

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ (ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ)

Шишкарев М.П.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Аннотация.** Приведена методика расчета адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием (первый вариант). Показаны особенности расчета значений параметров управляющего устройства муфты для обеспечения наиболее высокой точности срабатывания при заданной номинальной нагрузочной способности. Даны пояснения при расчете значений параметров управляющего устройства в зависимости от формы нагрузочной характеристики муфты.

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, отдельное замыкание, второе поколение, методика, расчет, проектирование, коэффициент трения, коэффициент усиления.

### Calculation and design of adaptive friction second-generation couplings (first version)

Shishkarev M. P.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Abstract.** The method of calculating an adaptive friction clutch with a separate power closure (the first option) is given. The features of calculating the values of the clutch control device parameters to ensure the highest accuracy of operation at a given nominal load capacity are shown. Explanations are given when calculating the values of the control device parameters depending on the shape of the load characteristic of the coupling.

**Keywords:** adaptive friction clutch, separate closure, second generation, methodology, calculation, design, the friction coefficient, the gain coefficient.

**Состояние вопроса.** В работах [1, 2, 3, 4] показаны зависимости веса и размеров муфт от точности срабатывания. Установлено, что данные показатели повышаются с увеличением точности срабатывания. На габаритные размеры и вес муфты влияет место ее установки в приводе [5]. В зависимости от редукторов в приводе передаваемая нагрузка будет различной, что влияет на вес и габаритные размеры адаптивной фрикционной муфты (АФМ).

Выбор места установки муфты в приводе зависит от сложности кинематической цепи и выбранной стратегии защиты узлов и участков привода.

**Задачей исследования** является разработка методики расчета АФМ с отдельным замыканием в зависимости от технических характеристик привода.

**Решение задачи.** Предохранительное устройство обеспечивает защиту части привода от двигателя до муфты [6, 7]. Эффективная защита обеспечивается при скорости увеличения перегрузки, большей или равной скорости ударной волны [8]. При скоростях нарастания перегрузки, существенно меньших скорости ударной волны, муфта защищает практически весь привод. В связи с этим, исходным данным для расчета устройства является характер перегрузок.

Прежде всего, необходимо определить участок привода, защищаемый муфтой, и снижение веса входящих в него элементов при повышении точности срабатывания АФМ. Одновременно с этим оценивается относительное увеличение веса муфты.

Вращающий момент  $T_n$  муфты представляет собой второе исходное данное для расчета.

Учитывая особенности привода, устанавливаются максимальные габаритные размеры муфты (длина  $L$ , диаметр  $D$ ). Исходя из этих данных, назначается наружный диаметр диска трения  $D_n = D - 0,15D$ .

Определяется средний радиус дисков трения ОФГ и ДФГ  $R_{cp}$  по формуле, полученной в работе [9]:

$$R_{cp} = 0,5(R_n + R_b), \quad (1)$$

$$R_b = (1 - \psi)R_{cp}, \quad (2)$$

где  $\psi$  – коэффициент ширины диска, обычно принимается равным 0,25 [10].

$$R_n = (1 + \psi)R_{cp}, \quad (3)$$

$$R_{cp} = \frac{R_n}{1 + \psi}, \quad (4)$$

Настроечное значение минимального коэффициента трения  $f_{min} = 0,1$  принимается в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [11].

Принимается значение коэффициента трения  $f_{max}$ , исходя из выбранных материалов поверхностей трения, на основе экспериментальных исследований [12]. Значение  $f_{max}$  зависит, в первую очередь, от эксплуатационных показателей муфты.

Определяют предельное усилие  $F_n$ :

$$[F_n] = 0,9[q]S, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь рабочей поверхности диска;  $[q]$  – предельное давление; 0,9 – поправочный коэффициент.

Материалы пары трения подбираются по предельному давлению  $[q]$ . Выбор материалов производится с учетом их теплостойкости и теплопроводности. Также при выборе материалов учитывают интенсивность продуктов износа для исключения эффекта "наволакивания" материала на контртело.

Вычисляется ширина диска по формуле  $b = 0,25R_{cp}$  [13].

