

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

**Пересада С.М., д.т.н., проф., Римович А.А., Кононенко Н.С., магистранты**  
*НТУУ «КПИ», кафедра автоматизации электромеханических систем и электропривода*

**Вступление.** Трение имеет значение для всех систем управления движением. Наличие трения приводит к ухудшению качества переходных процессов и снижению точности системы. Поэтому, важно понять трение как явление, чтобы уменьшить его отрицательное влияние на поведение системы управления.

**Цель работы.** Исследовать трение как явление и понять его влияние на процессы управления движением.

**Материалы исследования.** Трение исследовалось в течение длительного времени. Леонардо да Винчи исследовал движение прямоугольных блоков скользящих по плоским поверхностям. Французский физик Амонтон сделал аналогичные исследования и пришел к выводу, что сила трения при скольжении пропорциональна нормальной нагрузке. Маленький блок скользит по поверхности и испытывает те же трения в виде большого блока, если нормальные силы одинаковы. Французский физик Кулон обнаружил, что, как только движение начинается, трение больше не зависит от скорости. В результате этого он изобрел закон трения Кулона [1].

Явление трения изучается в трибологии [2]. Даже, если свойства трения достаточно хорошо понятны, фундаментальные физические механизмы, которые вызывают трение, не очень хорошо известны. Например, не существует тесной взаимосвязи между шероховатостью поверхности и трением. Есть случаи, когда трение меньше, если поверхность грубее. Эксперименты с поверхностью слюды показали, что трение есть, даже если нет никаких неровностей поверхности. В этом случае трение объяснено с точки зрения сложной молекулярной адгезии. Вопросы о смазке также плохо изучены. Эксперименты на некоторых поверхностях показали, что трение меньше, когда поверхность сухая.

Чтобы получить понимание механизмов, лежащих в основе трения необходимо наблюдать за микроскопическим контактом между двумя поверхностями. Упрощенная картина показана на Рисунке 1. Поверхности естественно грубы и часто покрыты слоем оксида или другого материала. Если контакт смазывается, там также будут масла или смазки. Фактический контакт происходит на нескольких неровностях, а не непрерывно по всей поверхности материала. Там также имеют место прилипания и процессы сварки двух поверхностей. Так как прикладывается тангенциальная сила, то имеет место сдвиг контактов. Это приводит к упругой и пластической деформациям.

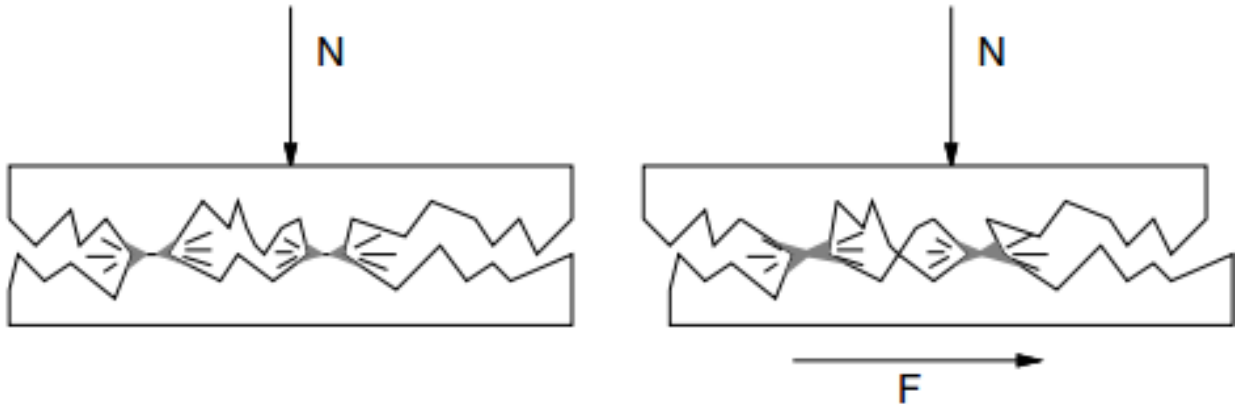


Рисунок 1 – Иллюстрация микроскопического контакта между двумя поверхностями, где  $N$  – нормальная сила, что прикладывается к телу,  $F$  – движущая сила

Механизмы, лежащие в основе трения, можно условно разделить на четыре области поведения. Это зависит от относительной скорости движения между поверхностями. Рисунок 2 показывает соотношение между силой трения и скоростью, он разделен на четыре, так называемые, режима смазки.

