

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.838.222
doi: 10.30987/2782-5957-2022-6-11-21

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Михаил Павлович Шишкарёв¹, Максим Дмитриевич Гавриленко^{2✉}

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

¹ shishkarev_m_p@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6562-6870

² aaakot@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0392-3452

Аннотация

Цель исследования: определение условий обеспечения высокой надежности адаптивных фрикционных муфт с положительной обратной связью, теоретически обеспечивающих полную стабилизацию предельного вращающего момента муфты.

Задача, решению которой посвящена статья. Изложение содержательных аспектов различных этапов исследования принципа косвенного регулирования, применяемого в муфтах и установление параметров дополнительного управляющего устройства, обеспечивающих полную стабилизацию предельного вращающего момента муфты.

Методы исследования. Разработанные и ранее примененные элементы основ теории полной стабилизации предельного вращающего момента адаптивной предохранительной фрикционной муфты позволили создать базу знаний в виде частных математических моделей, которые локально описывают процесс автоматического регулирования в изучаемом объекте. На основе анализа примененного метода математического моделирования установлена принципиальная возможность применения

положительной обратной связи в муфтах для обеспечения их высокой надежности.

Новизна работы. Обеспечение высокой стабилизация предельного вращающего момента возможно за счет использования постоянного передаточного числа передаточного механизма управляющего устройства и переменного значения коэффициента усиления обратной связи.

Результаты исследования. Применение положительной обратной связи с косвенным регулированием, теоретически позволяет обеспечить высокую надежность предохранительной муфты третьего поколения.

Выводы: для реализации высокой надежности адаптивных фрикционных муфт третьего поколения требуется обеспечение найденных функциональных связей между прижимной силой, коэффициентом усиления обратной связи и передаточным отношением передаточного механизма.

Ключевые слова: муфта, связь, управляющее устройство, точность, срабатывание, коэффициент, трение.

Благодарности: авторы выражают благодарность редакции журнала «Транспортное машиностроение».

Финансирование: работа выполнена в инициативном порядке.

Ссылка для цитирования:

Шишкарёв М.П. Повышение точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт с положительной обратной связью / М. П. Шишкарёв, М. Д. Гавриленко // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 6. – С. 11–20. doi: 10.30987/2782-5957-2022-6-11-21.

Original article
Open Access Article

INCREASING THE OPERATION ACCURACY OF THE ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES WITH POSITIVE FEEDBACK

Mikhail Pavlovich Shishkarev¹, Maxim Dmitrievich Gavrilenko^{2✉}

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ shishkarev_m_p@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6562-6870

² aaakot@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0392-3452

The study objective is to determine the conditions for ensuring high reliability of adaptive friction clutches with positive feedback, theoretically providing full stabilization of the clutch break torque.

The problem to which the paper is devoted is the presentation of the substantive aspects of various stages of studying the principle of indirect control used in clutches and the definition of parameters of an additional control device that ensure full stabilization of the clutch break torque.

Research methods. The developed and previously applied theoretical fundamentals of full stabilization of the adaptive friction clutch break torque allowed to create a knowledge base in the form of particular mathematical models that locally describe the process of automatic control in the object under study. Based on the analysis of the applied mathematical modeling method, the principal possibility of using positive

Acknowledgements: the authors express their gratitude to the editorial board of the journal «Transport Engineering».

Funding: the work was carried out on the basis of initiative.

Reference for citing:

Shishkarev MP, Gavrilenko MD. Increasing the operation accuracy of the adaptive friction clutches with positive feedback. *Transport Engineering*. 2022;5:11–20. doi: 10.30987/2782-5957-2022-6-11-21.

Введение

Особенностью автоматического регулирования в адаптивных фрикционных муфтах (АФМ), оснащенных отрицательной обратной связью, является подача на сумматор (нажимной диск муфты) выходного сигнала (распорной силы) устройства обратной связи, который имеет знак, обратный по отношению к выходному сигналу нажимного устройства (силы натяжения нажимной пружины или группы пружин), также подаваемого на вход сумматора [1–4].

Текущее значение результирующей силы, действующей на сумматор, равное положительной разности между упомянутыми силами, зависит от двух факторов: значения вращающего момента, действующего извне на АФМ, и значения коэффициента трения между элементами пар фрикционной группы (ГФ) в рассматриваемый период времени [5–7].

