

## О СРЫВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЯХ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ ПРИ ПЛАВНОМ ПУСКЕ

**Введение.** Известно, что при медленном скольжении в механической системе с упругостью и парой трения возникают срывные фрикционные автоколебания (АКФ). Природа их возникновения описана в [1], где данные автоколебания были названы АКФ 1-го рода. В зарубежной литературе они известны под названием stick-slip (прилипание – скольжение) [2].

Возникая в промышленных машинах и механизмах, данное явление приводит к негативным эффектам, например, снижая точность позиционирования, что крайне нежелательно в таких механизмах как суппорты подачи металлообрабатывающих станков, в роботах и манипуляторах, и в других [3, 4]. Отмечается [1, 3, 4], что срывные АКФ возникают при скорости скольжения ниже, так называемой, критической ( $10^{-2}$ - $10^2$  мм/мин), и отсутствуют, если скорость скольжения выше нее. Уменьшение критической скорости повышает точность позиционирования.

**Анализ предыдущих исследований.** Попытки снижения критической скорости, предпринимаемые механиками, сводились к подбору и усовершенствованию смазки, вводимой между скользящими поверхностями [2, 4], что не обеспечивало должного решения проблемы. При объяснении и математическом описании физики и механики срывных АКФ не учитывались динамические свойства электропривода (ЭП), являющегося источником механической энергии и приводящего в движение рабочий орган. Между тем, известно, что эти свойства могут оказывать существенное влияние на характер движения, в одних случаях возбуждая АКФ не свойственные чисто механической системе, в других – демпфируя их [5, 6].

**Цель работы.** В данной статье путем компьютерного моделирования на примере ЭП механизма подачи металлорежущего станка исследуется возможность снижения критической скорости за счет плавного повышения скорости его движения при пуске.

**Материал и результаты исследований.** Выбор объекта исследования объясняется наличием экспериментальных исследований, описанных в [3], что позволило ранее [7] установить допустимость аппроксимации характеристики трения путем линеаризации на характерных ее участках. Подобное представление характеристики трения не вносит существенных искажений в характер движения, однако позволяет уяснить влияние на него каждого из участков, а также получить при необходимости аналитические соотношения.

В настоящей работе математическая модель исследуемого ЭП подачи металлорежущего станка представляет собой двухмассовую электромеханическую систему (ЭМС) с упругим кинематическим звеном, учитывающую внутреннее вязкое трение и электромагнитные инерционности электродвигателя (ЭД) и преобразователя (рис. 1). В структурной схеме все величины и параметры исследуемой ЭМС приведены к скорости ЭД и представлены безразмерными обобщенными, как предложено в [9], что позволяет однозначно определять характер динамического процесса, сократив число влияющих параметров. Плавный пуск скорости задания  $\omega_{зс}^*$  обеспечивает датчик интенсивности (ЗИ) (выделен пунктирной линией на рис. 1), где приняты следующие обозначения:  $\omega_{огр}^*$  – скорость, на которую выйдет ЗИ после разгона  $t_{разг}^*$ ,  $T_{и}^* = (\omega_{огр}^* / \omega_{зс}^*) \cdot t_{разг}^*$  – постоянная времени ЗИ. Характеристика трения 1, представленная на рис. 2, отображает мгновенный скачок момента трения при переходе от состояния покоя  $M_{ст}$  (точка А) к началу движения  $M_k$  (точка В), следующий за ним, падающий участок, линеаризованный отрезками ВС и CD и участок DE, на котором момент трения при изменении скорости скольжения сохраняется неизменным.