Учитывая осевые размеры муфты, определяют общее число пар ОФГ –  $z$ , ДФГ –  $z_1$ , число пар трения, связанных с ведущей полумуфтой  $z_2$ .

С учетом числа пар трения ОФГ и ДФГ вычисляется суммарная толщина фрикционных дисков, с учетом рекомендаций [14], относящихся к фрикционным муфтам.

Определяется значение коэффициента  $n$ , равного отношению сил натяжения пружин:

$$n_{max} = \frac{2(z - z_2) + z}{2z_1}. \quad (6)$$

Определяется предельное значение КУ по формуле:

$$C = \frac{1}{z_1(1 - n)f_{max}}. \quad (7)$$

Учитывая предельное значение КУ, а также требуемую нагрузочную способность устройства, назначается нагрузочная характеристика муфты из следующих двух форм:

- монотонно возрастающая кривая в интервале  $f_{min} \dots f_{max}$ ;
- кривая с точкой максимума в указанном интервале.

В случае передачи большого вращающего момента в месте установки муфты предпочтительна первая форма нагрузочной характеристики. При ограниченных габаритных размерах и массе привода предпочтительной является вторая форма нагрузочной характеристики.

Значение вращающего момента, передаваемого АФМ, может быть определено на основе соотношения, найденного в работе [15]:

$$T_n = F_n R_{cp} f_{min} \frac{z - z_1(1 - n)(z_2 C f_{min} - 1)}{1 + (z - z_2) C f_{min}}, \quad (8)$$

где  $R_{cp}$  – средний радиус пар трения ОФГ;  $f_{min}$  – минимальное значение коэффициента трения;  $F_n$  – см. выше.

Значение КУ для указанных нагрузочных характеристик определяется на основе формулы для коэффициента трения, при котором вращающий момент максимальный [16]:

$$f_k = f_{max} = \frac{\sqrt{1 + (z - z_2)[z + z_1(1 - n)]/[z_1 z_2(1 - n)]} - 1}{(z - z_2)C}, \quad (9)$$

Для первой формы значение КУ вычисляется по выражению:

$$C = \frac{\sqrt{1 + (z - z_2)[z + z_1(1 - n)]/[z_1 z_2(1 - n)]} - 1}{(z - z_2)f_{max}}, \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что с ростом  $n$  значение КУ увеличивается, т. е. варьирование усилий замыкания ОФГ и ДФГ требует увеличения КУ в том случае, если это соотношение приближается к единице [17].

Точность срабатывания муфты повышается с увеличением КУ и  $n$  [18].

Значение  $n$  выбирается на основе наибольшей номинальной нагрузочной способности и точности срабатывания муфты.

Оптимальное соотношение усилий замыкания ОФГ и ДФГ выполняется при неизменной силе  $F_n$ , либо увеличении ее и силы  $F_{n1}$  на большую, чем  $F_n$ , величину. Это объясняется тем, что при положительном двучлене  $z_2 C f_{\min} - 1$  в соотношении (8) не снижается номинальный вращающий момент.

Упомянутый двучлен будет положительным, когда:

$$z_2 > \frac{1}{C f_{\min}}. \quad (11)$$

Если  $z_2 = 1$ , то значение КУ должно удовлетворять следующему минимальному ограничению:

$$C > \frac{1}{f_{\min}}. \quad (12)$$

Как установлено в работе [15], предельное значение КУ для рассматриваемой АФМ вычисляется на основе следующей формулы:

$$C = \frac{1}{z_1(1-n)f_{\max}}. \quad (13)$$

Для увеличения предельного значения КУ и точности срабатывания муфты обычно принимают  $z_1 = 1$ . Тогда, с учетом соотношений (4.12) и (4.13) найдем ограничение значения коэффициента  $n$ :

$$n > \frac{m-1}{m}, \quad (14)$$

где  $m = f_{\max} / f_{\min}$  – относительная ширина интервала изменения значений коэффициента трения.

При  $m = 8$ , с учетом соотношения (14), имеем  $n > 0,875$ .