Результирующая сила увеличивается по мере уменьшения коэффициента трения и уменьшается при его увеличении. В этом заключается принцип автоматического регулирования момента сил трения ГФ АФМ. Момент меняется в результате случайного изменения коэффициента трения и наступившей перегрузки в приводе маши-

feedback in clutches to ensure their high reliability is defined.

The novelty of the work. Ensuring high stabilization of the break torque is possible due to the use of a constant gear ratio of the transmission mechanism of the control device and a variable value of the feedback gain.

The results of the study. The use of positive feedback with indirect control theoretically allows to ensure high reliability of the overload clutch of the third generation.

Conclusions: in order to realize the high reliability of adaptive friction clutches of the third generation, it is necessary to ensure the found functional connections between the downforce, the feedback gain and the gear ratio of the transmission mechanism.

Key words: clutch, connection, control device, accuracy, actuation, coefficient, friction.

ны.

Действие отрицательной обратной связи в АФМ резко снижает нагрузочную способность муфты из-за снижения усилия замыкания пар трения ГФ. Для компенсации снижения нагрузочной способности необходимо увеличивать силу натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин), что приводит к росту массы и габаритных размеров муфты.

Упомянутая в работе [8] так называемая «идеальная» АФМ также не лишена подобного недостатка.

Надежность работы АФМ рассматривается в аспекте обеспечения стабильности заданного вращающего момента, что вполне согласуется с понятием надежности изделия, приведенном в работе [9].

В работе [10] приведена синтезированная обобщенная принципиальная блок-схема АФМ с отрицательной обратной связью, а также созданы математические модели высокой надежности АФМ первого поколения [11]. В соответствии с блок-схемой АФМ упомянутые математические модели представлены в виде функциональных зависимостей значений коэффициента усиления (КУ) устройства обратной связи, распорной силы и передаточного

отношения передаточного механизма муфты от коэффициента трения. Все упомянутые зависимости представляют собой нелинейные функции и отражаются графиками возрастающих кривых [12].

В том случае, когда автоматическое регулирование момента сил трения ГФ муфты осуществляется посредством изменения выходного сигнала нажимного устройства, а выходной сигнал устройства обратной связи имеет тот же знак, что и выходной сигнал нажимного устройства,

обратная связь считается положительной [13].

Основным преимуществом применения положительной обратной связи (ПОС) является повышенная номинальная нагрузочная способность АФМ при сохранении той же точности срабатывания, что и у АФМ с отрицательной обратной связью. В этом случае отпадает необходимость в увеличении массы и габаритных размеров муфты.

Материалы, модели, эксперименты и методы

С учетом изложенного обобщенная блок-схема АФМ с ПОС имеет вид, показанный на рис. 1. Фрикционный узел УФ осуществляет связь ведущей полумуфты ПВЦ с ведомой полумуфтой ПВМ. Ве-

дущая полумуфта состоит в общем случае из нажимного узла УН, управляющего устройством ПОС УУ и передаточного механизма ПМ.

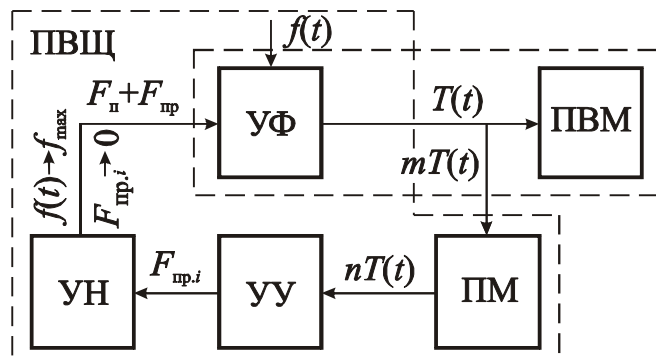


Рис. 1. Структурно-функциональная схема АФМ с положительной обратной связью
 Fig. 1. Structural and functional scheme of the Adaptive Friction Clutch (AFC) with positive feedback

Фрикционный узел является общим для блоков ПВЦ и ПВМ, его отдельные элементы входят в ПВЦ, другие элементы – в ПВМ.

