

УДК 62-82:621.91.06

В.Н. Тихенко, д-р техн. наук, доц.,
А.А. Волков, спеціаліст,
Одес. нац. політехн. ун-т

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ В ГИДРОПРИВОДАХ ПОДАЧИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

В.М. Тихенко, О.А. Волков. **Дослідження сил тертя у гідроприводах подачі металорізальних верстатів.** На основі проведених досліджень визначені зміни залежності сил тертя в напрямних столу верстатів при швидкісних зворотно-поступальних рухах.

Ключові слова: сила тертя, гідравлічний привод, рівняння руху, металорізальний верстат

В.Н. Тихенко, А.А. Волков. **Исследование сил трения в гидроприводах подачи металлорежущих станков.** На основе проведенных исследований определены изменения зависимости сил трения в направляющих станков при скоростных возвратно-поступательных движениях.

Ключевые слова: сила трения, гидравлический привод, уравнение движения, металлорежущий станок.

V.N. Tikhenko, A.A. Volkov. **Research of friction forces in hydraulic drives of metal-cutting machine-tools.** On the basis of the performed research the changes in friction forces dependence in the guideways of metal-cutting machine-tools in high-speed reciprocating motions are determined.

Keywords: friction force, hydraulic drive, equation of motion, metal-cutting machine-tool.

© Тихенко В.Н., Волков А.А., 2012

Металлорежущие станки состоят из различных механизмов, предназначенных для преобразования движения одного или нескольких механических элементов от источника энергии к исполнительным органам. Звенья, входящие в состав механизмов, соединяются кинематическими парами, которые образуют кинематическую цепь. Относительное движение элементов кинематических пар, например, в направляющих исполнительных органов, сопровождается процессами трения, которые представляют собой сложную трибологическую систему, включающую упругое и пластическое деформирование поверхностных слоев трущихся тел.

Для моделирования большинства характеристик и свойств трения предложены математические описания, разработан ряд моделей трения в контакте твердых тел и соответствующих подходов в их исследовании. Однако возможность применения этих моделей для конкретных инженерных расчетов часто бывает ограничена, так как требует учета специфических условий работы узла. Сложности в разработке адекватных моделей обусловлены многоплановостью проявления процесса трения, необходимостью учета значительного количества факторов, имеющих случайный характер. Поэтому в инженерной практике используются эмпирические методы, основой которых являются результаты регистрации конкретных экспериментальных данных для сопрягаемых деталей в заданных условиях [1...3]. Такой подход позволяет количественно оценить процессы трения, однако в этом случае отсутствует универсальность полученных зависимостей.

В большинстве металлорежущих станков используются направляющие смешанного трения скольжения (смешанного трения), когда гидродинамическая подъемная сила воспринимает часть нагрузки, но не всегда обеспечивает полное разделение поверхностей трения слоем смазки. Область смешанного трения характеризуется большим разнообразием условий работы трущихся поверхностей в зависимости от доли сухого граничного или жидкостного трения в общем процессе трения.

Механизмы передачи движения принято рассматривать в виде колебательных систем с сосредоточенными параметрами, в которых действуют диссипативные силы. Самым распространенным видом нелинейных диссипативных сил являются силы трения в подвижных соединениях. Движение стола в шлифовальных станках обычно осуществляется при помощи гидравлического цилиндра. Если шток гидроцилиндра жестко связан со столом, гидропривод можно рассматривать как динамическую систему с одной степенью свободы.

Уравнение движения стола, на который действует сила трения, имеет вид [1]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = P - F_{\text{тр}},$$

где m — масса движущихся частей стола, приведенная к штоку гидроцилиндра;

x — перемещение стола;

P — суммарная приведенная движущая (тяговая) сила, действующая на стол;

$F_{\text{тр}}$ — сила трения в направляющих стола и уплотнениях поршня и штока гидроцилиндра.

В гидроприводах станков величина силы трения в уплотнениях поршня и штока гидроцилиндра незначительна по сравнению с силой трения в направляющих стола.

