больше, чем сила  $F_{\text{п2}}$ , вычисляемая по формуле (6). Поскольку основная фаза автоматического регулирования в муфте соответствует значениям коэффициента трения  $f_i > f_{\text{min}}$ , представляется целесообразным, чтобы выполнялось равенство

$F_p = F_{n2}$  при передаче вращающего момента  $T_n$ . В этом случае на элементы трения ОФГ будет действовать наибольшая распорная сила  $F_p(t)$ , и автоматическое регулирование становится наиболее эффективным при увеличении коэффициента трения.

При условии  $F_p(t) > F_{n2}$  момент сил трения ОФГ определяется по формуле, которая характерна для режима действия положительной обратной связи [7]:

$$T_{n2} = z_1 R_{cp} f (F_{n2} + F_p). \quad (7)$$

Обозначения параметров, входящих в формулу (7), приведены выше. В формуле (7) учтено, что на элементы трения ДФГ действует та же распорная сила, что и распорная сила, действующая на диски трения ОФГ. Значение параметра  $R_{cp}$  принято одинаковым для поверхностей трения ОФГ и ДФГ.

Величина распорной силы УУ определяется по формуле:

$$F_p = \frac{T_{n2}}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол давления тел качения 16 (см. рис. 2, сечение А-А);  $r$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения

16 (рис. 2).

Подставляя правую часть формулы (8) в уравнение (7) и решая последнее относительно неизвестного  $T_{n2}$ , находим:

$$T_{n2} = z_1 F_{n2} R_{cp} \frac{f}{1 - z_1 C f}, \quad (9)$$

где  $C$  – КУ обратной связи АФМ:

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

Формула (9) записана для тех случаев, когда  $f > f_{\min}$ .

Для определения вращающего момента  $T_{n1}$  необходимо найти выражение для вычисления распорной силы. С этой целью подставим в формулу (8) правую часть соотношения (9) и, произведя математические преобразования, найдем:

$$F_p = z_1 F_{n2} C \frac{f}{1 - z_1 C f}. \quad (10)$$

После подстановки правой части соотношения (10) в формулу (2) находим зависимость предельного вращающего момента ОФГ от коэффициента трения:

$$T_{n1} = z R_{cp} f \left( F_{n1} - z_1 C F_{n2} \frac{f}{1 - z_1 C f} \right). \quad (11)$$

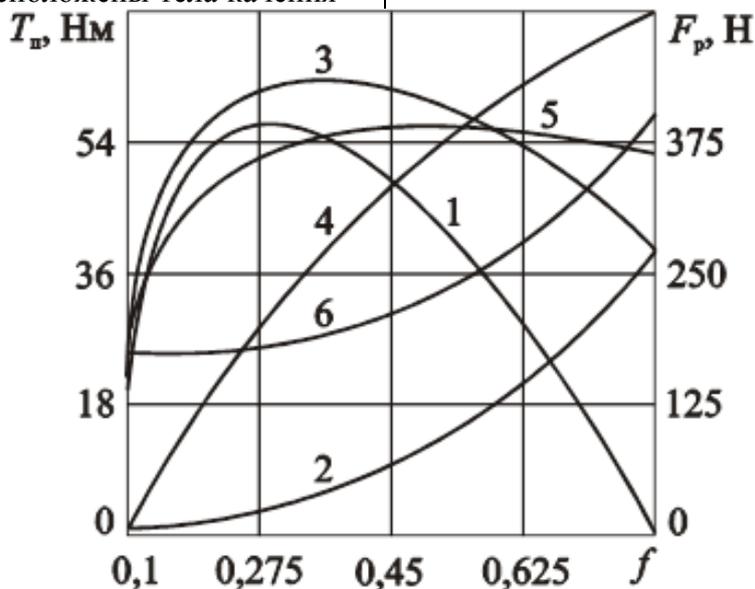


Рисунок 3. Зависимости полного вращающего момента АФМ, его составляющих и распорной силы от коэффициента трения

Графики зависимостей  $T_{n1}(f)$  и  $T_{n2}(f)$  показаны на рис. 3 (соответственно

кривые 1 и 2). Графики построены по следующему значению параметров:  $z=4$ ,  $z_1=1$ ,  $F_{n1}=500$  Н,  $R_{cp}=0,1$  м,  $C=1$ . Значение силы

$F_{n2}$  определялось по формуле (6) и при  $f_{\min}=0,1$  и  $T_{н}=28$  Н·м составило  $F_{n2}=1$  Н.

