

УДК 621.838.222

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

Донской государственный технический университет, РФ

Тел.: 89081933393; E-mail: [shishkarev\\_m\\_p@mail.ru](mailto:shishkarev_m_p@mail.ru)

## УРОВЕНЬ ПЕРЕГРУЗОК В ПРИВОДЕ МАШИНЫ С АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТОЙ СО ВСЕМИ ВЕДУЩИМИ ПАРАМИ ТРЕНИЯ

В статье приведены результаты исследования уровня перегрузок в приводе машины с адаптивной фрикционной муфтой, имеющей все ведущие пары трения. Показано, что при наличии запаса сцепления муфта обладает потенциальным вращающим моментом, значение которого превышает значение ее номинального вращающего момента и изменяется пропорционально коэффициенту трения. Найдена зависимость для определения вращающего момента, при котором, с учетом запаса сцепления, срабатывает муфта. Доказано, что существует оптимальное значение приведенного коэффициента усиления обратной связи, при котором муфта обладает наиболее высокой точностью срабатывания.

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, перегрузка, привод машины, ведущие пары трения, точность срабатывания, коэффициент усиления.

**M. P. Shishkarev**

## OVERLOAD LEVEL IN THE DRIVE OF THE MACHINE WITH ADAPTIVE FRICTION COUPLING WITH ALL LEADING FRICTION PAIRS

The article presents the results of a study of the overload level in the drive of a machine with an adaptive friction clutch having all the leading friction pairs. It is shown that in the presence of a clutch reserve, the clutch has a potential torque, the value of which exceeds the value of its nominal torque and changes in proportion to the coefficient of friction. A dependence is found for determining the torque at which, taking into account the clutch reserve, the clutch is triggered. It is proved that there is an optimal value of the reduced feedback gain, at which the coupling has the highest response accuracy.

**Keywords:** adaptive friction clutch, overload, machine drive, driving friction pairs, actuation accuracy, gain.

### 1. Введение

В работе [1] приведены результаты исследования процесса формирования перегрузки в приводе машины с адаптивной фрикционной муфтой (АФМ), имеющей дифференцированные пары трения. В результате установлено, что при перераспределении нагрузки между ведущими и ведомыми парами трения АФМ, являющемся следствием запаса сцепления [2], муфта обладает потенциальным вращающим моментом, превышающим его номинальное значение. В связи с этим значение вращающего момента при срабатывании АФМ больше его настроечного значения.

**Цель исследования.** Изучение уровня перегрузок, создаваемых АФМ со всеми ведущими парами трения при срабатывании.

**Задачи исследования.** 1. Определение условия возникновения потенциального вращающего момента в АФМ со всеми ведущими парами трения и его величины. 2. Определение значения вращающего момента, при котором срабатывает АФМ. 3. Определение условия наибольшей точности срабатывания АФМ.

### 2. Основное содержание и результаты работы

При назначении запаса сцепления номинальный вращающий момент АФМ и номинальный вращающий момент в приводе, потребный для работы машины, связаны следующим соотношением [2]:

$$T_{н.муф} = \beta_n T_{н.маш}, \quad (1)$$

где  $T_{н.муф}$  – номинальный вращающий момент АФМ;  $\beta_n$  – коэффициент запаса сцепле-

ния;  $T_{н.маш}$  – номинальный вращающий момент в приводе машины.

Значение номинального вращающего момента АФМ с учетом настроечного значения коэффициента трения [3] равно:

$$T_{н.муф} = zR_{cp}f_{min}(F_{п} - F_{р}), \quad (2)$$

где  $z$  – число пар трения АФМ;  $R_{cp}$  – средний радиус поверхностей трения пар фрикционной группы;  $f_{min}$  – минимальный коэффициент трения;  $F_{п}$  – сила натяжения замыкающей пружины;  $F_{р}$  – распорная (отжимная) сила управляющего устройства (УУ) АФМ:

$$F_{р} = \frac{T_{н.муф}}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

$\alpha$  – угол давления чувствительных элементов УУ;  $r$  – радиус окружности, на которой расположены чувствительные элементы УУ.