Для смешанного трения зависимость силы трения от скорости имеет вид

$$F_{\text{тр}} = \begin{cases} F(\dot{x}) & \text{при } \dot{x} \neq 0; \\ +F_0 & \text{при } \dot{x} = 0 \text{ и } P > F_0; \\ -F_0 & \text{при } \dot{x} = 0 \text{ и } P < F_0; \\ P & \text{при } \dot{x} = 0 \text{ и } |P| \leq F_0. \end{cases} \quad (1)$$

В этом случае

$$F(\dot{x}) = F_0 \operatorname{sign} \dot{x} + \varphi(\dot{x}),$$

где $\varphi(\dot{x})$ — любая кусочно-непрерывная функция, которая проходит через точку ($\varphi=0$; $\dot{x}=0$).

Иллюстрацией зависимости (1) являются графики силы трения $F_{тр}$ и соответствующей ей функции $\varphi(\dot{x})$, которые получены в результате измерений силы трения в направляющих стола плоскошлифовального станка 3E722 (рис. 1).

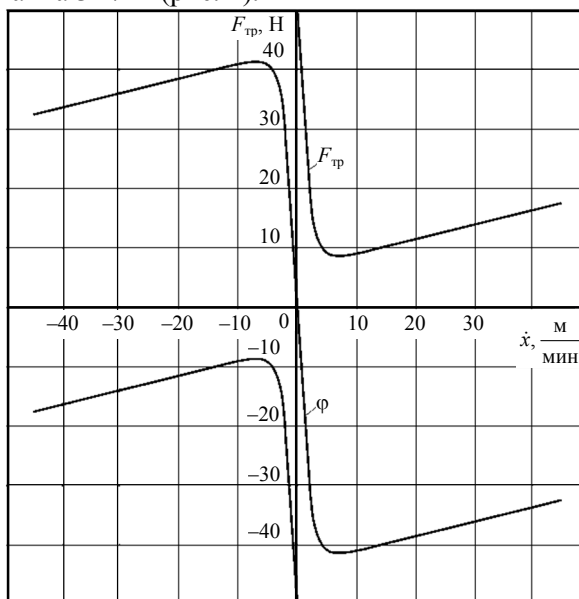


Рис. 1. Экспериментальные зависимости силы трения от скорости движения

В момент начала движения стола с места после остановки сила трения покоя составляет $F_{тр} \approx 50$ Н. В области малых скоростей стола (до 5 м/мин) имеет место “падающая” характеристика силы трения, характерная для смешанного трения. При увеличении скорости стола свыше критической ($v \approx 5$ м/мин) появляется гидродинамическое (вязкое) трение, при этом сила трения плавно возрастает с 9 до 17,5 Н. Для смазки направляющих использовалось минеральное масло И-40А.

На основе полученных экспериментальных зависимостей можно формировать кусочно-линейное представление функции $\varphi(\dot{x})$ для математического моделирования большинства приводов подачи станков (при больших амплитудах возвратно-поступательного движения с низкой частотой реверсирования). Следует отметить, что при наличии “падающей” характеристики силы трения существует вероятность потери устойчивости движения стола [4].

В ранее проведенных исследованиях динамики гидропривода подач обычно ограничивались зависимостями сил трения $F_{тр}$ от скорости движения $v = \dot{x}$ подобными зависимости, которая приведена на рисунке 1. Для изучения изменений характеристик трения при уменьшении амплитуды возвратно-поступательного движения и повышении частоты реверсирования проводились исследования на специальном стенде. Стенд состоял из следящего гидравлического усилителя, исполнительного гидравлического цилиндра, устройств создания нагрузки на направляющие исполнительного органа и изменения его массы. Материал направляющих – серый чугун и сталь. С помощью датчиков измерялись величины перемещений и скорости исполнительного органа, перепада давлений в гидроцилиндре, усилия перемещения исполнительного органа. Имитировалась работа следящего гидропривода путем реверсирования при различных значениях двойных ходов возвратно-поступательного движения. Смазка направляющих производилась минеральными маслами И-40А (без присадок), ИГНСп-40 (с присадками, которые обеспечивают плавность движения) и пастообразной дисульфитмолибденовой смазкой. При смене типа смазки проводилось тщательное обезжиривание поверхностей направляющих (тампонами, смоченными в ацетоне) и сушка (на открытом воздухе при 20 °С в течение 10...15 мин).