Для построения графиков минимальное значение силы  $F_{n2}$  было увеличено до 125 Н. В этом случае при максимальном значении коэффициента трения, равном  $f_{\max}=0,8$ , распорная сила  $F_p$  равна силе  $F_{n1}$ , а момент сил трения ОФГ обращается в ноль. Муфта в данном случае передает нагрузку только посредством пар трения ДФГ, а ее предельный вращающий момент становится минимальным при максимальном значении коэффициента трения. Это повышает точность срабатывания АФМ.

Кривая 3 на рис. 3 отражает изменение полного вращающего момента  $T_{н}$  АФМ.

Графики на рис. 3 показывают следующее:

- функция (11) имеет максимум внутри выбранного интервала значений коэффициента трения и обращается в ноль при максимальном значении коэффициента трения;

- изменение значения вращающего момента ДФГ носит линейный характер до значения коэффициента трения  $f_k \approx 0,29$ , затем – нелинейный прогрессирующий характер. Это объясняется тем, что в интервале значений коэффициента трения, равном  $f_{\min} \dots f_k$ , величина распорной силы  $F_p$  (кривая 4) меньше силы  $F_{n2}$  пружины 17 (прямая 5), поэтому в указанном интервале суммарная сила прижатия друг к другу пар трения ОФГ, равная  $F_{n1} - F_{n2}$ , и сила давления между элементами пары трения ДФГ постоянны.

В последнем случае указанная сила давления равна первоначальной силе натяжения пружины 17;

- предельный вращающий момент  $T_{н}$  АФМ, равный сумме вращающих моментов ОФГ и ДФГ, изменяется по закону, аналогичному закону изменения вращающего момента  $T_{n1}$ , и имеет максимальное значение, которое соответствует коэффициенту трения  $f_k$  (кривая 3);

- распорная сила  $F_p$  УУ обратной

связи при минимальном значении коэффициента трения невелика, а ее изменение носит резко выраженный прогрессирующий характер (кривая 4).

Значение распорной силы при построении графика определялось по формуле (8) с использованием следующих исходных данных:  $\operatorname{tg} \alpha = 0,3$ ,  $r = 0,03$  м.

Согласно приведенным на рис. 3 графикам значение коэффициента точности АФМ, вычисленное по формуле

$$K_T = \frac{T_{n,\max}}{T_{n,\min}}, \quad (12)$$

равно  $K_T = 2,55$ .

В формуле (12) параметр  $T_{n,\max}$  – предельный вращающий момент АФМ, соответствующий значению коэффициента трения  $f_k$ ,  $T_{n,\min}$  – вращающий момент АФМ, соответствующий значению коэффициента трения  $f_{\min}$ .

Как показали результаты расчета, значение коэффициента точности АФМ приблизительно равно значению коэффициента точности АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и с косвенным регулированием [5].