Подставляя правую часть выражения (3) в соотношение (2), получаем:

$$T_{н.муф} = zF_{п}R_{cp} \frac{f_{min}}{1 + zCf_{min}}. \quad (4)$$

В формуле (4) параметр  $C$  – коэффициент усиления (КУ) обратной связи, который вычисляется по выражению

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

Считаем, что вращающий момент  $T_{н.маш}$  действует в месте установки АФМ в приводе. Если машина работает в номинальном режиме, то муфта передает вращающий момент  $T_{н.маш}$  и значение распорной силы, в соответствии с соотношением (3), равно:

$$F'_{р} = \frac{T_{н.маш}}{r} \operatorname{tg} \alpha.$$

Значение вращающего момента, который муфта способна передавать в указанный период времени, т. е. потенциального вращающего момента, можно определить, подставляя последнее выражение в равенство (2). Имеем:

$$T_{п.муф} = zF_{п}R_{cp}f_{min} \frac{\beta_{н} + (\beta_{н} - 1)zCf_{min}}{(1 + zCf_{min})\beta_{н}}. \quad (5)$$

При выводе формулы (5) использованы соотношения (1) и (4). Сопоставление значений вращающих моментов  $T_{н.муф}$  и  $T_{п.муф}$  соответственно по формулам (4) и (5) показывает, что  $T_{п.муф} > T_{н.муф}$ . Значение вращающего момента  $T_{п.муф}$  возрастает с увеличением коэффициента трения и становится максимальным при значении  $f_{max}$  (где  $f_{max}$  – максимальный коэффициент трения).

При увеличении внешнего вращающего момента  $T_{н.маш}$  на  $\Delta T$  потенциальный вращающий момент АФМ становится равным:

$$T'_{п.муф} = T_{п.муф} - z\Delta TCf_{min}, \quad (6)$$

т. е. уменьшается. Если принять во внимание, что приведенный КУ, равный  $zC$ , ограничен по значению ( $zC \leq 5$ ) [4], то при значении  $f_{min} = 0,1$  снижение значения вращающего момента  $T_{п.муф}$  будет меньше, чем прирост внешней нагрузки.

При увеличении внешней нагрузки до значения  $T_{н.муф}$  абсолютный прирост зна-

чения вращающего момента составляет:

$$\Delta T_{\max} = T_{\text{н.муф}} - T_{\text{н.маш}} = zF_{\text{п}} R_{\text{ср}} f_{\min} \frac{\beta_{\text{н}} - 1}{(1 + zCf_{\min})\beta_{\text{н}}} . \quad (7)$$

При выводе формулы (7) учтено соотношение (4). Подставляя правую часть формулы (7) в равенство (6), получаем:

$$T'_{\text{п.муф}} = T_{\text{н.муф}} .$$

Таким образом, при увеличении внешней нагрузки до значения  $T_{\text{н.муф}}$  значение потенциального вращающего момента АФМ уменьшается до этого же значения при неизменном коэффициенте трения.

Рассмотрим предельный случай, когда коэффициент трения увеличивается до значения  $f_{\max}$ . В этом случае, как отмечено выше, значение потенциального вращающего момента АФМ можно определить на основе формулы (2) и соотношения для вычисления распорной силы  $F'_{\text{р}}$  (см. выше):

$$T_{\text{п.муф.макс}} = zF_{\text{п}} R_{\text{ср}} f_{\max} \frac{\beta_{\text{н}} + zCf_{\min}(\beta_{\text{н}} - 1)}{(1 + zCf_{\min})\beta_{\text{н}}} . \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что, в отличие от расчетного значения вращающего момента АФМ, ее потенциальный вращающий момент изменяется пропорционально значению коэффициента трения.

При увеличении внешнего вращающего момента на  $\Delta T$  потенциальный вращающий момент АФМ становится равным

$$T'_{\text{п.муф.макс}} = T_{\text{п.муф.макс}} - zC\Delta T f_{\max} . \quad (9)$$

Сопоставление формул (6) и (9) показывает, что изменение значения потенциального вращающего момента АФМ в последнем случае происходит интенсивнее.