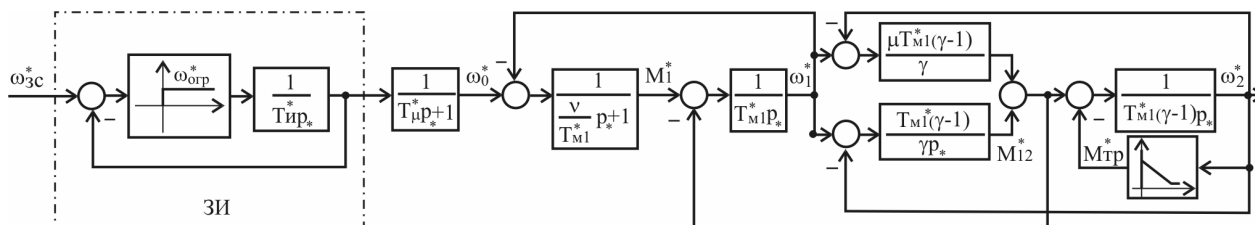


Рисунок 1 – Структурная схема двухмассовой ЭМС с характеристикой трения при обработке медленных перемещений с обобщенными параметрами и безразмерными величинами

Предпосылкой для исследования является тот факт, что плавная подача сигнала задания создает возможность обеспечения существенно меньшего ввода колебательной энергии в систему при трогании, нежели при прямом пуске ЭП, а переход на новую механическую характеристику ЭП к моменту наименьшего значения скорости скольжения на второй полуволне позволяет «увести» рабочую точку от остановки рабочего органа.

На рис. 2 пунктирной линией 3 показана фазовая траектория движения рабочего органа при прямом пуске ЭП с механической характеристикой 2, которая обеспечивает точку статического равновесия С на падающем участке характеристики трения 1 при подаче сигнала задания  $\omega_{зс}^*$  соответствующего значению критической скорости  $\omega_{кр}^*$  раз, зафиксированном при экспериментальных исследованиях в [8]. При подобном пуске в начальный момент времени в систему вводится большое количество колебательной энергии, что приводит к весьма значительным амплитудам скорости скольжения рабочего органа  $\omega_2^*$  и момента ЭД  $M_1^*$  (рис. 2). Перемещение рабочей точки на участках ВС, CD и DE характеристики трения сопровождается превышением рассеиваемой колебательной энергии над введенной в систему, что проявляется в затухании возникшего в ней колебательного процесса.

Компьютерное моделирование было выполнено для ЭП суппорта подачи металлорежущего станка с параметрами, приведенными в [3] и рассчитанными в [8]:  $\gamma = 1,02615$ ;  $\Omega_{12} = 98,728$ ;  $T_{M1}^* = 0,708$ ;  $v = 0,402$ ;

$T_{\mu}^* = 0,296$ ;  $\mu = 0,096$ ;  $p_* = p/\Omega_{12}$ . Для критической скорости полученные временные диаграммы момента и скорости ЭД, рабочего органа и упругого момента, представленные на рис. 3 (а, б) подтверждают отсутствие срывных АКФ и затухание колебательного процесса.

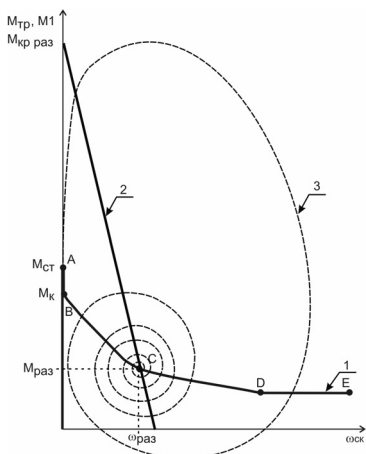


Рисунок 2 – Фазовая траектория движения разомкнутой системы при прямом пуске при скорости задания равной критической

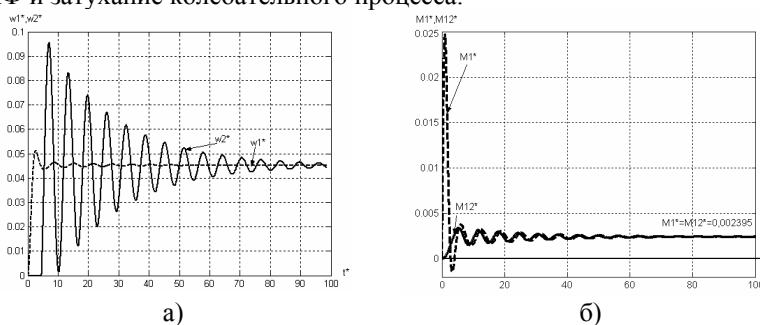


Рисунок 3 – Временные диаграммы скоростей  $\omega_1^*$  и  $\omega_2^*$  и моментов  $M_1^*$  и  $M_{12}^*$  в разомкнутой ЭМС при скорости задания  $\omega_{зс}^* = 0,0475$ , соответствующей линейной критической скорости подачи  $v_{зс} = 0,0069$  м/с