#### **Оценка возможности повышения точности срабатывания АФМ**

С учетом особенностей внутрискрупульных связей, схемы действия сил в рассматриваемой АФМ и графика зависимости  $T_{н}(f)$  можно констатировать следующее:

- повышение точности срабатывания АФМ за счет уменьшения распорной силы  $F_p$  при минимальном значении коэффициента трения неэффективно вследствие относительно небольшого значения вращающего момента  $T_{n2}$  ДФГ, благодаря которому возникает распорная сила;

- максимальное значение предельного вращающего момента  $T_{n1}$  ОФГ и, соответственно, полного вращающего момента  $T_{н}$  АФМ можно уменьшить за счет увеличения распорной силы  $F_p$ . Одновременно это приведет к увеличению вращающего момента  $T_{n2}$ , значение которого в данном случае зависит от распорной силы. Кроме

того, увеличение распорной силы при значении коэффициента трения  $f_k$  будет означать увеличение распорной силы при минимальном значении коэффициента трения, что приведет к уменьшению вращающего момента  $T_{п1}$ , которое нельзя компенсировать увеличением вращающего момента  $T_{п2}$  (рис. 3, кривые 1 и 2). Поэтому необходим дополнительный анализ влияния распорной силы на предельный вращающий момент  $T_{п}$ .

Для увеличения распорной силы удобнее всего изменить значение угла  $\alpha$ . Поскольку это приведет к увеличению вращающего момента  $T_{п2}$ , в том числе и при значении коэффициента трения  $f_{max}$ , увеличение угла  $\alpha$  должно иметь определенный предел, так как значение вращающего момента  $T_{п2}$  может превысить вращающий момент  $T_{п}$  при значении коэффициента трения, равном  $f_k$ . В этом случае возможно уменьшение точности срабатывания муфты.

Графики, изображенные на рис. 3 (кривые 2 и 4), показывают, что при принятом исходном значении силы  $F_{п2}$  пружины 17 имеется ее запас по отношению к распорной силе при небольших значениях коэффициента трения. В соответствии с этим существует возможность ограничения величины предельного вращающего момента  $T_{п2}$ , в том числе при максимальном значении коэффициента трения за счет уменьшения силы  $F_{п2}$ .

Примем в качестве скорректированных исходных данных  $F_{п2}=80$  Н и  $C=1,1$ . Данному значению КУ соответствует значение коэффициента трения  $f_k=0,33$ .

График зависимости  $T_{п}(f)$  при указанных исходных данных приведен на рис. 3 (кривая 5). График показывает следующее:

- значение коэффициента трения  $f_k$ , при котором функция  $T_{п}(f)$  имеет максимум внутри интервала значений  $f_{min} \dots f_{max}$ , смещено в область более высоких значений

и в данном случае равно  $f_k \approx 0,46$ ;

- кривая 5 имеет более пологую форму по сравнению с кривой 3, что косвенно указывает на более высокую точность срабатывания муфты;

- значение предельного вращающего момента  $T_{п}$  АФМ при минимальном коэффициенте трения больше, чем для кривой 3. Это объясняется меньшим значением силы  $F_{п2}$  пружины 17, противодействующей силе пружины 12, вследствие чего усилие замыкания пар трения ОФГ выше, чем в первом случае;

- значение предельного вращающего момента  $T_{п}$  муфты при максимальном коэффициенте трения больше, чем в предыдущем случае, что объясняется действием на пары трения ДФГ большей распорной силы УУ.

Коэффициент точности муфты в рассматриваемом случае равен  $K_t=2,14$ . Следовательно, увеличение распорной силы УУ приводит к повышению точности срабатывания АФМ.

Кроме того, увеличивается предельный вращающий момент АФМ при минимальном значении коэффициента трения, т. е. ее номинальный (настроечный) вращающий момент. Данная особенность характерна для АФМ с положительной обратной связью [7], у АФМ с отрицательной обратной связью предельный вращающий момент уменьшается по мере увеличения распорной силы  $F_p$  [4].

Анализ кривой 5 показывает неиспользованные резервы увеличения номинального вращающего момента АФМ при минимальном значении коэффициента трения и повышения ее точности срабатывания. Сопоставление графиков 3 и 5 показывает увеличение коэффициента трения  $f$  по мере роста распорной силы.