Если прирост внешней нагрузки равен разности  $T_{\max} - T_{\text{н.маш}}$  (где  $T_{\max}$  – вращающий момент АФМ, соответствующий значению коэффициента трения  $f_{\max}$ ), то ее потенциальный вращающий момент, с учетом формул (8) и (9), равен:

$$T'_{\text{п.муф.макс}} = zF_{\text{п}} R_{\text{ср}} \frac{f_{\max}}{1 + zCf_{\max}} .$$

Найденное значение равно  $T_{\max}$ , т. е. в данном случае потенциальный вращающий момент уменьшается до значения, равного предельному вращающему моменту муфты. Очевидно, что данный вывод можно применить ко всем значениям коэффициента трения из интервала  $f_{\min} \dots f_{\max}$ .

В работе [1] найдено выражение для определения значения потенциального вращающего момента АФМ с дифференцированными парами трения. Разность между значениями потенциального вращающего момента АФМ с дифференцированными парами трения и АФМ со всеми ведущими парами трения равна:

$$\Delta = 1 + z(z-1)(\beta_{\text{н}} - 1)(1 - Cf) . \quad (10)$$

Формула (10) записана при числе ведущих пар трения, равном единице. Учитывая указанное выше ограничение значения приведенного КУ  $zC$ , условие  $\Delta > 0$  справедливо при выполнении следующего неравенства:

$$f < \frac{1}{5(z-1)(\beta_{\text{н}} - 1)} + \frac{z}{5} . \quad (11)$$

График зависимости  $f_i(z)$  показан на рис. 1. График построен по формуле (11) при  $\beta_n = 1,25$  [2] и имеет точку минимума при  $z = 3$ . График показывает, что неравенство (11) выполняется практически при всех, в том числе максимальном, значениях коэффициента трения [5]. Таким образом, значение потенциального вращающего момента АФМ с дифференцированными парами трения с одной ведущей парой, больше аналогичного вращающего момента АФМ со всеми ведущими парами трения.

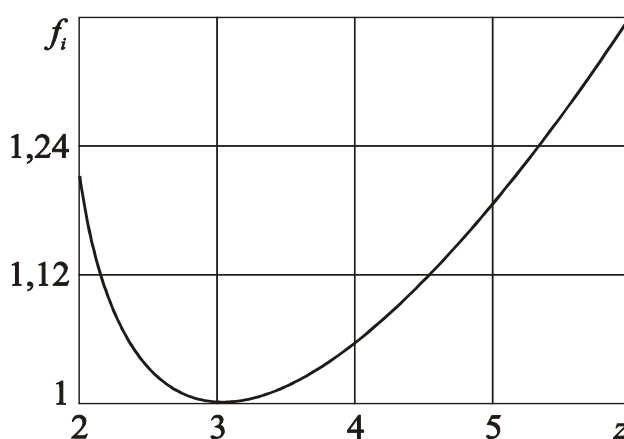


Рисунок 1. Зависимость текущего коэффициента трения от числа пар трения

Срабатывание исследуемой АФМ произойдет тогда, когда

уменьшающийся потенциальный вращающий момент станет равным возрастающему внешнему вращающему моменту. Для определения значения вращающего момента АФМ при срабатывании составим следующее уравнение, с учетом равенства (6):

$$T_{н.маш} + \Delta T' = T_{п.муф} - z\Delta T' C f_{min}, \tag{12}$$

где  $\Delta T'$  – прирост внешней нагрузки, вызывающий срабатывание муфты.

Из уравнения (12) находим:

$$\Delta T' = \frac{T_{п.муф} - T_{н.маш}}{1 + zCf_{min}}. \tag{13}$$

Значение вращающего момента, соответствующего срабатыванию АФМ, равно:

$$T_{ср} = T_{п.муф} - \Delta T',$$

что с учетом соотношений (1), (5) и (13) дает:

$$T_{ср} = zF_n R_{ср} \frac{f_{min}}{(1 + zCf_{min})\beta_n} [1 + zCf_{min}(\beta_n - 1)]. \tag{14}$$

Запишем соотношение (14) в следующем виде:

$$T_{ср} = \frac{1 + zCf_{min}(\beta_n - 1)}{\beta_n} T_{н.муф},$$

из которого следует, что условие  $T_{ср} > T_{н.муф}$  выполняется, если

$$f_{min} > \frac{1}{zC}.$$

При  $zC = 5$  получаем  $f_{min} > 0,2$ . Следовательно, при указанном граничном значении в результате нарастания внешней нагрузки срабатывание АФМ произойдет при вращающем моменте  $T_{н.муф}$ . То же самое можно отнести и к значениям  $f_{min} < 0,2$ , поскольку минимальным значением вращающего момента АФМ при срабатывании является  $T_{н.муф}$ .

