



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 07.10.2023

ОПТИМАЛЬНАЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ РАСПОРНОЙ СИЛЫ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ

Аннотация

В работе приведены результаты исследования надежности адаптивных фрикционных муфт первого поколения в контексте установления оптимальной закономерности изменения распорной силы управляющего устройства обратной связи в зависимости от коэффициента трения. Найден критерий оптимизации указанной закономерности в форме минимума произведения разностей распорных сил «идеальной» и реальной адаптивной фрикционной муфты, взятых на границах интервалов их изменения, поставлено условие применения введенного критерия.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, надежность, первое поколение, оптимизация, коэффициент трения.

Введение

В работах [1, 2] приведены условия, при которых вращающий момент при срабатывании адаптивных фрикционных муфт (АФМ) не зависит от колебаний значения коэффициента трения между фрикционными парами и является постоянным. Эти условия представлены в формализованном виде и отражают в общем виде связь между моментом на валу управляющего устройства (УУ) и его передаточным отношением. В работе [3] приведена закономерность изменения величины коэффициента усиления C УУ в зависимости от коэффициента трения f , обеспечивающая стабильность момента срабатывания муфты.

Постановка задачи исследования

Определение условия высокой надежности работы адаптивных фрикционных муфт первого поколения на основе оптимизации закономерности изменения распорной силы.

Основная часть

Запишем выражение для определения величины предельного вращающего момента АФМ первого поколения [4]:

$$T_n = (F_n - F_p)zR_{cp}f, \quad (1)$$

где F_n – сила натяжения замыкающей пружины; F_p – распорная сила; z – число фрикционных пар; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения фрикционных пар.

В качестве эксплуатационной характеристики необходимо, очевидно, принять вращающий момент при настройке АФМ. Обычно настройка производится по среднему значению коэффициента трения [5], поэтому с учетом данных [4] запишем:

$$T_n = \frac{zF_n R_{cp} f_{cp}}{1 + Cf_{cp}}, \quad (2)$$

где T_n – момент настройки АФМ первого поколения; f_{cp} – средний коэффициент трения.

Для обеспечения стабильного вращающего момента при срабатывании АФМ должно выполняться равенство $T_n = T_n$. Тогда на основании соотношений (1) и (2) получим следующее выражение:

$$F_p = F_n \left[1 - \frac{f_{cp}}{(1 + Cf_{cp})f} \right]. \quad (3)$$

Полученное соотношение устанавли-

вает закономерность изменения управляющего воздействия F_p «идеальной» АФМ, т.е. муфты, нечувствительной к изменениям величины коэффициента трения. Для реальной АФМ подобная зависимость имеет вид:

$$F_{p1} = F_n \frac{Cf}{1+Cf}. \quad (4)$$

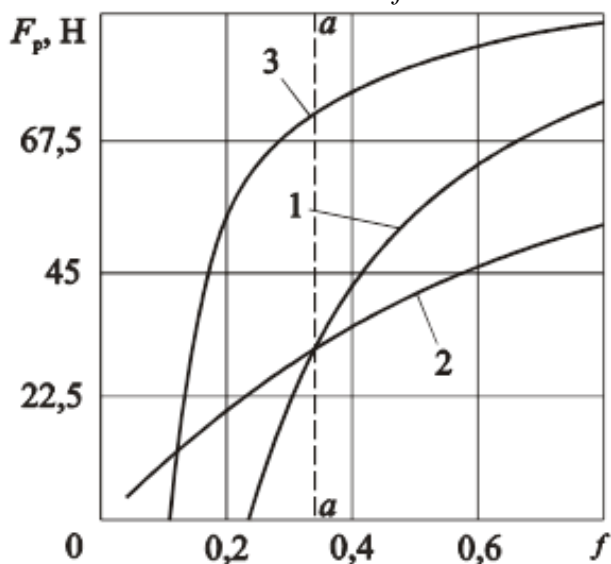


Рисунок 1. Зависимости распорной силы «идеальной» и реальной АФМ от коэффициента трения

Графики функций (3) и (4) показаны на рис. 1 (соответственно кривые 1 и 2) и построены при $F_n=100$ Н, $C=1,25$, $f_{cp}=0,33$. Из рисунка следует:

– график имеет два участка, разделенных линией $a-a$, соответствующей значению коэффициента трения $f = f_{cp}$. На участке, расположенном слева от указанной линии, имеет место $F_p < F_{p1}$, а на участке справа – $F_p > F_{p1}$;

– управляющее воздействие «идеальной» АФМ в интервале значений коэффициента трения $f_{min} \dots f_1 = f_{cp} / (1 + Cf_{cp})$ (это следует из (3)), равно нулю, поэтому стабильный момент срабатывания обеспечивается только при $f_i \geq f_1$. В указанном интервале имеем:

$$T'_n = F_n R_{cp} f_i,$$

т. е. вся нагрузка будет передаваться за счет одной (ведущей) фрикционной пары, и муфта в этом случае теряет адаптивные ка-

чества. Увеличение среднего коэффициента трения при фиксированной величине параметра C снижает надежность работы «идеальной» АФМ в области малых значений f . Коэффициент точности в этом случае равен:

$$K_T = \frac{zf_{cp}}{(1+Cf_{cp})f_{min}} > 1,$$

так как по особенностям конструктивной схемы АФМ всегда $z \geq 2$, а $f_{cp} / (1 + Cf_{cp}) \geq f_{min}$. Таким образом, настройка муфты по среднему коэффициенту трения исключает принципиально возможность получения равенства $T_n = const$ в интервале значений коэффициента трения $f_{min} \dots f_{max}$ для реальных соотношений f_{cp} / f_{min} материалов фрикционных пар, применяемых в предохранительных фрикционных муфтах [6], в том числе АФМ.

Уровень надежности работы реальной АФМ характеризуется, очевидно, степенью приближения распорной силы F_{p1} к распорной силе F_p в любой точке интервала значений коэффициента трения $f_{min} \dots f_{max}$. Вычислим разность

$$\Delta F_p = F_{p1} - F_p = \frac{f_{cp} - f}{f(1+Cf)(1+Cf_{cp})} F_n. \quad (5)$$

Очевидно, что $\Delta F_p = 0$ при $f = f_{cp}$, это отражается графиком на рисунке 1. Производная:

$$(\Delta F_p)'_{f_{cp}} = F_n f (1 + Cf)^2 > 0,$$

следовательно, функция (5) является возрастающей, и увеличение значения коэффициента трения f_{cp} приводит к нарастанию рассогласования между кривыми 1 и 2 на участке, расположенном слева от точки их пересечения. Это объясняется, во-первых, уменьшением распорной силы F_p , что следует из (3), во-вторых, увеличением распорной силы F_{p1} . Для доказательства последнего утверждения представим, что $f = mf_{cp}$, где коэффициент m изменяется в интервале значений $1 / (1 + Cf_{cp}) \dots 1 / (Cf_{cp})$ при фиксированном значении коэффициента трения f_{cp} . Тогда можно записать:

$$F_{p1} = F_n \frac{Cmf_{cp}}{1 + Cmf_{cp}}.$$

Полученная функция является возрастающей в указанном диапазоне изменения m при $f_{cp} = \text{const}$. Пошаговое увеличение f_{cp} сохраняет характер функции [4], поскольку, как правило, увеличение значения коэффициента трения f_{cp} сопровождается ростом значения коэффициента трения f_{max} и непропорциональное уменьшение величины коэффициента m не изменяет вида кривой 2, т. е. $F_p > F_{p1}$ и тогда:

$$\Delta F'_p = F_p - F_{p1} = \frac{f - f_{cp}}{f(1 + Cf)(1 + Cf_{cp})} F_n.$$

Представленная функция является убывающей при увеличении f_{cp} и непропорциональном уменьшении величины коэффициента C . Так как функция $F_{p1}(f_{cp})$ сохраняет свой характер на этом участке, убывание ΔF_p будет более интенсивным.

Поскольку изменение величин ΔF_p и $\Delta F'_p$ носит в функции f_{cp} взаимно противоположный характер, запишем произведение $\Delta F_p \Delta F'_p$ при граничных значениях f :

$$\Delta F_p \Delta F'_p = \frac{(1 - Cf_{cp})Cf_{cp}}{2(1 + Cf_{cp})(1 + 2Cf_{cp})} F_n^2,$$

Исследуем полученную функцию на экстремум. Первая производная равна:

$$(\Delta F_p \Delta F'_p)'_{f_{cp}} = \frac{1 - 2Cf_{cp} - 5C^2 f_{cp}^2}{4(1 + Cf_{cp})^2 (1 + 2Cf_{cp})^2} F_n^2.$$

Решение квадратного уравнения в числителе производной дает $f_{cp,k} = 0,29/C$. Второй корень уравнения отрицателен, что противоречит физической сущности коэффициента трения.

