

ТЕОРИЯ РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ С УЧЕТОМ УРАВНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ТРЕНИЯ

© 2011 С.В. Фёдоров, Д.В. Афанасьев

ФГОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»,

Поступила в редакцию 10.11.2011

Делается обзор теории ременных передач с целью уточнения уравнения Эйлера для передачи усилия посредством трения с помощью уравнения баланса трения.

Ключевые слова: нить, тяговая способность, уравнение Эйлера, коэффициент трения, дуга обхвата, дуга скольжения, дуга покоя, энергетический баланс, структурно-энергетическая диаграмма.

Теория ременных передач создавалась трудами Эйлера, Грасгофа, Понселе, Кретца, Петрова, Жуковского и др. В этой теории ремень отождествляется с гибкой нитью. Работы данных ученых, а также результаты более поздних исследований Каммерера, Фибера, Фридрексона, Новски, Иванова, Гутьяра, Цепляева рассмотрены в работах Андреева [1,2].

Основные положения классической теории можно рассматривать в двух аспектах согласно критериям работоспособности: оценке тяговой способности передачи и оценке долговечности ремня. В данной статье представляет интерес характеристика тяговой способности передачи, которая связана с величиной силы трения между ремнем и шкивом.

Постановка задачи и предлагаемый путь решения в технике широко известны: закон передачи усилия гибким органом посредством сил трения был выведен Эйлером в 1775 году для невесомой, абсолютно гибкой и нерастяжимой нити, перекинутой через неподвижный барабан с углом обхвата α (рис. 1). Эта нить под действием приложенных к ее концам сил S_1 и S_2 равномерно скользит в направлении силы S_1 , превышающей силу S_2 на величину, необходимую для преодоления сил трения T , которые возникают между нитью и поверхностью барабана. Решение этой задачи производилось путем интегрирования силы трения по дуге обхвата и позволило теоретически установить на режиме буксования следующую взаимосвязь между усилиями натяжения набегающей и сбегающей ветвей гибкого элемента. Для указанного случая установлена зависимость:

$$S_1 = S_2 e^{f\alpha} \quad (1)$$

где S_1 и S_2 – натяжение ветви нити, сбегающей с барабана и набегающей на барабан; e – основание натуральных логарифмов; f – коэффициент трения

скольжения между нитью и поверхностью барабана; α – угол (или дуга) обхвата нитью барабана, рад.

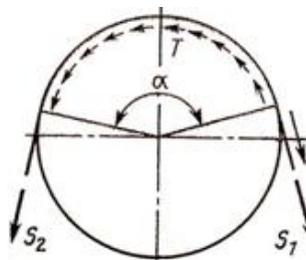


Рис. 1. Схема распределения сил при протягивании гибкой нити по неподвижному барабану.

Далее, М. Кретц в 1861 г. установил факт проскальзывания ремня на шкивах, что явилось поводом для дискуссии о применимости формулы Эйлера для расчета ременной передачи.

Для случая нормальной работы привода с гибкой нерастяжимой связью (без пробуксовывания) формула Эйлера преобразуется в неравенство:

$$\frac{S_1}{S_2} < e^{f\alpha} \quad (2)$$

так как этот привод может передавать тяговое усилие при соотношениях S_1/S_2 , не превышающих величины $e^{f\alpha}$. Равенство (2) соответствует случаю скольжения нити относительно поверхности шкива, т. е. случаю буксования.

В 1881 году Грасгоф высказал предположение, что проскальзывание ремня происходит только на определенной части дуги обхвата, соответствующей величине передаваемого тягового усилия, т.е. что переменной величиной, зависящей от отношения S_1/S_2 , является величина угла α .

В 1893 году была опубликована статья Н.П. Петрова, в которой он поддерживал гипотезу о разделении дуги обхвата на дугу скольжения, в пределах которой приводной ремень проскальзывает по шкиву, и дугу покоя, в пределах которой натяжение ремня остается постоянным.