Передаточный механизм (ПМ) предназначен для усиления ($n > 1$) или ослабления ($n < 1$) входного сигнала $nT(t)$ УУ (вращающего момента). Поскольку УУ представляет собой устройство для преобразования входного сигнала, изменение выходного сигнала УУ (прижимной силы $F_{пр.и}$) пропорционально изменению входного сигнала. На вход ПМ, может поступать либо полный выходной сигнал УФ ($m = 1$), либо ослабленный сигнал ($m < 1$). Это зависит от компоновочной схемы фрикционного узла.

Выходной сигнал УУ в форме силы прижатия $F_{пр.и}$ (рис. 1) поступает на вход УН и, воздействуя на упругие силовые элементы (пружины), вызывает изменение их первоначального усилия натяжения $F_н$. Конструктивная схема УУ построена таким образом, что при увеличении коэффициента трения до значения f_{max} (максимальный коэффициент трения), сила прижатия $F_{пр.и}$ уменьшается до нуля. Следовательно, минимальному коэффициенту трения f_{min} соответствует первоначальное усилие замыкания пар трения ГФ, равное силе натяжения пружины $F_н$ (группы пружин).

При действии в АФМ положительной обратной связи запишем формулу

$$T_{n,i} = zR_{cp}f_i(F_n + F_{np,i}), \quad (1)$$

где $T_{n,i}$ – текущий предельный вращающий момент, передаваемый АФМ; z – число пар поверхностей трения ГФ муфты; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения ГФ; f_i – текущий коэффициент трения; $F_{np,i}$ – текущая сила прижатия УУ; F_n – см. выше.

Если в схеме АФМ отсутствует блок ПМ и на вход УУ поступает полный выходной сигнал блока УФ, то в этом случае $m = n = 1$ и выходной сигнал УУ – сила прижатия $F_{np,i}$ определяется по формуле:

$$F_{np,i} = \frac{T_{n,i}}{r} \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (2)$$

где r – радиус окружности расположения нажимных элементов УУ ($r = \text{const}$); α_i – текущий угол давления нажимных элементов, определяющий их положение относительно опорной поверхности в зависимости от коэффициента трения.

Правую часть зависимости (1) подставим в соотношение (2), получаем:

$$F_{np,i} = zC_i f_i (F_n + F_{np,i}), \quad (3)$$

где C_i – КУ ПОС:

$$C_i = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha_i.$$

По условию задачи вращающий момент АФМ постоянный, поэтому, положив, что $T_{n,i} = C_1$ ($C_1 = \text{const}$), умножим обе части равенства (3) на R_{cp} и с учетом формулы (2) найдем:

$$C_i = \frac{1}{zf_i} - \frac{F_n R_{cp}}{C_1}. \quad (4)$$

Формула (4) описывает функциональную связь между КУ АФМ и изменяющимся коэффициентом трения, за счет которой обеспечивается полная стабильность вращающего момента муфты.

Поскольку сила прижатия $F_{np,i}$ УУ убывает с увеличением коэффициента трения, целесообразно принять $F_{np,i} = 0$ при значении f_{\max} . В этом случае будет обес-

печено оптимальное значение контактного давления на поверхностях трения. Постоянный вращающий момент АФМ с учетом этого обстоятельства и формулы (1) равен

$$T_{\max} = C_1 = zF_n R_{cp} f_{\max}. \quad (5)$$

Подставляя правую часть формулы (5) в соотношение (4), получаем:

$$C_i = \frac{1}{z} \left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_{\max}} \right). \quad (6)$$

Формула (6) более удобна для дальнейших исследований, поскольку она не содержит размерных параметров АФМ F_n и R_{cp} . Она показывает, что:

- значение КУ убывает с увеличением коэффициента трения;
- значение КУ обращается в нуль при значении коэффициента трения f_{\max} ;
- значение КУ обратно пропорционально числу пар трения ГФ АФМ.