При скорости задания ниже критической  $\omega_{зс}^* < \omega_{кр}^*$  фазовая траектория движения рабочего органа (пунктирная линия 3 на рис. 4) завершается замкнутой орбитой, что свидетельствует о существовании автоколебательного процесса, а снижение скорости рабочего органа до нуля во время колебания (рис. 5 (а, б)) указывает на установление срывных АКФ. Этому случаю соответствует положение точки статического равновесия  $C_1$  на падающем участке ВС характеристики трения 1 при пересечении с механической характеристикой разомкнутой системы ЭП 2' на рис. 4.

Как видно из рис. 5 (а, б) время начала движения рабочего органа больше, чем длительности всех последующих его остановок. Это объясняется тем, что при включении ЭП нарастание упругого момента  $M_{12}$ , обеспечиваемого деформацией упругой связи под действием момента ЭД  $M_1$ , до значения момента трения покоя характеристики трения  $M_{ст}$  происходит с нуля, а для всех последующих (после окончания первого скачка) с некоторого остаточного значения упругого момента.

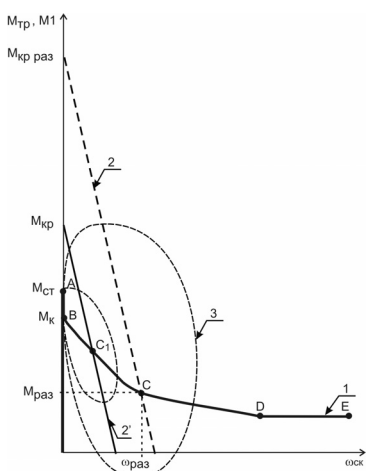


Рисунок 4 – Фазовая траектория движения разомкнутой системы при прямом пуске на малой скорости

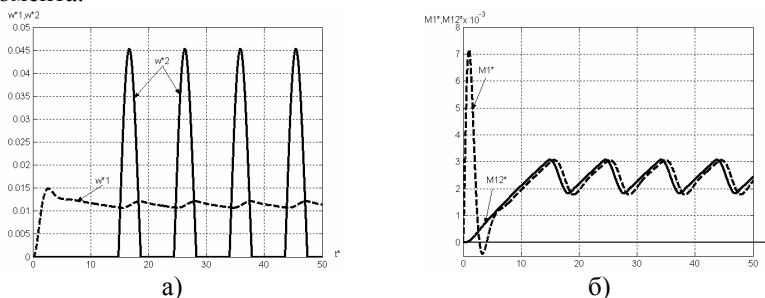
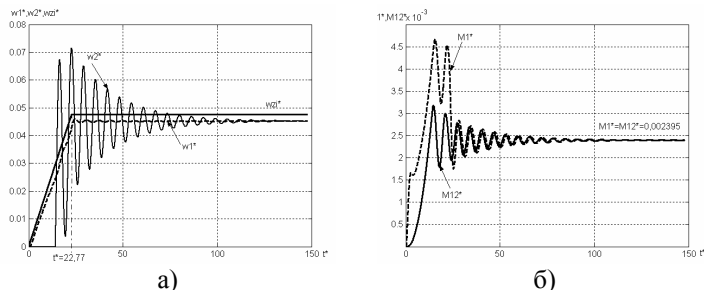