Вторая производная при найденном корне уравнения отрицательна, следовательно, в данной точке функция достигает максимума. Так как, принятое произведение управляющих воздействий косвенно характеризует точность ограничения нагрузки АФМ, то для более эффективной работы последних необходимо стремиться

к тому, чтобы это произведение было минимальным. Вследствие этого эффективность работы повышается при следующих условиях:

- уменьшении среднего коэффициента трения от полученного значения $f_{cp,k}$;
- увеличении коэффициента трения от полученного значения.

Рассмотрим оба предложенных способа. В первом случае будет иметь место снижение нагрузки, передаваемой муфтой при неизменных габаритных размерах, массе и усилиях прижатия фрикционных пар. Кроме этого, величина среднего коэффициента трения для большинства фрикционных материалов, применяемых в АФМ, связана с величиной максимального коэффициента трения прямой зависимостью [6, 7]. Поэтому уменьшение величины f_{cp} сопровождается увеличением предельного значения коэффициента усиления C [8] и, соответственно, снижает величину $f_{cp,k}$, сужая тем самым диапазон варьирования значения коэффициента трения f_{cp} .

Реализация второго способа позволяет увеличить нагрузку с ростом f_{cp} , т. е. повысить коэффициент эффективности управляющего устройства [9]. Поскольку $C = 1/f_{max}$ [8], находим $f_{cp,k} = 0,29f_{max}$. Максимальное соотношение (по литературным данным) составляет $f_{cp} = (0,5...0,6)f_{max}$, минимальное – $f_{cp} = (0,15...0,2)f_{max}$. Тогда имеем $\Delta F_p \Delta F'_p = 0,038$ при $f_{cp} = 0,55f_{max}$ и $\Delta F_p \Delta F'_p = 0,043$ при $f_{cp} = 0,15f_{max}$. Из этого следует, что кроме указанного преимущества, второй способ позволяет повысить точность ограничения нагрузки, в основном, за счет несимметричного расположения точки $f_{cp,k}$ внутри интервала указанных соотношений.

При настройке АФМ по минимальному коэффициенту трения настроечный вращающий момент равен:

$$T_n = zF_n R_{cp} f_{min}, \quad (6)$$

что предполагает условие $F_p = 0$ при равенстве $f = f_{min}$.

Решив совместно уравнения (1) и (6),

получим:

$$F_{p2} = F_n \left(1 - \frac{nf_{cp}}{f} \right),$$

где $n = f_{min} / f_{cp} < 1$ – коэффициент.

График функции показан на рисунке 1 (кривая 3). Кривая 3, как и кривая 2, имеет общую точку с кривой 1 с координатами $(nf_{cp} / (1 - Cnf_{cp}), F_n Cnf_{cp})$. Очевидно, что с увеличением коэффициента n абсцисса точки пересечения также увеличивается. Кривая 2 построена при $n=0,3$.

Для рассматриваемого случая разность составляет:

$$\Delta F_p = F_{p1} - F_{p2} = F_n \frac{nf_{cp}(1 + Cf) - f}{f(1 + Cf)}.$$

Применив ранее использованный прием, найдем:

$$\Delta F_p \Delta F'_p = \frac{(1 - 2Cnf_{cp})Cnf_{cp}}{2(1 + Cnf_{cp})} F_n^2, \quad (7)$$

где параметр ΔF_p вычислен при значении $f = f_{min} = nf_{cp}$, а $\Delta F'_p$ – при $f = f_{max} = 1/C$.

Изменение значения коэффициента трения f_{cp} сопровождается, как правило, непропорциональным изменением f_{min} , поэтому в общем случае выражение (7) представляет функцию двух переменных – f_{cp} и n .

Частные производные первого порядка функции (7) имеют вид

$$(\Delta F_p \Delta F'_p)'_{f_{cp}} = \frac{Cn[1 - 4Cnf_{cp} - 2(Cnf_{cp})^2]}{2(1 + Cnf_{cp})^2} F_n^2,$$

$$(\Delta F_p \Delta F'_p)'_n = \frac{Cf_{cp}[1 - 4Cnf_{cp} - 2(Cnf_{cp})^2]}{2(1 + Cnf_{cp})^2} F_n^2,$$

тогда стационарные точки функции $(0, 225 / (Cn), 0, 225 / (Cf_{cp}))$.