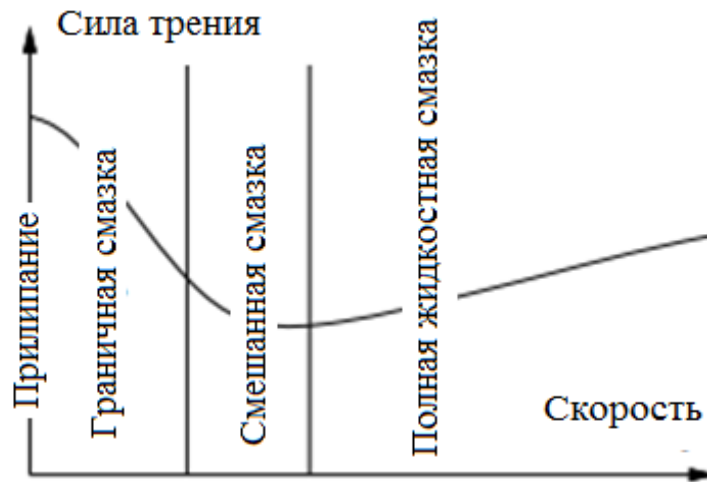


Рисунок 2 – Типичная зависимость силы трения от скорости

Первый режим охватывает случай когда движение не происходит, то есть, когда поверхности прилеплены друг к другу. Наглядная картина поведения показана на Рисунке 3. Контакт можно рассматривать, как образование из нескольких пружин. Если растяжение становится слишком большим, пружины разрываются и происходит движение. Таким образом, за счет упругой и пластической деформации, а также неровностей контактов материалы находятся в состоянии прилипания [3].

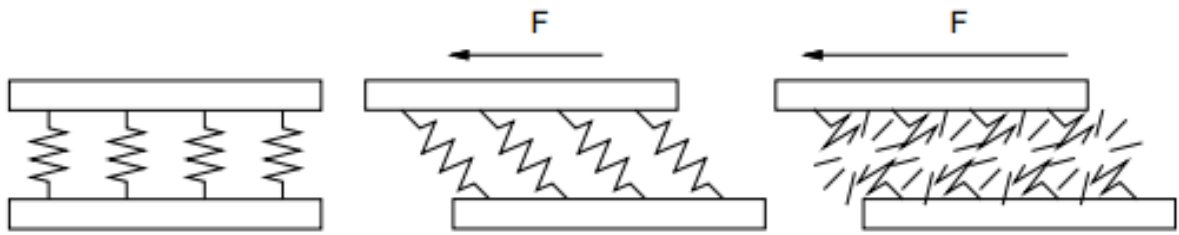


Рисунок 3 – Изображение трения как совокупности нескольких небольших пружин

**Модели трения.** Самые простые модели описывают трение как функцию разницы скоростей поверхностей скольжения. Такие модели часто называют статическими моделями.

*Модель трения Кулона* [1] очень полезна, несмотря на свою простоту. Она может объяснить некоторые явления, связанные с трением и она обычно используется для компенсации трения. Одной из проблем является то, что сила трения не зависит от скорости, когда скорость равна нулю. Это приводит к математическим осложнениям. Модель не охватывает пружинного поведения тела.

*Модель Карнопа* [5] похожа на Кулоновскую модель, но нулевая скорость заменена на  $\varepsilon$ . Эта модель широко используется в программах моделирования мехатронных систем и является улучшенной по сравнению с предыдущей моделью, однако существуют трудности, поскольку поведение может сильно зависеть от выбора параметра  $\varepsilon$ .