Если $m \neq 1$ ($m < 1$), то согласно формуле (2) сила прижатия уменьшается в m раз. В этом случае формулу (6) запишем в следующем виде:

$$C'_i = \frac{1}{zm} \left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_{\max}} \right). \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что $C'_i > C_i$. Условие $m < 1$ означает, что фрикционная группа муфты скомпонована по схеме «ведущие пары трения – ведомые пары трения», т. е. часть пар трения (ведущие пары) не участвует в формировании выходного сигнала УУ и передает соответствующую часть вращающего момента на ведомую полумуфту непосредственно от ведущей полумуфты, минуя УУ. Для действия обратной связи необходимо выполнение условия, поставленного в работе [14] и имеющего следующий вид:

$$C''_i \leq \frac{1}{z_1 f_i}, \quad (8)$$

где C''_i – КУ, соответствующий выполнению задачи при указанном условии; z_1 – число ведущих пар трения.

Для рассматриваемого случая запишем:

$$m = 1 - \frac{z_1}{z}. \quad (9)$$

Из соотношения (9) находим:

$$z_1 = (1-m)z.$$

После подстановки последнего выражения в соотношение (8) имеем:

$$C_i'' \leq \frac{1}{z(1-m)f_i}. \quad (10)$$

Условие действия ПОС в режиме автоматического регулирования в данном случае запишем в виде:

$$C_i' \leq C_i''. \quad (11)$$

Используя в соотношении (11) правые части формул (7) и (10), находим величину коэффициента m , удовлетворяющую поставленному условию:

$$m \geq \frac{f_{\max} - f_i}{2f_{\max} - f_i}. \quad (12)$$

Первая производная функции (12) по аргументу f_i имеет вид:

$$D(m)_{f_i} = -f_{\max}.$$

Таким образом, функция (12) убывает в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$, поэтому значение коэффициента m необходимо определять по значению f_{\min} .

В данном случае функция (12) определяется:

$$m \geq \frac{f_{\max} - f_i}{2f_{\max} - f_i} = \frac{p-1}{2p-1}, \quad (13)$$

где p – коэффициент, определяющий относительную ширину интервала изменения коэффициента трения:

$$p = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}.$$

Число ведущих пар трения АФМ, удовлетворяющее условию (13), определяется с использованием соотношения (9):

$$z_1 \leq \frac{p}{2p-1} z.$$

Если в составе АФМ имеется ПМ, то его передаточное отношение при принятых обозначениях равно:

$$u = \frac{n}{m}.$$

В целях упрощения конструкции ПМ положим, что $u = \text{const}$. Для уменьшения давления на поверхностях трения будем

считать ПМ повышающей передачей, т. е. $u > 1$.

С учетом ПМ в составе АФМ формулу (6) запишем в следующем виде:

$$C_i''' = \frac{1}{zn} \left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_{\max}} \right). \quad (14)$$

Согласно поставленному выше условию $n > m$, поэтому $C_i' > C_i'''$. Для АФМ с дифференцированными парами трения и с ПМ значение КУ будет меньше, значение КУ в АФМ со всеми ведущими парами трения, если $n > 1$.

Закономерность изменения силы прижатия $F_{\text{пр.}i}$, выполнение которой обеспечивает стабильность вращающего момента АФМ, можно установить, используя формулу (1). Учитывая, что вращающий момент $T_{\text{n.}i}$ постоянный и равен вращающему моменту неадаптивной фрикционной муфты, т. е. муфты без обратной связи, при значении $f_i = f_{\max}$, на основании формулы (1) получаем:

$$F_{\text{пр.}i} = F_{\text{n}} \left(\frac{f_{\max}}{f_i} - 1 \right). \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что при значении $f_i = f_{\max}$ получаем $F_{\text{пр.}i} = 0$. Этот вывод соответствует формулам (7) и (14), поскольку при указанном значении коэффициента трения КУ также равен нулю, что свидетельствует об отсутствии в данных условиях обратной связи. Максимальная сила $F_{\text{пр.}i}$ соответствует значению коэффициента трения $f_i = f_{\min}$.