Вращающий момент  $T_{п}$  при значении коэффициента трения  $f_k$  больше, чем при значении  $f_{max}$ . Дальнейший рост распорной силы приведет к увеличению коэффициента трения  $f_k$  и одновременно с этим к уменьшению вращающего момента  $T_{п}$ . При

этом вследствие роста распорной силы  $F_p$  будет увеличиваться и вращающий момент  $T_{n2}$ .

Таким образом, при росте распорной силы до некоторого значения кривая зависимости  $T_n(f)$  становится монотонно возрастающей. Это отражено на рис. 3 кривой 6, которая построена при  $\operatorname{tg}\alpha=0,35$  и  $C=1,17$ .

В последнем случае значение коэффициента точности АФМ определяется по следующей формуле:

$$K_T = \frac{T_n(f_{\max})}{T_n(f_{\min})},$$

где  $T_n(f_{\max})$  – предельный вращающий момент муфты, соответствующий максимальному значению коэффициента трения;  $T_n(f_{\min})$  – предельный вращающий момент муфты, соответствующий минимальному значению коэффициента трения.

При данных, соответствующих кривой 6, значение коэффициента точности АФМ, вычисленное по приведенной выше формуле, составляет  $K_T=1,92$ .

Таким образом, установлено, что, в отличие от модифицированной АФМ второго поколения и АФМ второго поколения с косвенным регулированием, максимальная точность срабатывания рассматриваемой муфты достигается не в том случае, когда кривая нагрузочной характеристики достигает точки максимума внутри интервала значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , а при монотонно возрастающем характере указанной кривой.

Из последней формулы следует, что значение коэффициента точности рассматриваемой АФМ уменьшается с увеличением вращающего момента  $T_n(f_{\min})$ . Поскольку, как установлено выше, при небольших значениях коэффициента трения распорная сила УУ невелика и не превышает силу  $F_{n2}$  пружины 17, значение вращающего момента  $T_{n2}$  зависит только от величины коэффициента трения, а значение вращающего момента  $T_{n1}$  – от первоначальной силы натяжения пружины 17.

Для того чтобы увеличить вращающий момент  $T_{n1}$ , а также вращающий момент  $T_n(f_{\min})$ , необходимо уменьшить силу  $F_{n2}$ . При этом уменьшится и вращающий момент  $T_{n2}$ , однако, поскольку при выполнении условия  $F_p < F_{n2}$  (при небольших значениях коэффициента трения) ОФГ и ДФГ работают в режиме обычной точности срабатывания, т. е. без влияния на их пары трения обратной связи, уменьшение вращающего момента  $T_{n2}$  будет компенсировано увеличением вращающего момента  $T_{n1}$ , во-первых, вследствие того, что  $z > z_1$ , во-вторых, вследствие того, что  $F_{n1} > F_{n2}$ .

Формулу для определения значения полного вращающего момента АФМ находим на основе соотношения (1), т. е. суммированием правых частей выражений (9) и (11):

$$T_n = R_{cp} f \left( z F_{n1} + z_1 F_{n2} \frac{1 - zC}{1 - z_1 C f} \right). \quad (13)$$

Функция, представленная формулой (13), монотонно возрастает в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , если ее первая производная по аргументу  $f$  положительная, т. е.

$$(T_n)'_f = z F_{n1} - z_1 F_{n2} (zC - 1) \frac{1}{(1 - z_1 C f)^2} > 0. \quad (14)$$

Неравенство (14) должно выполняться, начиная с определенного значения коэффициента трения, свыше которого в муфте начинает действовать обратная связь, т. е. когда  $F_p > F_{n2}$ .

Для нахождения упомянутого минимального значения коэффициента трения и выполнения поставленного условия, касающегося соотношения сил  $F_p$  и  $F_{n2}$  запишем следующее неравенство, с учетом соотношения (10):

$$z_1 F_{n2} C \frac{f}{1 - z_1 C f} > F_{n2}.$$

Из составленного неравенства находим ограничение коэффициента трения:

$$f_m > \frac{1}{2z_1 C}. \quad (15)$$

Из соотношения (15) следует, что значение коэффициента трения  $f_m$  обратно пропорционально значению КУ  $C$  и числу пар трения ДФГ. Это объясняется увеличением распорной силы УУ по мере роста указанных параметров, в результате чего уменьшается пороговое значение коэффициента трения  $f_m$ .