При значениях  $f_{min} > 0,2$  получаем  $T_{ср} > T_{н.муф}$ , т. е. муфта будет срабатывать при вращающем моменте, большем настроечного значения.

Если действительный коэффициент трения отличается от его настроечного зна-

чения, значение вращающего момента АФМ при срабатывании определяется по следующей формуле:

$$T_{cp,i} = T_{имуф} \frac{zCf_i\beta_n(1 + zCf_{min}) + f_{min}[1 - (zCf_i)^2]}{(1 + zCf_{min})\beta_n}, \quad (15)$$

где  $f_i$  – текущий коэффициент трения ( $f_i \neq f_{min}$ );  $T_{имуф}$  – текущий вращающий момент АФМ:

$$T_{имуф} = zF_n R_{cp} \frac{f_i}{1 + zCf_i}. \quad (16)$$

Вращающий момент  $T_{имуф}$  определяет теоретическое значение перегрузки в приводе при значении коэффициента трения  $f_i$  и отсутствии запаса сцепления. При наличии запаса сцепления значение вращающего момента  $T_{cp,i}$  будет больше, чем значение вращающего момента  $T_{имуф}$ , определяемое по формуле (16), если дробь-сомножитель при  $T_{имуф}$  в соотношении (15) больше единицы.

Решение записанного квадратного относительно неизвестного  $f_i$  неравенства зависит от знака дискриминанта его корней:

$$D = \beta_n'(1 + zCf_{min})^2 - 4zC[\beta_n(1 + zCf_{min}) - zCf_{min}]f_{min}.$$

Для фиксированных значений коэффициента запаса  $\beta_n$  и коэффициента трения  $f_{min}$  знак дискриминанта корней определен графически при переменном значении приведенного КУ  $zC$  на рис. 2. Кривая 1 построена при  $f_{min}=0,1$ , кривая 2 – при  $f_{min}=0,2$ . При построении обеих кривых принято  $\beta_n=1,25$  [6].

Графики показывают, что при всех величинах приведенного КУ, в том числе при его предельном значении ( $zC=5$ ), дискриминант корней квадратного неравенства положителен. В соответствии с этим упомянутое неравенство выполняется при множестве решений, принадлежащих следующим областям значений:

$$f_i \in \left( -\infty; \frac{\beta_n(1 + zCf_{min}) - \sqrt{D}}{2zC[\beta_n(1 + zCf_{min})] - zCf_{min}} \right) \cup \left( \frac{\beta_n(1 + zCf_{min}) - \sqrt{D}}{2zC[\beta_n(1 + zCf_{min})] - zCf_{min}}; +\infty \right). \quad (17)$$

Графически верхнее граничное значение левой области значений множества решений (17) и нижнее граничное значение правой области значений показаны на рис. 2 соответственно кривыми 3 и 4 (при  $f_{min1}=0,1$ ) и кривыми 5 и 6 (при  $f_{min2}=0,2$ ). Кривые 3 и 5 показывают, что значения коэффициента трения  $f_i$ , принадлежащие левой полуобласти решений (17), не превышают значение минимального коэффициента трения ( $f_{min1}$  и  $f_{min2}$ ) и, следовательно, не могут быть приняты во внимание при оценке значения вращающего момента  $T_{cp,i}$  [7].

Кривые 4 и 6 показывают, что увеличение приведенного КУ сужает интервал значений коэффициента трения, внутри которого выполняется неравенство  $T_{cp,i} < T_{имуф}$ .

Точность срабатывания АФМ повышается по мере увеличения приведенного КУ (без учета запаса сцепления) [8]. Наоборот, с учетом запаса сцепления, при увеличении приведенного КУ точность срабатывания муфты снижается из-за того, что увеличивается интервал значений коэффициента трения, в котором фактический вращающий момент при срабатывании АФМ больше ожидаемого (расчетного) значения.