Если в схеме АФМ отсутствует ПМ и на вход УУ поступает часть полного вращающего момента муфты, закономерность изменения силы $F_{\text{пр.}i}$ можно найти на основе соотношения (2). В данном случае соотношение (2) с учетом формулы (1) запишем в следующем виде:

$$F_{\text{пр.}i} = zmC_i f_{\max} (F_{\text{n}} + F_{\text{пр.}i}). \quad (16)$$

Формула (16) связывает между собой переменные $F_{\text{пр.}i}$ и C_i . Для установления непосредственной связи между параметрами $F_{\text{пр.}i}$ и f_i преобразуем формулу (16) к следующему виду:

$$F_{\text{пр.}i} = \frac{zmF_n C_i f_{\text{max}}}{1 - zmC_i f_{\text{max}}},$$

и подставим в последнее выражение правую часть формулы (7). В результате получаем выражение, идентичное выражению (15). Это свидетельствует о том, что для передачи вращающего момента, равного C_1 , при увеличенном в $1/m$ раз КУ (согласно формуле (7)) требуется та же сила прижатия $F_{\text{пр.}i}$, что и в АФМ, имеющей $m = 1$. Данное обстоятельство объясняется тем, что при уменьшенном входном сигнале mT УУ выходной сигнал увеличивается благодаря большему значению КУ.

Аналогичный результат получается в том случае, когда в составе АФМ имеется ПМ: зависимость силы $F_{\text{пр.}i}$ от коэффициента трения также соответствует формуле (7).

Если в составе АФМ имеется ПМ с переменным передаточным числом, равным

$$u_i = n/m,$$

где n – см. рис. 1, то значение входного сигнала УУ составляет:

$$T_{\text{вх}} = u_i m T_{\text{п.}i} = u_i m C_1.$$

Соответственно этому значению силы $F_{\text{пр.}i}$ составляет:

$$F_{\text{пр.}i} = \frac{T_{\text{вх}}}{r} \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{u_i m C_1}{r} \operatorname{tg} \alpha_i.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (1) и учитывая, что $T_{\text{п.}i} = C_1$, находим:

$$u_i = \frac{1}{zmC_i} \left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_{\text{max}}} \right). \quad (17)$$

Формула (17) показывает, что передаточное число ПМ зависит от значения коэффициента трения, уменьшаясь до нуля с увеличением последнего до значения $f_i = f_{\text{max}}$. Одновременно с этим согласно формуле (14) уменьшается значение КУ.

Подстановка в формулу (17) правой части формулы (14), переход к пределу и раскрытие неопределенности вида 0/0 приводит к соотношению $u = m/n$. Это свидетельствует о том, что при переменном значении КУ, изменяющимся в соответствии с

зависимостью (14), передаточное число ПМ должно быть постоянным.

Если в АФМ значение КУ постоянное, т. е. не зависит от коэффициента трения, то согласно формуле (17) передаточное число ПМ функционально зависит от коэффициента трения, следовательно, является переменным и при значении $f_i = f_{\text{max}}$ обращается в нуль.

Формула (17) также показывает, что передаточное число ПМ зависит от коэффициента m и уменьшается с его увеличением. Уменьшение передаточного числа позволяет упростить конструкцию ПМ, уменьшить его габариты и массу, поэтому при наличии в конструкции муфты ПМ целесообразно принимать $m = 1$.

В настоящее время еще не созданы конструкции ПМ с переменным передаточным числом, которые можно использовать в АФМ. Однако имеется определенный опыт применения в конструкциях АФМ ПМ с постоянным передаточным числом для увеличения входного сигнала УУ [15]. В данном объекте применено УУ с постоянным значением КУ, однако применение ПМ позволяет повысить выходной сигнал УУ и точность срабатывания муфты при ограниченном значении КУ.

Анализ зависимости (14) показывает, что применение ПМ эффективно в тех случаях, когда АФМ имеет небольшое число пар трения z . В данном случае применение понижающей механической передачи позволяет увеличить входной сигнал УУ и уменьшить текущие значения КУ. Это представляется особенно важным, поскольку, как отмечено выше, при значениях $m < 1$ максимальная величина КУ ограничена в соответствии с соотношением (8).

Выше рассмотрены варианты исполнения АФМ без ПМ с $m = 1$, $m \neq 1$ и с применением ПМ при $m \neq 1$. При наличии в схеме АФМ ПМ и $m = 1$ формулы (14) и (17) соответственно имеют вид:

$$C_i^m = \frac{1}{zu} \left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_{\text{max}}} \right); \quad (18)$$

$$u_i = \frac{1}{zC} \left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_{\text{max}}} \right). \quad (19)$$

Формула (19) логически вытекает из формулы (18), т. е. указанные формулы являются взаимосвязанными. Они показывают, что значение КУ в данном случае меньше, чем при $m \neq 1$, если передаточное число ПМ больше единицы.