Функция (14) убывает по аргументу  $f$ , поэтому, принимая максимальное значение коэффициента трения  $f_{max}$  и учитывая соотношение (14) в форме равенства, получаем:

$$F_{n1} = \frac{z_1 F_{n2} (zC - 1)}{z(1 - z_1 C f_{max})^2}. \quad (16)$$

Формула (16) устанавливает связь между силами натяжения пружин 12 и 17  $F_{n1}$  и  $F_{n2}$ , которая необходима для того чтобы при монотонно возрастающей кривой нагрузочной характеристики АФМ в интервале значений коэффициента трения  $f_{min} \dots f_{max}$  достигалась максимальная точность ее срабатывания.

Наибольшая точность срабатывания АФМ достигается не только в случае выполнения соотношения между значениями сил  $F_{n1}$  и  $F_{n2}$  согласно формуле (16), но и тогда, когда значение силы  $F_{n1}$  превышает значение, вычисленное по указанной формуле. Это следует из неравенства (14).

Уменьшение силы  $F_{n2}$  приводит к увеличению номинальной нагрузочной способности муфты и одновременно к уменьшению значения коэффициента трения  $f_k$ , при котором начинают действовать отрицательная и положительная обратная связь в муфте.

Точность срабатывания исследуемой АФМ зависит не только от формы нагрузочной характеристики, но и от величины распорной силы УУ, в частности, при максимальном значении коэффициента трения. В АФМ с отрицательной обратной связью увеличение распорной силы приводит к повышению точности срабатывания муфты [4].

В исследуемой АФМ повышение точности срабатывания наблюдается при увеличении распорной силы до некоторого

предельного значения (см. рис. 3, кривые 3 и 5). Это объясняется тем, что в случае дальнейшего увеличения распорной силы ее величина при значении коэффициента трения  $f_{max}$  становится больше, чем сила пружины  $F_{n1}$ , и муфта будет передавать вращающий момент только за счет работы ДФГ.

Предельный вращающий момент ДФГ зависит, в частности, от величины распорной силы УУ, которая при максимальном значении коэффициента трения превышает силу  $F_{n2}$ .

В этих условиях предельный вращающий момент ДФГ начнет увеличиваться (при увеличении КУ и, соответственно, распорной силы) прогрессивно-нелинейно, приблизительно по закону кубической параболы [10]. Это приводит к резкому снижению точности срабатывания муфты.

При выбранных фиксированных значениях сил  $F_{n1}$  и  $F_{n2}$ , оптимальных по критерию максимальной точности срабатывания АФМ, величину КУ можно определить, решая неравенство (14). В результате решения получаем следующие области значений КУ  $C$ , удовлетворяющие указанному неравенству, в котором постоянный коэффициент при  $C^2$  больше нуля, а дискриминант корней  $D > 0$ :

$$C \in \left( -\infty; \frac{b - \sqrt{D}}{2a} \right) \cup \left( \frac{b + \sqrt{D}}{2a}; +\infty \right), \quad (17)$$

где

$$b = z z_1 (2F_{n1} f + F_{n2}); \quad (18)$$

$$a = z z_1^2 F_{n1} f^2; \quad (19)$$

$$D = z^2 z_1^2 F_{n2} \left[ 4F_{n1} / F_{n2} f \left( 1 - \frac{z_1}{z} f \right) + F_{n2} \right]. \quad (20)$$

В формулах (17) – (20) следует принимать значение коэффициента трения  $f_{max}$ .