В АФМ второго поколения параметр предельное значение КУ не зависит от параметра  $z_2$ , в связи с чем при максимальном ограничении КУ можно, с учетом выражения (11), найти минимальное ограничение параметра  $z_2$ .

Оптимизацию выбора соотношения усилий замыкания ОФГ и ДФГ произведем с помощью критерия, предложенного в работе [18]. Критерий предусматривает комплексную оценку характеристик муфты по оптимальной нагрузочной способности и точности срабатывания при помощи коэффициента оценки:

$$k_o = \frac{T_{н.у}}{k_t}, \quad (15)$$

где  $T_{н.у}$  – условный номинальный момент;  $k_t$  – коэффициент точности.

Из формулы (15) следует, что наилучшее сочетание характеристик АФМ соответствует наибольшему значению  $k_o$ .

Для рассматриваемой муфты вращающий момент  $T_{н.у}$  вычисляется по формуле:

$$T_{н.у} = f_{\min} \frac{z - z_1(1-n)(z_2 C f_{\min} - 1)}{1 + (z - z_2) C f_{\min}}, \quad (16)$$

а коэффициент точности (при выбранной нагрузочной характеристике) – по выражению:

$$k_t = \frac{f_{\max} [z - z_1(1-n)(z_2 C_1 f_{\max} - 1)] [1 + (z - z_2) C_1 f_{\min}]}{f_{\min} [z - z_1(1-n)(z_2 C_1 f_{\min} - 1)] [1 + (z - z_2) C_1 f_{\max}]}. \quad (16)$$

Используя соотношения (10) и (11) в формуле (9), получаем:

$$k_o = \frac{f_{\min}^2 [z - z_1(1-n)(z_2 C f_{\min} - 1)]^2 [1 + (z - z_2) C f_{\max}]}{f_{\max} [z - z_1(1-n)(z_2 C f_{\max} - 1)] [1 + (z - z_2) C f_{\min}]^2}. \quad (17)$$

Для выбора соотношения усилий замыкания применим графический способ.

На рисунке показаны графики зависимости (17) с использованием исходных данных:  $f_{\min} = 0,1$ ,  $f_{\max} = 0,8$ ,  $z = 6$ ,  $z_1 = 1$ ,  $z_2 = 1$ . При построении графиков 1 и 2 принято  $C = 1,78$ , согласно соотношению (10) при  $n = 0,5$ , при построении графика 2 использованы переменные значения КУ, вычисленные по формуле (13).

Кривая 3 построена при множителе в числителе формулы (17) по значениям: 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5. Использование множителя означает увеличение силы  $F_n$  при изменении коэффициента  $n$  и силы  $F_{n1}$ .

Графики показывает следующее:

- увеличение коэффициента  $n$  приводит к снижению характеристик муфты (кривые 1 и 2);
- одновременное увеличение сил  $F_n$  и  $F_{n1}$  целесообразно применять в определенном интервале изменения коэффициента  $n$  (в данном случае  $n = 0,65 \dots 0,75$ , кривая 3).

Для второй формы кривой нагрузочной характеристики значение КУ вычисляется по следующему:

$$C = \frac{\sqrt{(m+1)^2 + 4m(z-z_2)[z+z_1(1-n)]/[z_1z_2(1-n)]} - (m+1)}{2(z-z_2)f_{\max}}. \quad (18)$$

Из соотношения (18) следует, что с увеличением  $n$  возрастает значение КУ. С точки зрения механики, при изменении соотношения усилий замыкания необходим больший КУ, если соотношение увеличивается и приближается к единице.

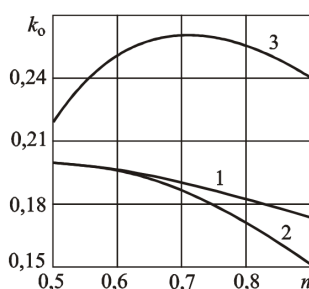


Рисунок. Зависимости коэффициента оценки от коэффициента  $n$

Вместе с увеличением КУ при росте значения коэффициента  $n$  повышается точность срабатывания АФМ.