В формулах (18) и (19) параметры u и C приняты постоянными, т. е. параметры C_i^m и u_i зависят только от коэффициента трения f_i .

В рассматриваемом случае, т. е. при $m = 1$, передаточное число ПМ равно $u = n$, а входной сигнал УУ составляет $uT_{п.и}$.

Создание ПМ адаптивной муфты с переменным передаточным числом само по себе представляет технически сложную задачу, поскольку требуется передаточное число, изменяющееся по определенной закономерности. Поэтому целесообразнее в случае применения в конструкции АФМ ПМ использовать постоянное передаточное число последнего и УУ с переменным значением КУ, которое обеспечивается за счет переменного угла давления α_i чувствительных элементов. В техническом и технологическом отношении детали УУ, реализующего данный способ регулирования, не представляют значительной сложности.

Зависимость между параметрами u_i и C определяется по соотношению (19). Зависимость между параметрами $F_{пр.и}$ и C_i может быть найдена из соотношений (6) и (15). Выражая из соотношения (6) разность $f_{max} - f_i$ через C_i и подставляя данное представление в формулу (15), получаем:

$$F_{пр.и} = zC_i f_{max}. \quad (20)$$

Формула (20) показывает, что сила прижатия прямо пропорциональна значению КУ.

Особенность АФМ с ПОС заключается в необходимости ограничения максимального значения силы прижатия по-

верхностей трения до значения, зависящего от давления на поверхностях фрикционного контакта [12]. Максимальная сила, с которой прижаты друг к другу элементы фрикционных пар муфты, возникает при минимальном коэффициенте трения:

$$\sum F_{пр} = F_{п} + F_{пр(f_{min})},$$

или с учетом формулы (15):

$$\sum F_{пр} = F_{п} \frac{f_{max}}{f_{min}} = pF_{п}. \quad (21)$$

В формуле $F_{пр(f_{min})}$ – сила прижатия, развиваемая УУ при значении коэффициента трения $f_i = f_{min}$.

При заданных габаритных размерах АФМ предельная сила $F_{п}$ с учетом формулы (21) равна:

$$F_{п,max} = \frac{[q]S}{p},$$

где $[q]$ – допускаемое давление на поверхностях трения; S – площадь контакта поверхности трения.

Необходимый вращающий момент АФМ может быть обеспечен в данном случае за счет параметра z , значение которого определяется по формуле

$$z = \frac{pT_{max}}{R_{cp}[q]Sf_{max}}.$$

Результаты

Графики зависимостей, построенные по соотношениям (6), (15) и (19), показаны на рис. 2 (соответственно кривые 1–3). Графики построены по следующим исходным данным: $z = 6$, $f_{max} = 0,8$, $F_{п} = 500$ Н, $C = 5$.

Графики показывают, что параметры $F_{п.и}$, C_i и u_i изменяются в функции коэффициента трения по гиперболической зависимости, в отличие от характера изменения указанных параметров в АФМ с отрицательной обратной связью [8].

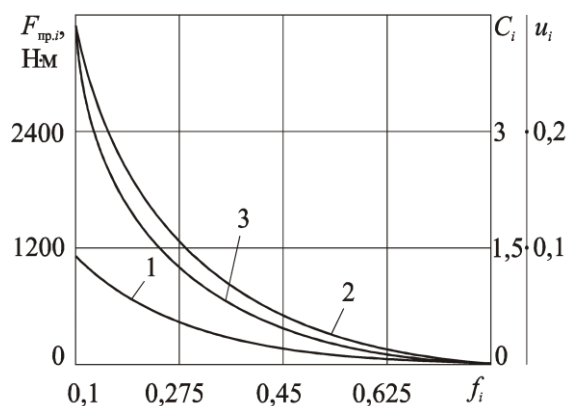


Рис. 2. Графики зависимостей прижимной силы, КУ и передаточного отношения ПМ от коэффициента трения
 Fig. 2. Graphs of the dependences of down force, gain factor (CU) and gear ratio of the transfer mechanism (TM) on the coefficient of friction

Обсуждение/Заключение

Принцип косвенного регулирования в АФМ с ПОС за счет автоматического регулирования силы натяжения упругого элемента позволяет значительно увеличить нагрузочную способность муфты.