Поскольку параметр  $C$  имеет физический смысл только при положительных значениях, запишем формулу (17) в следующем виде:

$$C \in \left( 0; \frac{b - \sqrt{D}}{2a} \right) \cup \left( \frac{b + \sqrt{D}}{2a}; +\infty \right).$$

Кроме того, на значение КУ  $C$  должно быть наложено дополнительное

ограничение, обусловленное условием самоторможения пар трения ДФГ. Действительно, в рассматриваемой схеме компоновки элементов АФМ распорная сила УУ относится к категории движущих сил для нажимного диска 5 и, согласно известному положению теоретической механики [8], угол между силой нормального давления, действующей на боковую стенку скошенного гнезда под тело качения, и вектором силы нормального давления, действующей на плоскость фрикционного контакта, должен быть больше угла трения.

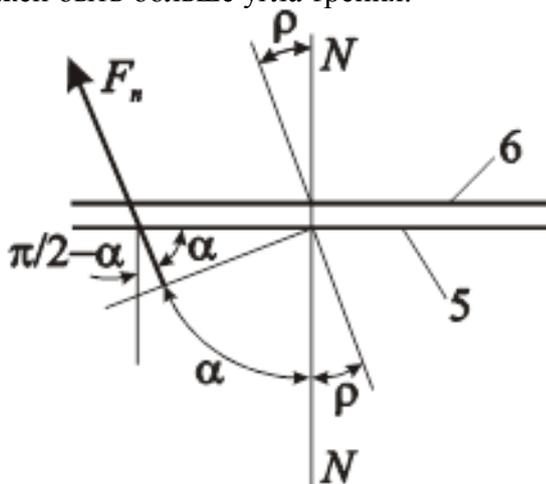


Рисунок 4. Схема фрикционного контакта ДФГ

Рассмотрим схему фрикционного контакта ДФГ, иллюстрирующую изложенное выше и изображенную на рис. 4. Вектор силы нормального давления  $F_n$ , действующей на боковую стенку гнезда нажимного диска 5, отклонен от нормали  $N - N$ , проведенной к плоскости фрикционного контакта 5–6 (нумерация элементов, изображенных на рис. 4, соответствует нумерации элементов на рис. 2) на угол, равный  $\pi/2 - \alpha$ .

Согласно схеме, условие отсутствия самоторможения пары трения 5–6 ДФГ запишем в следующем виде:

$$\frac{\pi}{2} - \alpha > \rho, \quad (21)$$

где  $\rho$  – угол трения;  $\alpha$  – см. выше.

На основании условия (21) запишем:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) > \operatorname{tgr}. \quad (22)$$

Поскольку  $\operatorname{tgr} = f$ , запишем соотношение (22) в следующем виде:

$$\operatorname{ctg}\alpha > f_{\max}. \quad (23)$$

В соотношении (23) принято максимальное значение коэффициента трения, поскольку при значениях  $f < f_{\max}$  поставленное условие выполняется.

Запишем соотношение (23) в виде

$$\frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} > f_{\max},$$

или в виде

$$\operatorname{tg}\alpha < \frac{1}{f_{\max}}. \quad (24)$$

Учитывая полученную выше формулу для определения значения КУ и соотношение (24), находим, принимая во внимание знак неравенства:

$$C < \frac{R_{\text{ср}}}{rf_{\max}}. \quad (25)$$

Неравенство (25) устанавливает ограничение значения КУ по условию самоторможения пар трения ДФГ муфты. Нетрудно заметить, что принятые выше исходные данные при построении графиков на рис. 3 удовлетворяют как условию (24), ограничивающему значение  $\operatorname{tg}\alpha$ , так и условию (25), согласно которому ограничивается значение КУ  $C$ .

**Обсуждение и результаты.** На основе выдвинутой научной предпосылки теоретического обоснования посредством положительно-отрицательной обратной связи параллельного действия в виде факта уменьшения момента сил трения разработана идея реализации принципа косвенного регулирования в АФМ с положительно-отрицательной обратной связью, которая заключается в генерации распорной силы УУ, действующей от выходного сигнала ДФГ, и управления с ее помощью усилиями прижатия друг к другу пар трения в ОФГ и ДФГ в режиме параллельного действия.