Рисунок 5 – Временные диаграммы скоростей  $\omega_1^*$  и  $\omega_2^*$  и моментов  $M_1^*$  и  $M_{12}^*$  в разомкнутой ЭМС при скорости задания  $\omega_{зс}^* = 0,0138$ , соответствующей линейной скорости подачи  $v_{зс} = 0,002$  м/с

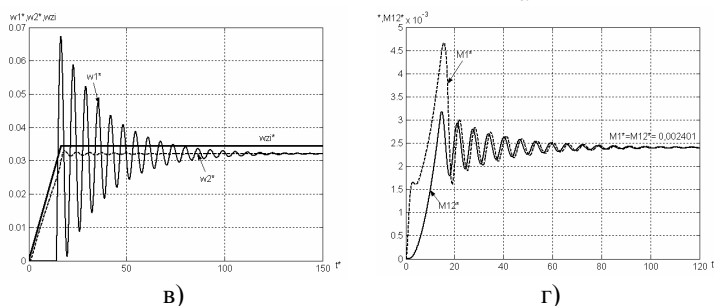
Результаты компьютерного моделирования разомкнутой ЭМС при прямых пусках с критической скоростью задания и ниже нее согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [3]. Это позволяет сделать вывод об адекватности объекта регулирования и возможности использования модели для компьютерного эксперимента и анализа динамических процессов системы при ее плавном пуске.

Плавное нарастание сигнала задания обеспечивает медленное нарастание упругого момента  $M_{12}$  до значения момента покоя  $M_{ст}$  характеристики трения, после чего начинается движение рабочего органа. При этом характер динамического процесса будет колебательным, что свойственно двухмассовым ЭМС с упругой связью.

При постановке компьютерного эксперимента интенсивность нарастания скорости задания  $\epsilon^* = \omega_{огр}^* / t_{разг}^*$



$t_{разг}^* = 22,7$  при ограничении  $\omega_{зс}^* = 0,0475$ , соответствующей линейной критической скорости подачи  $v_{зс} = 0,0069$  м/с



$t_{разг}^* = 16,5$  при ограничении  $\omega_{зс}^* = 0,03447$ ,

соответствующей линейной скорости подачи  $v_{зс} = 0,005$  м/с

Рисунок 6 – Временные диаграммы скоростей  $\omega_1^*$  и  $\omega_2^*$  и моментов  $M_1^*$  и  $M_{12}^*$  в ЭМС при плавном пуске

**Выводы.** Установлена принципиальная возможность снижения критической скорости при медленных перемещениях в условиях нелинейной нагрузки трения за счет плавного повышения скорости движения ЭП при его пуске.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин Б.В., Пуш В.Э., Толстой Д.М. Теория скольжения твердых тел с периодическими остановками. (Фрикционные автоколебания 1-го рода) // ЖТФ. – 1956. – Вып.6, Т.26. – С.1329 – 1342.
2. Armstrong – Helouvy V. Control of Machines with Friction. – Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/Lodon, 1991. – 173 p.
3. Эльясберг М.Е. Расчет подачи металлорежущих станков на плавность и чувствительность перемещения (О разрывных колебаниях при трении) // Станки и инструменты. – 1951. - №11. – С.1-7; №12. – С.6-9.
4. Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания. – М.: Наука, 1987. – 182 с.
5. Клепиков В.Б. О «фрикционных» автоколебаниях в электроприводах // Электричество. - № 4. – 1986. – С. 59-62.
6. Клепиков В.Б., Осичев А.В. Определение границ устойчивости электроприводов с вязким трением с учетом упругости кинематической цепи // Электричество. – 1989. - №1. – С.36 – 41.
7. Клепиков В.Б., Асмолова Л.В., Моисеенко П.Л. К моделированию фрикционных автоколебаний 1-го рода в электромеханических системах. – Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ, 2003. – Вип.2(19), Т.1. – С.180-184.
8. Асмолова Л.В. Исследование срывных фрикционных автоколебаний в системе подчиненного регулирования при традиционных и нетрадиционных настройках регуляторов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць. – Кременчук, 2005.– вип. 3(32).– С.84 – 88.
9. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.