Соответственно частные производные второго порядка равны:

$$(\Delta F_p \Delta F'_p)''_{f_{cp}} = -\frac{3C^2 n^2}{(1 + Cnf_{cp})^3} F_n^2,$$

$$(\Delta F_p \Delta F'_p)''_n = -\frac{3C^2 f_{cp}^2}{(1 + Cnf_{cp})^3} F_n^2.$$

Смешанная частная производная второго порядка имеет вид

$$\begin{aligned} (\Delta F_p \Delta F'_p)''_{f_{cp}, n} &= \\ &= \frac{C - 9C^2 nf_{cp} - 6C^3 n^2 f_{cp}^2 - 2C^4 n^3 f_{cp}^3}{2(1 + Cnf_{cp})^3} F_n^2. \end{aligned}$$

Величина $nf_{cp} = f_{min}$ для материалов фрикционных пар, применяемых в АФМ, не превышает, по литературным данным [6, 7], значения $f_{min} = 0,1$, а величина $f_{max} = 1$. Учитывая, что $C = 1 / f_{max}$, и приняв среднее значение $f_{max} = 0,8$, при котором $C = 1,25$, можно пренебречь двумя последними членами числителя ввиду их малости.

Тогда имеем:

$$\begin{aligned} (\Delta F_p \Delta F'_p)''_{f_{cp}} (\Delta F_p \Delta F'_p)''_n - [(\Delta F_p \Delta F'_p)''_{f_{cp}, n}]^2 &= \\ &= \frac{(18C^3 nf_{cp} - 45C^4 n^2 f_{cp}^2 - C^2)}{4(1 + Cnf_{cp})^6} F_n^4 = \\ &= \frac{C^2 (18Cnf_{cp} - 45C^2 n^2 f_{cp}^2 - 1)}{4(1 + Cnf_{cp})^6} F_n^4. \end{aligned}$$

Очевидно, что знак полученного выражения будет определяться знаком разности в скобках числителя. Решение неравенства вида:

$$-45C^2 n^2 f_{cp}^2 + 18Cnf_{cp} - 1 > 0$$

дает

$$\frac{1}{15nf_{cp}} < C < \frac{1}{3nf_{cp}}.$$

Для стационарных точек полученное неравенство преобразуется к виду:

$$\frac{0,153}{nf_{cp}} < C < \frac{0,765}{nf_{cp}}.$$

Из последнего неравенства следует, что при реальных значениях $f_{min} \leq 0,1$ $C > 1,5$, то есть $f_{max} \leq 0,66$. В этом случае при $n=0,3$ получим $f_{cp} = 0,5$. Полученные значения устанавливают предельные трибологические характеристики фрикционных пар, при которых функция (7) имеет в стационарных точках локальный максимум.

Для большинства материалов фрикционных пар, применяемых в АФМ, указанная величина f_{max} не является предель-

ной, вследствие чего условие существования локального максимума не выполняется, однако общий характер изменения функции – возрастание сохраняется.

Анализ стационарной точки показывает, что при реальных значениях $C=1...1,25$ и $n=0,3...0,4$ значение коэффициента трения $f_{cp}=0,75...0,45$, т. е. принимает предельные значения для фрикционных пар.

Таким образом, настройка «идеальной» АФМ по минимальному коэффициенту трения приводит к необходимости уменьшения величины среднего коэффициента трения для повышения эффективности работы реальной АФМ.

Произведем сопоставление рассмотренных методов настройки, для чего составим неравенство:

$$F_n^2 \left[\frac{(1-Cf_{cp})Cf_{cp}}{2(1+Cf_{cp})(1+2Cf_{cp})} - \frac{(1-2Cnf_{cp})Cnf_{cp}}{2(1+Cnf_{cp})} \right] > 0. \quad (8)$$

Сделав некоторые преобразования выражения в квадратных скобках, получим следующее квадратное относительно n неравенство

$$2Cf_{cp}(1+Cf_{cp})(1+2Cf_{cp})n^2 - (1+2Cf_{cp}+2C^2f_{cp}^2)n + (1-Cf_{cp}) > 0,$$

дискриминант, которого равен:

$$D = (1-4C^2f_{cp}^2)(1-4Cf_{cp}-4C^2f_{cp}^2) + 4C^4f_{cp}^4.$$

Анализ показывает, что $D < 0$ при $0,207/C < f_{cp} < 0,5/C$. При $f_{cp} \leq 0,5/C$ и при $f_{cp} \leq 0,207/C$ выполняется неравенство $D > 0$.