Федоров Сергей Васильевич, доктор технических наук
профессор, E-mail: fedorov@klgtu.ru
Афанасьев Денис Вячеславович, аспирант,
E-mail: afanasev.dv@yandex.ru

Позднее Н.Е. Жуковский рассмотрел теорию ременной передачи, предложенную Н.П. Петровым, и доказал справедливость предположения о том, что при передаче тяговой силы упругой растяжимой гибкой связью (ремнем) на дуге обхвата ведущего и ведомого шкивов (рис. 2) со стороны сбегающих ветвей ремня возникают дуги скольжения α'_1 и α'_2 , в пределах которых происходит упругое проскальзывание ремня по шкивам вследствие его упругой деформации. Со стороны набегающих ветвей возникают дуги покоя α''_1 и α''_2 , в пределах которых ремень не деформируется, сохраняя свое первоначальное натяжение T/t .

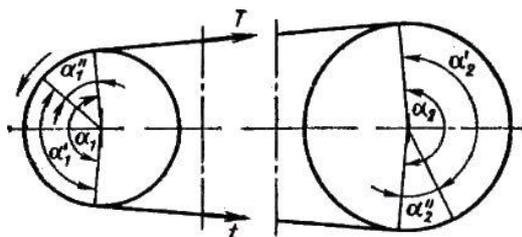


Рис. 2. Схема ременной передачи

На основании сказанного был сделан вывод, что уравнение Эйлера справедливо только для дуг скольжения. В пределах дуг покоя сила трения не реализуется, так как натяжение ремня не изменяется.

«Н.П. Петров объясняет это обстоятельство тем, — писал Жуковский, — что ремень скользит не на всех дугах обхвата, а только на частях этих дуг α'_1 и α'_2 . Формула

$$\frac{T}{t} = e^{f_1 \alpha'_1} = e^{f_2 \alpha'_2} \quad (3)$$

Должна быть при этом заменена

$$\frac{T}{t} = e^{f_1 \alpha''_1} = e^{f_2 \alpha''_2} \quad (4)$$

где дуги скольжения α'_1 и α'_2 определяются по данному отношению T/t . На остающихся частях дуг обхвата ремень не скользит, сила трения не развивается и натяжение не изменяется». Таким образом, по мнению Н.Е. Жуковского и Н.П. Петрова формула Эйлера для привода с гибкой упругой связью должна принять вид

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} = e^{f \alpha_{ск}} \quad (5)$$

где $S_{нб}$, $S_{сб}$ — натяжение набегающей и сбегающей ветвей; e — основание натуральных логарифмов; f — коэффициент трения скольжения (относительно постоянный для данной пары); $\alpha_{ск}$ — дуга скольжения, выраженная в радианах и зависящая от величины отношения $S_{нб}/S_{сб}$.

Логические рассуждения о наличии дуг скольжения и покоя были подтверждены Н.Е. Жуковским экспериментально на установке, состоящей из шкива и резиновой ленты, перекинутой через него и нагруженной с двух сторон гирями различного веса.

Доказательства наличия дуги скольжения и дуги покоя, приведенные в статье Н.Е. Жуковского, были достаточно убедительны, но все же не могли прекратить дискуссию о работе привода с гибкой связью, объясняя только одну сторону сложного физического явления передачи силы посредством трения.

Определение величины дуги скольжения сложно. Поэтому для практических расчетов приводов с гибкой связью стали применять уравнение Эйлера в следующем виде:

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} = e^{\mu \alpha} \quad (6)$$

где μ — коэффициент сцепления гибкого тягового органа с поверхностью шкивов или барабанов, величину которого устанавливают на основании данных эксплуатации или экспериментально; α — полная величина угла обхвата гибким органом шкива или барабана.

В многочисленных последующих исследованиях делались попытки учесть различные факторы, влияющие на работу привода с гибкой связью.

В 1909 году А. Фибер экспериментально подтвердил существование дуги скольжения и дуги покоя на установке, в которой ремень из мягкой резины охватывал два шкива, связанных соответственно с электродвигателем и генератором, где скорости шкивов в различных точках измерялись тахометром.