Поскольку рассматривается работа АФМ с учетом запаса сцепления, представляется необходимым, на основе изложенного выше, найти оптимальное значение приведенного КУ, при котором достигается наибольшая точность срабатывания муфты.

Используем для этого графический способ, построив в координатных осях

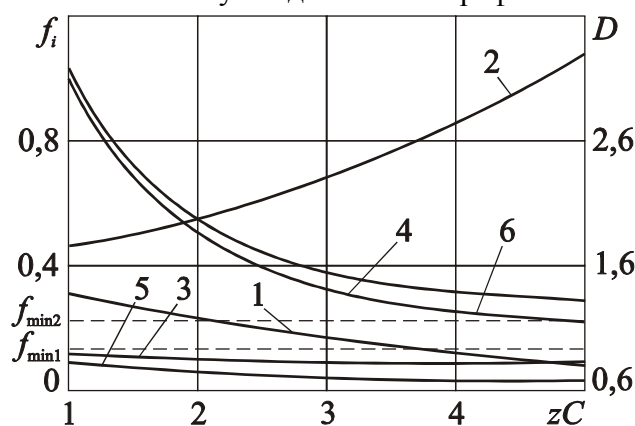


Рисунок 2. Зависимости приведенного коэффициента трения и дискриминанта  $D$  от приведенного КУ

$K_T - zC$  график изменения значения коэффициента точности АФМ. В этом случае значение коэффициента точности определяется по следующим формулам:

– если АФМ срабатывает при ожидаемом вращающем моменте:

$$K_T = \frac{T'_{п.муф.макс}}{T_{мин}}; \tag{18}$$

– если АФМ срабатывает при вращающем моменте  $T_{cp,i}$ :

$$K_T = \frac{T_{cp,макс}}{T_{мин}}. \tag{19}$$

В формулах (18) и (19) параметр  $T_{мин}$  – минимальный вращающий момент АФМ, вычисляемый по соотношению (16) с заменой параметра  $f_i$  параметром  $f_{мин}$ ,  $T_{cp,макс}$  – максимальный вращающий момент, вычисляемый по соотношению (15) при значении  $f_i = f_{макс}$ .

При построении графика (рис. 3, кривая 1) принято  $\beta_n = 1,25$ ,  $f_{мин} = 0,1$ ,  $f_{макс} = 0,8$ . При указанном значении коэффициента трения  $f_{мин}$ , как установлено выше, вращающий момент при срабатывании АФМ равен вращающему моменту  $T_{мин}$ .

Кривая 2 на рис. 3 показывает изменение величины коэффициента точности, вычисленного с учетом формулы (16).

Кривая 1 имеет точку минимума, которая соответствует значению приведенного КУ  $zC \approx 1,6$ , при котором еще сохраняется значение вращающего момента, равного ожидаемому вращающему моменту АФМ.

С увеличением приведенного КУ отношение значений коэффициентов точности, согласно кривым 1 и 2, возрастает и при значении  $zC = 5$  составляет 3. В точке, соответствующей значению  $(zC)_1$ , коэффициенты точности, вычисленные по двум вариантам, равны друг другу и данное значение приведенного КУ является оптимальным по критерию точности срабатывания АФМ [9].

Необходимо отметить, что при отсутствии запаса сцепления вращающий момент при срабатывании АФМ равен расчетному (ожидаемому) вращающему моменту только

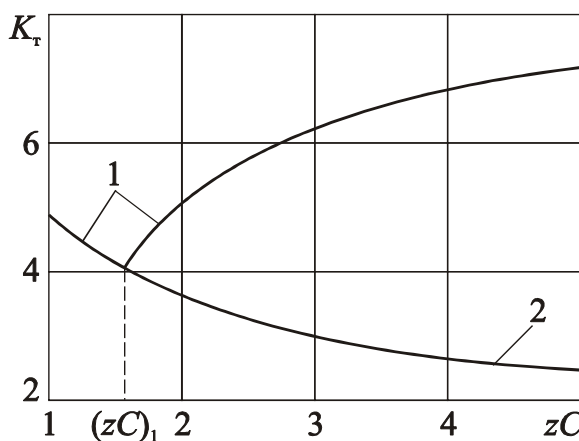


Рисунок 3. Зависимости коэффициента точности от приведенного КУ

при значении коэффициента трения, равном  $f_{\min}$ , что подтверждается подстановкой в формулу (15)  $f_i = f_{\min}$  и  $\beta_n = 1$ . В остальных случаях, т. е. при  $f_i > f_{\min}$ , значение потенциального вращающего момента АФМ равно:

$$T_{п.муф.i} = zF_{п} R_{ср} \frac{f_i}{1 + zCf_i}, \quad (20)$$

а значение вращающего момента при срабатывании АФМ

$$T_{ср.i} = T_{имуф} \frac{zCf_i(1 + zCf_{\min}) + f_{\min}[1 - (zCf_i)^2]/f_i}{1 + zCf_{\min}}. \quad (21)$$

Сопоставление значений вращающих моментов, вычисленных по формулам (8) и (20) (при условии замены параметра  $f_{\max}$  на параметр  $f_i$  в формуле (8)), показывает, что значение вращающего момента при значении  $\beta_n = 1$  меньше. Столь же однозначно нельзя утверждать о соотношении значений вращающих моментов  $T_{ср.i}$ , вычисленных по формулам (15) и (21).

Анализ формулы (15) показывает, что при уменьшении коэффициента запаса  $\beta_n$  (именно это отражается формулой (21)) уменьшение значения сомножителя-дроби при значении  $T_{имуф}$  возможно только в том случае, когда разность в квадратных скобках отрицательная.

При  $zC = \text{const}$  это возможно, если выполняется следующее неравенство:

$$f_i > \frac{1}{zC}.$$

Согласно последнему неравенству, при небольших значениях приведенного КУ уменьшение значения коэффициента запаса  $\beta_n$  приводит к увеличению вращающего момента  $T_{ср.i}$ . При предельных, т. е. близких к максимальной, значениях приведенного КУ ( $zC \approx 5$ ) увеличение вращающего момента  $T_{ср.i}$  возможно только в ограниченном интервале значений коэффициента трения ( $\Delta f \approx 0,1$ ), при остальных значениях коэффициента трения значение вращающего момента  $T_{ср.i}$  устойчиво уменьшается при уменьшении значения коэффициента запаса  $\beta_n$ .

Таким образом, при отсутствии запаса сцепления значение реального вращающего момента при срабатывании АФМ так же, как и при наличии запаса сцепления, превышает значение ожидаемого вращающего момента АФМ из-за действия меньшей, чем расчетное значение, распорной силы в номинальном режиме работы привода.

В работе [10] приведено выражение для определения потенциального вращающего момента АФМ с дифференцированными парами трения, которое имеет вид:

$$T'_{п.муф.i} = zF_{п} R_{ср} f_i \frac{\beta_n + (z - z_1)Cf_{\min}(\beta_n - 1)}{[1 + (z - z_1)Cf_{\min}]\beta_n}, \quad (22)$$

где  $z_1$  – число ведущих пар трения.

Подставляя в формулу (8) параметр  $f_i$  вместо параметра  $f_{\max}$  и вычисляя разность между значениями одноименных вращающих моментов различных типов АФМ, получаем, с учетом формулы (22):

$$T'_{п.муф.i} - T_{п.муф.i} = z_1 Cf_{\max}.$$

В последнем равенстве  $T_{п.муф.i}$  – текущий потенциальный вращающий момент

АФМ со всеми ведущими парами трения. Разность вращающих моментов положительна, следовательно, значение текущего вращающего момента исследуемой АФМ меньше при одинаковых параметрах сравниваемых объектов.