Таким образом, неравенство (8) удовлетворяется: а) в случае, когда выполняются следующие условия: $0,5/C > f_{cp} > 0,207/C$, т. е. $n \in R$, где R – область всех действительных чисел; б) в случае, когда $f_{cp} > 0,5/C$ и $f_{cp,2} < 0,207/C$, т. е. $n > 0,5$, $n < 0,33$ и $n > 1,06$, $n < 0,99$ соответственно; в) в случае, когда $f_{cp,1} > 0,5/C$ и $f_{cp,2} < 0,207/C$

$$n \in \left(> \frac{A+\sqrt{D}}{B} \right) U \left(< \frac{A-\sqrt{D}}{B} \right),$$

где $A = 1 + 2Cf_{cp} + 2C^2f_{cp}^2$;

$$B = 4Cf_{cp}(1+Cf_{cp})(1+2Cf_{cp}).$$

Рассмотрим, наконец, случай, когда настройка «идеальной» АФМ производится таким образом, что обеспечивается равенство распорных сил «идеальной» АФМ и муфты первого поколения при значении коэффициента трения f_{min} .

Предельный вращающий момент, передаваемый АФМ первого поколения при значении коэффициента трения f_{min} , равен:

$$T_{nmin} = \frac{zF_n R_{cp} f_{min}}{1+Cf_{min}}.$$

Приравняв это выражение правой части (1), решим полученное уравнение относительно неизвестного члена F_p :

$$\begin{aligned} F_{p3} &= F_n \left[1 - \frac{f_{min}}{f(1+Cf_{min})} \right] = \\ &= F_n \left[1 - \frac{nf_{cp}}{f(1+Cnf_{cp})} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Разность между рассматриваемыми силами «идеальной» АФМ и АФМ первого поколения равна:

$$\Delta F_p = F_{p3} - F_{p1} = F_n \frac{f - nf_{cp}}{f(1+Cf)(1+Cnf_{cp})}.$$

Из полученного выражения следует, во-первых, что $F_{p3} > F_{p1}$ в интервале изменения коэффициента трения, кроме значения $f = f_{min}$, во-вторых, что функция $\Delta F_p(f_{cp})$ является убывающей.

Сравнительная оценка методов настройки АФМ

При рассмотрении эффективности методов настройки АФМ необходимо оценивать степень приближения кривых распорных сил «идеальной» и реальной АФМ, вычисленных на границах интервала изменения распорной силы «идеальной» АФМ.

Сравнительный анализ первых двух

методов настройки, проведенный с использованием упомянутого параметра и показавший преимущество второго метода, непригоден для оценки третьего метода настройки, так как данный параметр в этом случае обращается в нуль вследствие равенства распорных сил «идеальной» и реальной АФМ при значении f_{\min} .

Поскольку эффективность работы АФМ оценивается точностью срабатывания, определяемой отношением максимального и минимального вращающих моментов, следовательно, и отношением соответствующих распорных сил, а точность срабатывания реальной АФМ оценивается степенью приближения графиков распорных сил «идеальной» и реальной АФМ, целесообразно сохранить составляющие указанного параметра. Новая форма параметра должна адекватно представлять оценку точности срабатывания АФМ. Этому требованию удовлетворяет параметр, представляющий сумму разностей распорных сил, взятых на границах интервала изменения распорной силы «идеальной» АФМ, то есть $\sum \Delta F_p \Big|_{F_p=0}^{f_{\max}}$ для первого и второго методов настройки и $\sum F_p \Big|_{f_{\min}}^{f_{\max}}$ для третьего метода. Действительно, функции $F_p(t)$ являются монотонными (рисунок 1), поэтому уменьшение разностей ΔF_p на границах интервала в отдельности приводит к сближению кривых «идеальной» и реальной АФМ для любого значения f внутри интервала изменения F_p , т. е. к оптимизации функции $F_p(t)$ реальной АФМ, а уменьшение суммы, являясь также косвенной характеристикой сближения графиков, – к повышению точности срабатывания АФМ. Следовательно, принятый параметр в определенной степени представляет аналог коэффициента точности срабатывания [4].