Последующие исследователи привода с гибкой связью (Хамель, Хайкин, Цепляев, В.С. Поляков, Е.Г. Глухарев, И.Г. Штокман, Огибалов, Давыдов, Дьяков, Смирнов и др.) также пытались уточнить уравнение Эйлера, учитывая влияние центробежной силы, жесткости связи, сил инерции, конечной толщины ремня, эксцентриситет касательной нагрузки (сил трения), сил инерции и изменения величин коэффициента трения в зависимости от скорости скольжения. Но все внесенные изменения не имели большой практической ценности, имели различные допущения, были неверны или неточны. Поэтому в настоящее время в практических инженерных расчетах все неизученные факторы учитываются величиной коэффициента сцепления в уравнении Эйлера. На основании данных практики μ принимают почти в 2 раза меньшим, чем коэффициент трения f между плоскими образцами материалов, из которых изготавливают гибкие связи и футеровки приводных барабанов.

Большинство современных ученых, изучающих работу привода с гибкой связью, считает, что сила тяги реализуется на дуге скольжения, так как в пределах этой дуги изменяется натяжение упругой связи. Так, В.А. Добровольский отмечает, что окружное усилие $p = S_1 - S_2$ передается силами трения, возникающими между шкивом и ремнем на дуге угла скольжения $\alpha_{ск}$. Е.М. Гутьяр замечает, что можно разделить дугу обхвата на две части: скользящую дугу и нескользящую. Определение какой-либо из них, например скользящей, имеет

первостепенное значение для расчета ремня, так как натяжение ведущей и ведомой сторон его зависит (при отсутствии буксования) не от полной дуги обхвата, а от скользящей части ее, которая и должна назначаться предварительно при расчете передачи.

Такого же мнения придерживаются и другие ученые, занимавшиеся теорией привода с гибкой связью.

Дальнейшее изучение этих вопросов дает возможность понять физическую сторону сложного явления передачи сил трения и уточнить расчет передач с гибкой связью.

В связи с тем, что трение является процессом диссипативным, то оно подчиняется термодинамическим закономерностям. Поэтому именно здесь возможно искать уточнения уравнения Эйлера. С точки зрения основ трибоэргодинамики с учетом уравнения баланса трения коэффициент трения μ имеет следующий вид [4]:

$$\mu = \frac{\Delta U_e}{Nl} + \frac{Q}{Nl} \quad (7)$$

где ΔU_e и Q - изменение внутренней, скрытой энергии различного рода дефектов и повреждений структуры контактных объемов и тепловой эффект трения; N - нормальная нагрузка; l - путь трения.

Данное уравнение, рассмотренное относительно коэффициента трения, показывает дуализм процесса трения – совокупность одновременного действия двух взаимосвязанных, противоположных тенденций (микропроцессов) деформирования контактов трения: накопления скрытой энергии различного рода дефектов и повреждений структуры и высвобождения и рассеяния накопленной энергии.

Для коэффициента трения, входящего в показатель степени уравнения Эйлера, используется уравнение энергетического баланса трения в решении метода трибоэргодинамики:

Совместное решение уравнения Л. Эйлера и уравнения для коэффициента трения в его энергетической интерпретации позволяет представить первое уравнение в новом виде:

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{F_2} &= e^{\left(\frac{\Delta U_e + Q}{Nl}\right)\alpha} = e^{(\mu_{adapt} + \mu_{dis})\alpha} = \\ &= e^{\mu_{adapt}\alpha} + e^{\mu_{dis}\alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

коэффициент трения, расположенный в показателе степени уравнения Эйлера имеет двучленный вид суммы адаптивного (истинного) и диссипативного коэффициента трения.

Соответственно, величины этих коэффициентов трения, равные в сумме единице – $\mu_{adapt} + \mu_{dis} = 1,0$, совместно с углом обхвата α , формируют логическое разделение зоны обхвата нитью цилиндрической поверхности, собственно на две зоны:

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (9)$$

где

$$\alpha_1 = \mu_{adapt} \alpha \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \mu_{dis} \alpha \quad (10)$$

Данные составляющие трения μ_{adapt} и μ_{dis} графически представлены на структурно-энергетической диаграмме трения [5] (рис. 3). Из вышесказанного можно сделать вывод, что зоны разделения дуги обхвата в ременной передаче соответствует зонам разделения трения на диаграмме: первая часть кривой – накопление потенциальной энергии $f = f(\Delta U_e)$, вторая часть – рассеивание $f = f(Q)$.