Экспериментальные исследования показали, что при снижении амплитуды возвратно-поступательного движения и увеличении частоты реверсирования характеристики силы трения приобретали форму петли (рис. 2), верхняя ветвь правой части которой соответствовала изменению скорости от 0 до v_{\max} , а нижняя — от v_{\max} до 0.

При смазывании маслом И-40А и небольшой частоте реверсирования (рис. 2, а) падающая характеристика силы трения еще проявляется отчетливо. При дальнейшем возрастании частоты реверсирования (рис. 2, в) зависимость приближается к характеристике “сухого” трения, а площадь петли уменьшается. При смазывании маслом ИГНСп-40 характеристика имела вид симметричной петли (рис. 2, з), площадь которой также уменьшается при повышении частоты реверсирования (рис. 2, е). Подобная зависимость наблюдалась и при использовании дисульфидомолибденовой смазки. Общей закономерностью для всех случаев было снижение на 30...35 % величин трения покоя при периоде реверсирования $T = 0,1$ с (рис. 2, в и 2, е) по сравнению с такой же величиной при $T = 5$ с (рис. 2, а и 2, з).

Таким образом, при неравномерном движении необходимо различать кинетическую и динамическую зависимости трения. Если кинетическая зависимость традиционно определяется при ступенчатом изменении скорости, то динамическая — при существенных ускорениях и непрерывном изменении скорости. Их различие зависит от величины и знака ускорения движения. При частом реверсировании исполнительных органов станков и малой величине хода характеристика смешанного трения приобретает петлеобразную форму (рис. 2) и ее можно представить как параметрическое семейство двухзначных кривых. При этом отсутствует “падающая” характеристика трения. Такие зависимости могут возникать при скоростных возвратно-поступательных движениях узлов шлифовальных, заточных, затыловочных и некоторых других станков, а также промышленных роботов и манипуляторов. Например, скорости перемещения исполнительных органов в гидравлических манипуляторах достигают 1,0...1,2 м/с [2]. Эти механизмы функционируют в условиях, когда переходные периоды составляют основную часть времени рабочего цикла, а время работы с установившейся скоростью либо минимально, либо отсутствует.