Применение в конструкции АФМ с ПОС передаточного механизма при реализации «идеальной» нагрузочной характеристики требует обеспечения функциональных связей между прижимной силой,

КУ обратной связи и передаточным отношением передаточного механизма.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ с ПОС, передаточного механизма в конструкции муфты. Также их необходимо использовать в дальнейших исследованиях совершенствования принципиальной и конструктивной схем муфты.

Выводы

1. В отличие от используемой в АФМ отрицательной обратной связи применение ПОС основано на уменьшении силы прижатия пар трения с увеличением коэффициента трения, что, безусловно, сказывается на повышении нагрузочной способности муфты.

2. Положительная обратная связь с косвенным регулированием силы нажатия в АФМ реализуется при помощи УУ, которое осуществляет автоматическое регулирование силы натяжения упругого элемента (элементов) нажимного узла по принципу действия отрицательной обратной связи.

3. С точки зрения значения давления на поверхностях контакта пар трения оптимальным является вариант применения ПОС, при котором отсутствует дополнительная сила прижатия пар трения при максимальном коэффициенте трения.

4. Для получения «идеальной» нагрузочной характеристики АФМ с ПОС значения прижимной силы, КУ обратной связи и передаточного отношения передаточного механизма должны быть функционально связаны с изменяющимся коэффициентом трения, согласно найденным зависимостям.

5. Действие ПОС в режиме автоматического регулирования АФМ с дифференцированными парами трения зависит от коэффициента ослабления входного сигнала УУ, определяемого шириной интервала изменения коэффициента трения.

6. Максимальное число ведущих пар трения зависит от общего числа пар трения АФМ и ширины интервала изменения коэффициента трения.

7. Передаточный механизм целесообразно использовать в АФМ со всеми ведущими парами трения и при небольшом их числе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шишкарёв М.П., Лущик А.А. Эксплуатационные характеристики адаптивной фрикционной муфты второго поколения с раздельным силовым замыканием. Тракторы и сельхозмашины. 2013;3:28–31.
2. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012;10:3–7.
3. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014;10:40–46.
4. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016;5:33–38.
5. Шишкарёв М.П. Исследование базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения. Материалы 8-й междунар. науч.-практ. конф. 3–6 марта 2015 г. - Ростов н/Д, 2015. – С. 162–167.
6. Шишкарёв М.П. Исследование режима перегрузки АФМ второго поколения (базовый вариант). Материалы 8-й междунар. науч.-практ. конф. 3–6 марта 2015 г. - Ростов н/Д, 2015. – С. 182–185.
7. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015;3:36–42.
8. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Обоснование наибольшей точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015;11:20–26.
9. Шишкарёв М.П., Лущик А.А., Угленко А.Ю. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения (модифицированной). // Материалы 6-й научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении и металлургии» 10-12 сент. 2014. - Ростов н/Д, 2014. – С. 118–130.
10. Шишкарёв М.П., Лущик А.А. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием. // Материалы междунар. науч.-практ. конф. 25-28 февраля 2014 г. - Ростов н/Д, 2014. – С. 206–209.
11. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Выбор формы нагрузочной характеристики второго конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием. // Материалы междунар. науч.-практ. конф. 25-28 февраля 2014 г. - Ростов н/Д, 2014. – С. 226–229.
12. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения. Тракторы и сельхозмашины. 2014;9:42–45.
13. Шишкарёв М.П., Лущик А.А., Угленко А.Ю. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет. Монография. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.
14. Шишкарёв М.П. Компоновка базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010;7:16–20.
15. Шишкарёв М.П. Компоновочные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами. Вестник машиностроения. 2003;7:7–12.