Строго говоря, ни Кулоновская модель, ни модель Карнопа не являются статическими моделями в плане того, что трение является функцией от скорости. Из-за этого модели имеют как теоретические, так и практические недостатки. Их можно избежать, если учесть, что трение действительно является динамическим явлением, которое должно быть смоделировано как динамический процесс.

*Модель Даля* [6] широко используется для моделирования систем с шариковым подшипником скольжения. Модель позволяет избежать численных проблем с Кулоновской моделью и моделью Карнопа. Недостатками модели Даля является то, что она не описывает движение с прилипанием и не учитывает эффект Штрибека.

*Модель Блимана-Сорина* [7]. Сложность модели определяется размерностью пространства состояний. Модель первого порядка идентична модели Даля. Эта модель не учитывает залипания, и не дает пикового трения. Модель второго порядка, однако, формирует залипание. Эта модель может быть рассмотрена как параллельное соединение «быстрой» и «медленной» моделей Даля. «Быстрая» модель имеет более высокое устойчивое состояние

трения в сравнении с «медленной». Сила «медленной» модели вычитается из «быстрой», что приводит к пиковому прилипанию.

*Модель ЛуГре* [8]. Модель ЛуГре еще один способ обобщения модели Даля. Модель отображает многие свойства трения, такие как зависимость скорости от трения и запаздывание трения. Модель также включает скорость, зависящую от трения, как изменяющуюся силу отрыва и запаздывание трения.

Модель ЛуГре, имеет вид

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{g(v)} z = v - h(v)z,$$

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + f(v),$$

где  $v$  – скорость между двумя поверхностями в контакте,  $z$  – состояние внутреннего трения,  $F$  – ожидаемая сила трения. По сравнению с моделью Даля, модель ЛуГре имеет зависящую от скорости функцию  $g(v)$  вместо константы и дополнительного коэффициента затухания  $\sigma_1$ , связанного с микросмещением, и общую форму  $f(v)$ , представляющую вязкое трение. Модель ЛуГре на сегодняшний день является наиболее подходящей для исследования процессов в системах автоматического управления.

**Выводы.** Поскольку трение в общем случае приводит к ухудшению динамического и статического поведения системы, то его компенсация является актуальной задачей, которая на сегодняшний день в полном объеме не решена. Анализ существующих моделей трения свидетельствует о том, что статические модели не достаточно точно описывают суть процесса. Из динамических моделей наибольшее распространение получила модель ЛуГре.

#### Перечень ссылок

1. Coulomb C. A. Théorie des machines simples. / C. A. Coulomb – Nouv. Bachelier: 1821. – 357p.
2. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов. / М. : Недра, 2000. – 316с.
3. Попов В. Л. Термодинамика и кинетика плавления сдвигом тонкого слоя смазки, заключенного между твердыми телами / В. Л. Попов – Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. – №. 5. – 100–110с.
4. Åström K. J. Control of systems with friction. / K. J. Åström // Technical paper. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology. – 1998. – 8p.
5. Liu L. A new method for the determination of the zero velocity region of the Karnopp model based on the statistics theory. / L. Liu, H. Liu, Z. Wu, D. Yuan // Mechanical Systems and Signal Processing. Academic Press – 2009. – Т. 23. – №. 5. – 696–703p.
6. Chou D. Dahl friction modeling. / D. Chou // Massachusetts Institute of Technology, – 2004. – 51p.
7. Temeltas H., State observation for elastoplastic friction models in positioning systems by utilizing Leunberger observers. / H. Temeltas, G. Aktas // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2006. – Т. 220. – №. 5. – 417–426p.
8. Johanaström K., Revisiting the LuGre friction model. / K. Johanaström, C. Canudas-De-Wit // Control Systems, IEEE. – 2008. – Т. 28. – №. 6. – 101–114p.