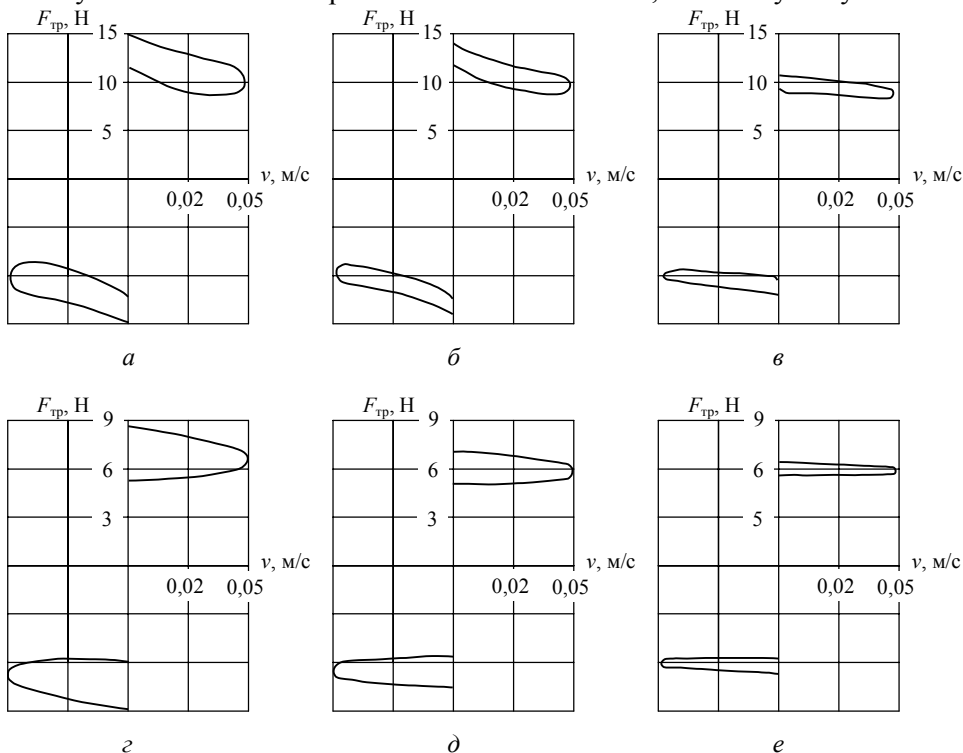


Рис. 2. Экспериментальные зависимости сил трения от скорости движения при частом реверсировании исполнительного органа и малой величине хода при смазывании маслом И-40А (а, б, в) и ИНСп-40 (г, д, е), период одного двойного хода $T = 5$ с (а, г), $T = 1$ с (б, д), $T = 0,1$ с (в, е)

Иными словами, высокоскоростной привод работает в условиях неустойчивого движения, когда величина давления в рабочей полости гидроцилиндра и противодействия в полости слива, перепад давлений на гидрораспределителе и сопротивление гидролиний изменяются в процессе движения исполнительного органа, а процесс движения жидкости в трубопроводах системы является нестационарным.

На основании проведенных экспериментальных исследований можно вносить поправки в расчетные величины диссипативных сил при моделировании динамических процессов в гидроприводах подачи станков, в частности, на снижение силы трения покоя при увеличении частоты реверсирования.

Литература

1. Левин А.И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / А.И. Левин. — М.: Машиностроение, 1978. — 184 с.
2. Проектирование гидравлических систем машин / Г.М. Иванов, С.А. Ермаков, Б.Л. Коробочкин, Р.М. Пасынков. — М.: Машиностроение, 1992. — 224 с.
3. Струтинський В.Б. Стохастичні процеси у гідроприводах верстатів: моногр./ В.Б. Струтинський, В.М. Тіхенко. — Одеса: Астропринт, 2009. — 456 с.
4. Тихенко В.Н. Исследование динамических характеристик гидроприводов подачи стола отделочно-расточных станков / В.Н. Тихенко, А.А. Волков // Пром. гідроліка і пневматика. — Вінниця, 2011, № 3(33). — С. 93 — 96.

References

1. Levin, A.L. Matematicheskoe modelirovanie v issledovaniyakh i proektirovanii stankov [Mathematical Modeling in Investigation and Design of Machine-Tools] / A. I. Levin. — Moscow, 1978. — 184 p.
2. Proektirovanie gidravlicheskih system mashin [Design of Machines' Hydraulic Systems] / G.M. Ivanov, S.A. Ermakov, B.L. Korobochkin, R.M. Pasyнков. — Moscow, 1992. — 224 p.
3. Strutynskiy V.B. Stokhastychni protsesy u hidropriyvodakh verstativ: monohr. [Stochastic Processes in Hydraulic Drives of Machine-Tools: monograph] / V.B. Strutynskiy, V.M. Tikhenko. — Odesa, 2009. — 456 p.
4. Tikhenko, V.N. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik gidroprivodov podachi stola otdelochno-rastochnykh stankov [The Study of Dynamic Characteristics of Hydraulic Table Feed Finishing and Boring Machines] / [Industrial Hydraulics and Pneumatics] Vinnytsya, 2011, # 3(33). — pp. 93 — 96.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Гутыря С.С.

Поступила в редакцию 15 марта 2012 г.