Выявленные режимы работы АФМ и формы ее нагрузочной характеристики позволили определить оптимальные значения параметров УУ отрицательно-положительной обратной связи, при которых муфта обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками.

Научные и практические результаты

исследования, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ рассмотренного типа для оптимизации их параметров, обеспечивающих высокую точность срабатывания муфты.

### Выводы

1. Основным недостатком АФМ с отрицательно-нулевой (базовый вариант) и отрицательно-нулевой обратной связью (с косвенным регулированием), заключающийся в ограниченной точности срабатывания, обусловлен относительно невысоким значением распорной силы УУ, соответствующим текущему значению коэффициента трения, а также значительным рассогласованием закономерностей изменения распорных сил упомянутых муфт и «идеальной» АФМ.

2. Научной предпосылкой теоретического обоснования принципа косвенного регулирования на основе положительно-отрицательной обратной связи параллельного действия является факт уменьшения момента сил трения АФМ и, соответственно, смещение значения коэффициента трения, соответствующего максимальному вращающему моменту АФМ второго поколения, в область меньших значений при увеличении входного сигнала (распорной силы) УУ.

3. Идея реализации принципа косвенного регулирования в АФМ с положительно-отрицательной обратной связью заключается в генерации распорной силы УУ, действующей от выходного сигнала ДФГ, и управления с ее помощью усилиями прижатия друг к другу пар трения в ОФГ и ДФГ в режиме параллельного действия.

4. Для более эффективного регулирования процессов, протекающих в АФМ, действие распорной силы на пары трения ОФГ должно быть слабым при небольших значениях коэффициента трения.

5. Для достижения наибольшей точности срабатывания АФМ усилие замыкания пар трения ДФГ с помощью силового упругого элемента должно превышать распорную силу, создаваемую УУ при минимальном значении коэффициента трения. В данном случае в определенном интервале

небольших значений коэффициента трения АФМ будет работать в режиме нулевой обратной связи.

6. В режиме действия положительной обратной связи предельный вращающий момент ДФГ изменяется приблизительно по закону кубической параболы в функции коэффициента трения.

7. Результатом теоретического обоснования принципа косвенного регулирования в АФМ на основе положительно-отрицательной обратной связи, действующей в режиме параллельного регулирования, явилась разработка структурно-функциональной и принципиальной схем АФМ, реализующих указанный принцип.

8. На основе синтезированных структурно-функциональной и принципиальной схем АФМ разработана математическая модель, позволившая исследовать зависимость предельного вращающего момента муфты от коэффициента трения и КУ обратной связи.

9. Особенностью, синтезированной АФМ является линейная зависимость величины предельного вращающего момента муфты не только в определенном интервале минимальных значений коэффициента трения, но и в определенном диапазоне внешних нагрузок, величина которых меньше номинального вращающего момента муфты.

10. Для увеличения предельного вращающего момента синтезированной АФМ число пар трения ОФГ должно превышать число пар трения ДФГ.

11. Характер зависимости распорной силы УУ АФМ определяется законом изменения величины вращающего момента ДФГ в функции коэффициента трения.

12. Предельный вращающий момент, развиваемый ОФГ, может обращаться в ноль внутри интервала изменения коэффициента трения или на его верхней границе. Значение коэффициента трения, при котором вращающий момент ОФГ равен нулю, зависит от величины коэффициента усиления УУ.

13. Предельный вращающий момент АФМ может принимать максимальное значение внутри интервала изменения коэффициента трения или на его верхней границе.

Значение коэффициента трения, принадлежащее упомянутому интервалу и соответствующее переходу графика функции предельного вращающего момента ДФГ на нелинейный участок, соответствует также максимуму нагрузочной характеристики муфты.