Формула (22) позволяет получить выражение для определения значения вращающего момента при срабатывании АФМ с дифференцированными парами трения, которое в данном случае имеет вид:

$$T'_{cp.i} = T'_{имуф} \frac{(z - z_1)Cf_i\beta_n[1 + (z - z_1)Cf_{min}] + f_{min}\{1 - [(z - z_1)Cf_i]^2\} / f_i}{\beta_n[1 + (z - z_1)Cf_{min}]} \quad (23)$$

Отношение  $T'_{cp.i} / T'_{имуф}$  отражает уровень превышения вращающего момента при срабатывании АФМ над расчетным вращающим моментом муфты. Поэтому для сопоставления перегрузки, вносимой в привод муфтой, достаточно оценить значения выражений, представленных в формулах (15) и (23) дробями-сомножителями соответственно при  $T_{имуф}$  и  $T'_{имуф}$ .

Оценку значений указанных многочленов произведем графическим способом. При этом разность между значениями вращающих моментов  $T_{имуф}$  и  $T'_{имуф}$  при одинаковых параметрах АФМ не влияет на отношение вращающих моментов  $T'_{cp.i} / T_{имуф}$ , поэтому при сопоставлении примем одинаковым общее число пар трения в сравниваемых АФМ.

На рис. 4 приведены графики зависимости  $A(z_1)$  (где  $A$  – выражения, представленные сомножителями-дробями при  $T_{имуф}$  и  $T'_{имуф}$  в формулах (15) и (23)).

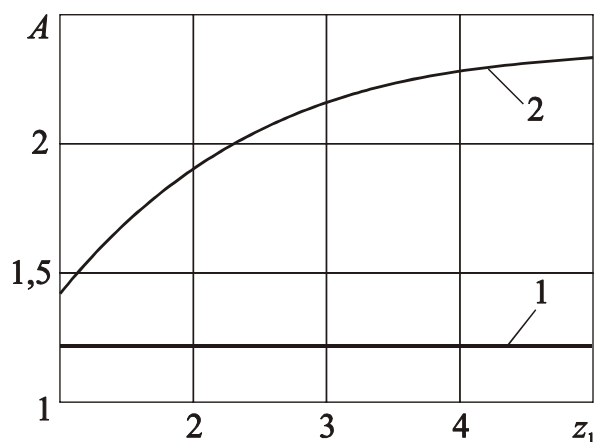


Рисунок 4. Зависимости параметра  $A$  от числа ведущих пар трения

Прямая 1 отражает упомянутую зависимость по формуле (15), кривая 2 – по формуле (23).

Графики построены по следующим исходным данным:  $f_{min}=0,1$ ,  $f_{max}=0,8$ ,  $\beta_n=1,25$ ,  $z=4$ . Значение приведенного КУ в формуле (15) принято равным  $zC=5$ . Значение КУ  $C$  в формуле (23) варьировалось в зависимости от значения  $z_1$  по формуле [11]:

$$C = \frac{1}{z_1 f_{max}} \quad (24)$$

Прямая 1 построена с учетом ранее найденной величины приведенного КУ  $zC=1,6$ . При построении кривой 2 также

принято  $(z - z_1)C=1,6$ , кроме значений, удовлетворяющих условию  $z_1 \geq 2$ , когда значение КУ  $C$  определялось по формуле (24).

Анализ графиков показывает следующее:

- при всех принятых значениях параметра  $z_1$  значение параметра  $A$ , вычисленное с учетом формулы (23), больше аналогичного параметра, определяемого по соотношению (15). Это свидетельствует о большем отношении значений вращающих моментов  $T'_{cp.i} / T_{имуф}$  у АФМ с дифференцированными парами трения и о меньшей ее точности срабатывания;

- значение параметра  $A$  у АФМ с дифференцированными парами трения умень-



шается с уменьшением параметра  $z_1$ , приближаясь к фиксированному значению аналогичного параметра АФМ со всеми ведущими парами трения, что объясняется приближением характеристик УУ (распорной силы и КУ) первой из упомянутых муфт ко второй.

Уменьшение до минимального значения параметра  $z_1$  целесообразно также с точки зрения расширения интервала значений минимального коэффициента трения, внутри которого значение вращающего момента при срабатывании АФМ не превышает номинальное значение вращающего момента. Кроме того, с уменьшением параметра  $z_1$  увеличивается как значение КУ, так и значение приведенного КУ  $(z - z_1)C$ , что позволяет повысить точность срабатывания АФМ [12].