REFERENCE

1. Shishkarev MP, Lushchik AA. Operational characteristics of the adaptive friction clutch of the second generation with a separate force closure. Tractors and agricultural machinery. 2013;3:28-31.
2. Shishkarev MP, Uglenko AYu. Modernization of the adaptive friction clutch of the second generation. Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii. 2012;10:3-7.
3. Shishkarev MP, Chan Van Dyk. Modernization of the adaptive friction clutch of the second generation. Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah. 2014;10:40-46.
4. Shishkarev MP, Chan Van Dyk. Analysis of the operation accuracy of the adaptive friction clutch of the second generation. Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii. 2016;5:33-38.
5. Shishkarev MP. Study of the basic variant of adaptive friction clutches of the second generation. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference; 2015 March 3-6; Rostov n/A: 2015. p. 162-167.
6. Shishkarev MP. Study of the second-generation AFM overload mode (basic version). Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference; 2015 March 3-6; Rostov n/A: 2015. p. 82-185.
7. Shishkarev MP, Uglenko AYu. Analysis of the operation accuracy of adaptive friction clutches with separate force closure. Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii. 2015;3:36-42.
8. Shishkarev MP, Chan Van Dyk. Justification of the highest accuracy of adaptive friction clutches. Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah. 2015;11:20-26.
9. Shishkarev MP, Lushchik AA, Uglenko AYu. The operation accuracy of the second generation adaptive friction clutch (modified). Proceedings of the 6th Scientific and Practical Conference, September 10-12, 2014: Innovative Technologies in Mechanical Engineering and Metallurgy. Rostov n/A: 2014. p. 118-130.
10. Shishkarev MP, Lushchik AA. The choice of the loading characteristic of the first constructive variant of adaptive friction clutch with separate force closure. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference; 2015 March 3-6; Rostov n/A: 2015. p. 118-130.

- tific and Practical Conference; 2014 Feb 25-28; Rostov n/A: 2014. p. 206-209.
- Shishkarev MP, Uglenko AYU. The choice of the loading characteristic of the second constructive variant of the adaptive friction clutch with separate force closure. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference; 2014 Feb 25-28; Rostov n/A: 2014. p. 226-229.
 - Shishkarev MP, Chan Van Dyk. Study of adaptive friction clutches of the second generation. Tractors and agricultural machinery. 2014;9:42-45.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шишкарёв М.П.** Определение величины коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт с положительной обратной связью / М.П. Шишкарёв, М.Д. Гавриленко // Известия Орел-ГТУ, серия Фундаментальные и прикладные

BIBLIOGRAPHIC LIST

- Shishkarev MP, Gavrilenko MD.** Determination of the value of adaptive friction clutch gains with positive feedback. Izvestiya Orel STU, Fundamen-

Информация об авторах:

Шишкарёв Михаил Павлович - профессор, доктор технических наук, тел. +7(908) 193-33-93, профессор, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 59736842695, Research-ID- K-3654-5976, Author-ID-РИНЦ 662546.

Information about the authors:

Shishkarev Mikhail Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, phone: +7(908) 193-33-93, Scopus-Author ID 59736842695, Research-ID- K-3654-5976, Author-ID-RSCI 662546.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 14.02.2022; одобрена после рецензирования 21.02.2022; принята к публикации 23.05.2022. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 14.02.2022; approved after review on 21.02.2022; accepted for publication on 23.05.2022. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.

- Shishkarev MP, Lushchik AA, Uglenko AYU. Adaptive friction clutches of the second generation. Research, construction and calculation: monograph. Rostov n/A: Publishing Center of DSTU; 2013.
- Shishkarev MP. Arrangement of the basic version of the adaptive friction clutch of the second generation. Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii. 2010;7:16-20.
- Shishkarev MP. Arrangement solutions of machine drives with adaptive friction clutches. Vestnik mashinostroeniya. 2003;7:7-12.

проблемы техники и технологии. - 2011. – № 6 – 3 (290). – С. 123–127.

- Шишкарёв М.П.** Особенности процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 3–7.

tal and Applied Problems of Technics and technology. 2011;6-3(290):123-127.

- Shishkarev MP.** Operation features adaptive friction clutch. Vestnik mashinostroeniya. 2004;4:3-7.

Гавриленко Максим Дмитриевич - старший преподаватель, тел. +7(928) 626-03-71, международные идентификационные номера автора: Author-ID-РИНЦ 765978.

Gavrilenko Maxim Dmitrievich, Blenior lecturer, phone: +7(928) 626-03-71, Author-ID- RSCI 765978.