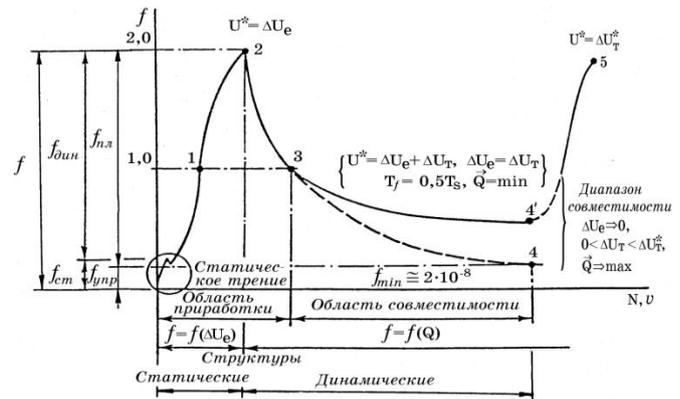


Рис. 3. Структурно-энергетическая интерпретация кривой трения $f = f(N, v)$ [5].

Данный результат теоретически строго обосновывает принцип разделения дуги обхвата на две принципиальные зоны – тяги (активных сил трения) и буксования (отжима нити вследствие развития процессов возврата (диссипации) энергии).

Соответствие уравнения энергетического баланса трения (7) обобщенной экспериментальной кривой трения [5], отраженной видом структурно-энергетической диаграммы трения рисунка 3, позволяет сделать вывод о том, что на поверхности шкивов ременных передач распределение сил трения (коэффициента трения) также должно иметь вид, адекватный кривой диаграммы.

При этом следует отметить, что выполненные нами ранее эксперименты по оценке трения на поверхности фрикционных устройств тягового типа рыболовных устройств [6] и анализ уравнения Л. Эйлера (1) с учетом экспериментально оцененных параметров трения показали, что коэффициент трения μ относится к зоне реального трения α' , которая составляет часть общей дуги обхвата и равна $\alpha' = 0,66 \alpha$.

Таким образом, в рамках дискуссии о применимости уравнения Л. Эйлера (1), конечно необходимо подчеркнуть, что это уравнение имеет смысл для дуги реального трения.

В связи с этим актуальна разработка методики и постановка эксперимента по замеру сил трения и оценке закономерностей изменения коэффициента трения на поверхности дуги обхвата ременных передач. При этом вполне вероятно предположить, что на поверхности шкива с ремнем (нитью) закономер-

ности трения должны подчиняться как трению покоя (начальная зона трения), так и трению движения (зона скольжения).

Постановка эксперимента по выявлению закономерностей трения на поверхности шкивов ременных передач сможет наиболее полно ответить на имеющиеся дискуссионные вопросы и, соответственно, иметь инженерную значимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев А.В.* Расчет деталей машин при сложном напряженном состоянии. – М.: Машиностроение, 1981. –142-147с;
2. *Андреев А.В.* Передача трением. – М.: Машиностроение, 1978. – 60-69 с;
3. *Иванов М.Н.* Детали машин: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 220-228 с;
4. *Федоров С.В.* Анализ уравнения Эйлера для трения нити по цилиндру с учетом уравнения энергетического баланса трения. Научно-техническая конференция «Трибология - машиностроению 2010». – М.: ИМАШРАН, 2010, - 67 с;
5. *Федоров С.В.* Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. – Калининград: КГТУ, 2003, - 168-185 с.;
6. *Зеброва Е.М.* Исследование процесса трения скольжения жгута дели во фрикционных рабочих органах рыбопромысловых механизмов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Калининград, 2007.

THE THEORY OF BELT DRIVES, TAKING INTO ACCOUNT THE ENERGY BALANCE EQUATION OF FRICTION

© 2011 S.V. Fedorov, D.V. Afanasev

Kaliningrad State Technical University

An overview of the theory of belt drives to determine the possibility of assessing the ability of traction methods of the triboergodinamiks using the balance equation of friction.

Key words: thread, traction power, Euler's equation, the coefficient of friction, the arc of circumference, arc sliding arc of rest, the energy balance, structure-energy diagram.

Fedorov Sergey Vasilievich, doctor of engineering sciences, professor, E-mail: fedorov@kgtu.ru
Afanasev Denis Viacheslavovich, graduate student, E-mail: afanasev.dv@yandex.ru