**Обсуждение и результаты.** Исследование подтвердило преимущество АФМ со всеми ведущими парами трения не только по точности срабатывания с учетом ожидаемых значений вращающего момента при срабатывании муфты, но и по критерию точности срабатывания с учетом увеличения перегрузки, вносимой муфтой в привод машины за счет влияния запаса сцепления.

Учет и определение значения потенциального вращающего момента АФМ с различными вариантами конструктивно-компоновочных схем фрикционной группы позволил усовершенствовать их расчеты за счет повышения точности определения эксплуатационных характеристик муфт.

Результаты исследования могут быть использованы при расчете и проектировании АФМ первого поколения с различными вариантами компоновочных схем фрикционной группы для оптимизации конструктивных параметров УУ и муфт в целом с целью повышения их точности срабатывания

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. При наличии запаса сцепления АФМ со всеми ведущими парами трения обладает потенциальным вращающим моментом, значение которого превышает значение номинального вращающего момента муфты. Значение потенциального вращающего момента АФМ изменяется пропорционально коэффициенту трения.
2. Значение потенциального вращающего момента АФМ со всеми ведущими парами трения меньше значения аналогичного вращающего момента АФМ с дифференцированными парами трения при любом числе ведущих пар трения.
3. Найдена зависимость для определения вращающего момента, при котором, с учетом запаса сцепления, срабатывает АФМ. Существует интервал значений коэффициента трения, зависящий от значения приведенного КУ, в котором вращающий момент при срабатывании АФМ не превышает номинальный вращающий момент муфты.
4. Увеличение приведенного КУ приводит к сужению интервала значений коэффициента трения,
5. Существует оптимальное значение приведенного КУ АФМ со всеми ведущими парами трения, при котором муфта имеет наиболее высокую точность срабатывания.
6. При отсутствии запаса сцепления значения потенциального вращающего момента и вращающего момента при срабатывании АФМ с упомянутыми компоновками фрикционной группы меньше, при предельных значениях приведенного коэффициента трения, чем при наличии запаса сцепления.
7. Значение вращающего момента при срабатывании АФМ с дифференцированными парами трения с учетом запаса сцепления больше аналогичного вращающего момента АФМ со всеми ведущими парами трения. Для повышения реальной точности

срабатывания АФМ с дифференцированными парами трения следует уменьшать до минимума число ведущих пар.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарёв, М. П. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием / М. П. Шишкарёв, А. Ю. Угленко // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 3. – С. 36–41.
2. Шишкарёв М. П. Анализ способов настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2009. – № 8. – С. 29–32.
3. Шишкарёв, М. П. О функциях адаптивных предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2006. – № 7. – С. 7–8.
4. Шишкарёв, М.П. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием / М. П. Шишкарёв, А. Ю. Угленко // Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14. – № 1 (76). – С. 200–203.
5. Шишкарёв, М. П. Уточнение характеристики обратной связи адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 12–13.
6. Шишкарёв, М. П. Функциональные связи между характеристиками предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 8–10.
7. Фокин, А. Е. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения / М.Д. Гавриленко, М. П. Шишкарёв, А.Е. Фокин // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11. – № 1 (52). – С. 49–56.
8. Шишкарёв, М. П. Математические модели высокой надежности адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарёв // 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.
9. А. с. 1430633 СССР, МПК<sup>4</sup> F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарёв (СССР). – № 4048607/25–27; заявл. 26.02.86; опубл. 15.10.88, Бюл. № 38. – 3 с.: ил.
10. Шишкарёв, М. П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения с дифференцированными парами трения (ч. 2) / М. П. Шишкарёв // Известия ОрелГТУ. – 2008. – № 3-2/271 (546). – С. 67–71.
11. Шишкарёв, М. П. Вопросы теории адаптивного фрикционного контакта твердых тел / М. П. Шишкарёв // Изв. вузов. Машиностроение. – 1994. – № 4–6. – С. 43–47.
12. А. с. 1055915 СССР, МПК<sup>3</sup> F 16 D 7/02, F 16 D 13/04. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарёв (СССР). – № 3475963/25–27; заявл. 28.07.82; опубл. 23.11.83, Бюл. № 43. – 6 с.: ил.

Поступила в редколлегию 13.02.2022 г.