На основании изложенного выше получим:

– для первого метода настройки АФМ

$$\sum \Delta F_p \Big|_{F_p=0}^{f_{\max}} = \frac{1+3Cf_{cp}}{2(1+Cf_{cp})(1+2Cf_{cp})} F_{\diamond}, \quad (10)$$

– для второго метода настройки:

$$\sum \Delta F_p \Big|_{F_p=0}^{f_{\max}} = \frac{1+Cnf_{cp} - 2C^2n^2f_{cp}^2}{2(1+Cnf_{cp})} F_{\diamond}, \quad (11)$$

– для третьего метода настройки

$$\sum \Delta F_p \Big|_{f_{\min}}^{f_{\max}} = \frac{1-Cnf_{cp}}{2(1+Cnf_{cp})} F_{\diamond}. \quad (12)$$

Критерием эффективности метода настройки является наименьшее значение $\sum \Delta F_p$. Сравнение параметров для различных методов настройки показывает, что величина $\sum \Delta F_p$ для второго метода настройки меньше, чем для первого метода. Что касается сопоставления второго и третьего методов, то положительная разность между соответствующими параметрами очевидна.

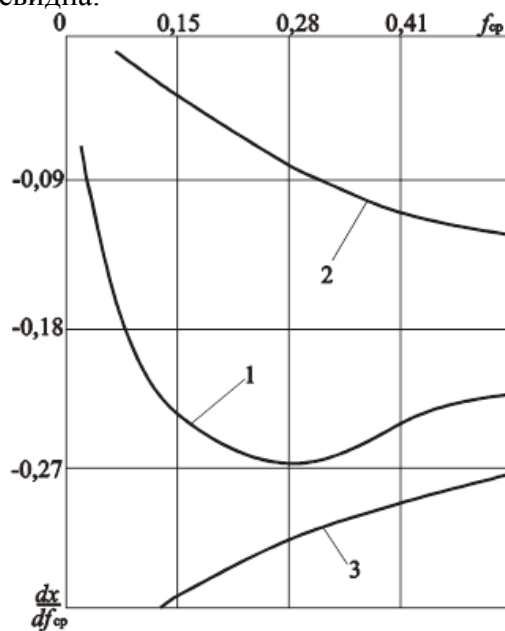


Рисунок 2. Фазовые траектории функций (10) – (12)

Другим критерием эффективности служит скорость и вектор изменения параметра при варьировании значения f_{cp} . В этом случае наиболее приемлемым будет метод настройки, который обеспечивает уменьшение параметра $\sum \Delta F_p$ с наибольшей скоростью. Для выявления наилучшего метода настройки воспользуемся способом исследования на основе анализа производных, которые, как известно, характеризуют

скорость изменения функции.

Производные функций (10) – (12) соответственно равны:

$$\frac{d \sum \Delta F'_p}{df_{cp}} = - \frac{C^2 f_{cp} (2 + 3Cf_{cp})}{(1 + Cf_{cp})^2 (1 + 2Cf_{cp})^2} F_n,$$

$$\frac{d \sum \Delta F''_p}{df_{cp}} = - \frac{C^2 n^2 f_{cp} (2 + Cnf_{cp})}{(1 + Cnf_{cp})^2} F_n,$$

$$\frac{d \sum \Delta F'''_p}{df_{cp}} = - \frac{Cn}{(1 + Cnf_{cp})^2} F_n.$$

Все производные отрицательны, следовательно, функции (10) – (12) убывающие. Для оценки скорости убывания функций воспользуемся рассмотрением фазовых траекторий, изображенных на рисунке 2 (кривые 1–3 соответствуют порядковым номерам функций (10) – (12), а $x = d \sum \Delta F_p / df_{cp} \times 1 / F_n$). Впрочем, сравнительную оценку второго и третьего методов настройки можно достаточно легко произвести на основании аналитического решения неравенства:

$$\frac{d \sum \Delta F''_p}{df_{cp}} - \frac{d \sum \Delta F'''_p}{df_{cp}} < 0,$$

что дает $f_{cp} < 0,414 / (Cn)$.