Критерием выбора значения коэффициента  $n$  будем считать такое его значение, при максимальные нагрузочная способность и точность срабатывания муфты.

Требование оптимизации соотношения усилий замыкания аналогично при первой форме нагрузочной характеристики.

**Обсуждение и результаты.** Результаты исследования показали, что при расчетах и выборе взаимозависимых параметров управляющего устройства АФМ, согласно найденным теоретическим зависимостям, можно добиться высокой точности срабатывания муфты при назначенной номинальной нагрузке и обеих формах нагрузочной характеристики.

Результаты исследования могут быть использованы при синтезе АФМ с отдельным силовым замыканием (первый вариант).

**Вывод:** При синтезе взаимозависимых параметров управляющего устройства АФМ, согласно найденным теоретическим зависимостям, можно добиться высокой точности срабатывания муфты при назначенной номинальной нагрузке и обеих формах нагрузочной характеристики.

#### Список литературных источников

1. Поляков, В.С. Справочник по муфтам // В.С. Поляков, И.Д. Барбаш, О.А. Ряховский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. – 352 с.
2. Есипенко, Я.И. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки // Я.И. Есипенко, А.З. Паламаренко, М.К. Афанасьев. – Киев: Техніка, 1972. – 168 с.
3. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания / Р.М. Запорожченко // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.
4. Гавриленко, М.Д. Определение параметров отрицательной обратной связи адаптивной фрикционной муфты // М.Д. Гавриленко // В сборнике: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Сборник статей 11-й международной научно-практической конференции в рамках 21-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш – 2018». 2018. С. 97-101.
5. Гавриленко, М.Д. Анализ и задачи исследования применения положительной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // М.Д. Гавриленко // В сборнике: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Сборник статей 10-й Международной юбилейной

научно-практической конференции в рамках 20-й Международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2017». 2017. С. 661-665.

6. Компонентные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами / М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2003. – № 7. – С. 7–12.

7. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13–15.

8. О функциях адаптивных предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 7. – С. 7–8.

9. Гавриленко, М.Д. Исследование адаптивного фрикционного контакта 1-го поколения // М.Д. Гавриленко, А.Е. Фокин // В книге: Машиностроение. Сборник научных статей. ГОУ ВПО КубГТУ, ООО «Издательский Дом - Юг». Краснодар, 2009. С. 46-50.

10. Запороженко Р.М. К вопросу об эффективности фрикционных предохранительных муфт с точки зрения снижения веса приводов // Вестн. Харьк. политех. ин-та. – 1971. – Вып. I.XIV, № 58. – С. 16–19.

11. Бойко, Н.И. Исследование точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты в особом режиме нагружения // Н.И. Бойко, М.Д. Гавриленко // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 2 (27). С. 93.

12. Гавриленко, М.Д. Анализ точности срабатывания и направления совершенствования адаптивных фрикционных муфт // М.Д. Гавриленко // В сборнике: Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции в рамках XXII Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаш». Донской государственный технический университет, Аграрный научный центр «Донской». Ростов-на-Дону, 2019. С. 545-549.

13. Шишкарев, М.П. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет. Монография // М.П. Шишкарев, А.А. Лущик, А.Ю. Угленко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.

14. Особенности процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 3–7.

15. Соловьева, К.В. О применимости V-образных упругих элементов в адаптивных фрикционных муфтах с положительной обратной связью // К.В. Соловьева, М.Д. Гавриленко // В сборнике: Юбилейная конференция студентов и молодых ученых, посвященная 85-летию ДГТУ. Сборник докладов научно-технической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет». 2015. С. 3614-3634.

16. Жуков, К.П. Проектирование деталей и узлов машин //К.П. Жуков, Ю.Е. Гуревич // – М.: Изд-во «Станкин», 1999. – 615 с.

17. Тепинкичиев, В.К. Предохранительные устройства от перегрузки станков // В.К. Тепинкичиев // . – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 112 с.

18. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // М.П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.

Работа выполнена в рамках инициативной НИР.