14. Наиболее высокая точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда максимальное значение предельного вращающего момента муфты, которое соответствует значению коэффициента трения, находящемуся внутри интервала значений  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , равно предельному вращающему моменту ДФГ при максимальном значении коэффициента трения. В этом случае распорная сила УУ обратной связи должна быть равна усилию замыкания нажимного устройства ОФГ, а предельный вращающий момент последней – нулю.

15. В отличие от модифицированной АФМ второго поколения с увеличением КУ обратной связи значение коэффициента трения, при котором предельный вращающий момент исследуемой муфты максимален, смещается в область максимума.

16. С увеличением КУ обратной связи до определенного значения повышается точность срабатывания АФМ. Упомянутое значение КУ соответствует равенству нулю предельного вращающего момента ОФГ при монотонно возрастающей нагрузочной характеристике АФМ в интервале изменения величины коэффициента трения. При указанной форме нагрузочной характеристики максимальная точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда значение КУ достигает упомянутого предельного значения.

17. При монотонной форме нагрузочной характеристики АФМ увеличение КУ обратной связи приводит к увеличению предельного вращающего момента муфты при максимальном и минимальном значениях коэффициента трения.

18. Найдена функциональная взаимосвязь между первоначальными усилиями замыкания пар трения ОФГ и ДФГ, при которой достигается наибольшая точность срабатывания АФМ.

19. Установлено пороговое значение

коэффициента трения, от которого начинает действовать обратная связь в муфте. Пороговое значение зависит от величины КУ.

20. Найдено ограничение максимального значения КУ обратной связи по условию предотвращения самоторможения пар трения ОФГ.

### Библиографический список

1. Шишкарев М.П., Угленко А.Ю. Исследование эксплуатационных характеристик адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 4. – С. 21–26.
2. 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.
3. Шишкарев М.П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел // 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. 68–72.
4. Шишкарев М.П. Теоретические основы применения комбинированной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 16–19.
5. Шишкарев М.П., Угленко А.Ю. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 3. – С. 36–42.
6. Шишкарев М.П. Особенности процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 3–7.

7. Шишкарёв М.П. Математические модели высокой надёжности адаптивных фрикционных муфт // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVI Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева / РГАСХМ ГОУ, Ростов н/Д, 2003. – С. 231–234.
8. Шишкарёв М.П. Математическая модель устойчивости движения привода с адаптивной фрикционной муфтой // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 8. Секция 8 «Компьютерная поддержка технологических процессов и производственных систем» / Под общ. ред. В.С. Балакирева. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 70–75.
9. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием // Вестн. ДГТУ. – 2014. – Т. 14. № 1 (76). – С. 200–203.
10. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Анализ эксплуатационных характеристик вариантов адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 8. – С. 25–29.
11. Шишкарёв М.П. Повышение надёжности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 4. – С. 6–9.
12. Шишкарёв М.П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13–15.
13. Шишкарёв М.П. Уточнение характеристики обратной связи адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 12–13.
14. Шишкарёв М.П. Исследование базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Материалы 8-й междунар. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 3–6 марта 2015 г., Ростов н/Д, 2015. – С. 162–167.
15. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.

---

*Information about the paper in English*

**M.P. Shishkarev**  
 Don State Technical University (DSTU)  
 Rostov-on-Don, Russian Federation  
 E-mail: shishkarevm@mail.ru  
 Received 28.10.2018

SYNTHESIS OF A SELF-ADJUSTING COMBINATION FEEDBACK  
 FRICTION CLUTCH OF PARALLEL ACTION

**Abstract**

On the basis of synthesized structural-functional and principal diagrams of the self-adjusting friction clutch with positive-negative feedback and parallel automatic adjustment, a mathematical model was developed that helped understand how the breakdown torque is governed by the friction coefficient of the clutch and the feedback gain factor.

**Keywords:** Self-adjusting friction clutch, positive-negative, friction coefficient, feedback, gain factor, precision action.

---