При реальной минимальной величине $n=0,3$ [6, 7] значения коэффициента трения f_{cp} , удовлетворяющие неравенству, принадлежат области возможных его значений, поэтому скорость изменения функции (12) всегда выше скорости изменения функции (11), что и подтверждается графиком.

Графики показывают, что модуль производной функции (12) обладает наибольшей скоростью убывания при всех реальных значениях.

Полученные результаты позволяют применять их в практике расчета АФМ для выбора оптимального сочетания материалов пар трения в зависимости от величины коэффициента усиления обратной связи.

Выводы

1. Получены математические зависимости, отражающие оптимальные закономерности изменения управляющего

воздействия при колебаниях коэффициента трения между фрикционными парами «идеальной» АФМ. Зависимости позволяют оценить уровень надежности реальных представителей АФМ первого поколения путем сопоставления управляющих воздействий и выявить параметр, воздействуя на который, можно оптимизировать закон изменения управляющего воздействия для повышения точности срабатывания реального АФМ первого поколения. Приведенные подходы позволяют распространить данную методику на оптимизацию закономерности изменения управляющего воздействия АФМ последующих поколений.

2. Выявлен критерий оптимизации закона изменения распорной силы в форме минимума произведения разностей управляющих воздействий «идеальной» и реальной АФМ первого поколения, взятых на границах интервала $F_p = 0 \dots$

$F_p = F_{p,max}$. Указанный критерий целесообразно применять в тех случаях, когда управляющее воздействие «идеальной» АФМ обращается в ноль внутри интервала изменения коэффициента трения или на одной из его границ.

3. Установлено, что большое влияние на надежность работы АФМ оказывает величина среднего коэффициента трения, причем характер влияния зависит от метода настройки АФМ. В случае настройки по среднему коэффициенту трения предпочтительным является его увеличение от значения $f_{cp,min} = 0,29 / C$; при настройке по минимальному коэффициенту трения – уменьшение. Метод настройки, который обеспечивает равенство управляющих воздействий «идеальной» и реальной АФМ при $f = f_{min}$, позволяет повысить надежность при безусловном увеличении f_{cp} .

4. На основе принятого критерия эффективности метода настройки АФМ в форме суммы разностей управляющих воздействий «идеальной» и реальной АФМ первого поколения на границах

интервала изменения управляющего воздействия «идеальной» АФМ установлено, что при настройке, обеспечивающей равенство управляющих воздействий на нижней границе, достигаются наилучшее приближение и скорость приближения закономерностей изменения управляющих воздействий «идеальной» и реальной АФМ во всем интервале.

Библиографический список

1. Шишкарев М.П., Чан Ван Дык. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 9. – С. 25–32.
2. Шишкарев М.П. Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения // Изв. вузов. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 14–17.
3. Шишкарев М.П. Влияние величины коэффициента усиления на массу адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 2. – С. 88–93.
4. Поляков В.С., Барбаш И.Д. Муфты. Конструкции и расчет. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1973. – 336 с.
5. Спиваков В.Д. Настройка фрикционно-шариковой муфты предельного момента // Судостроение. – 1963. – № 11. – С. 19–21.
6. Афанасьев М.К. Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки: Автореф. дис...канд. техн. наук: Спец. 05.02.02. – Киев, 1971. – 21 с.
7. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. – М.: Машгиз, 1962. – 218 с.
8. Шишкарев М.П. Распределение нагрузки в муфте Н.Д. Вернера и выбор ее параметров // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 8–11.
9. Запороженко Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.

Information about the paper in English

M.P. Shishkarev
Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russia
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Receipt date: October 07, 2023

THE OPTIMAL PATTERN OF THE CHANGE IN THE SPACER FORCE AND IMPROVING THE RELIABILITY OF ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES

Abstract

The paper presents the results of a study of the reliability of first-generation adaptive friction clutches in the context of establishing the optimal pattern of changes in the thrust force of the feedback control device depending on the friction coefficient. A criterion for optimizing this pattern has been found in the form of the minimum product of the differences between the spacer forces of the “ideal” and real adaptive friction clutch, taken at the boundaries of the intervals of their change, and the condition for applying the introduced criterion has been set.

Keywords: adaptive friction clutch, reliability, first generation, optimization, friction coefficient.
