

К УСТРАНЕНИЮ СРЫВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РЕЛЕЙНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

При работе машин и механизмов на малых скоростях в них могут возникать фрикционные автоколебания (АКФ) 1-го рода, или срывные АКФ, которые в зарубежной литературе называются stick-slip («прилипание – скольжение»). Их первопричиной являются скачки трения при переходе от состояния покоя к проскальзыванию [1]. Автоколебательный процесс в этом случае характеризуется неравномерным скольжением с периодическими остановками, что приводит к снижению точности позиционирования и крайне нежелательно в таких механизмах как суппорты подачи металлообрабатывающих станков, в роботах и манипуляторах и др.

Устранение срывных АКФ специалистами-механиками достигалось установкой механических демпферов, повышением жесткости кинематических связей, применением смазочных жидкостей и др. Использование электропривода (ЭП) как источника механической энергии создает предпосылки для создания системы автоматического управления, устраняющего либо существенно снижающего критическую скорость возникших срывных АКФ. В [2] представлены теоретические аспекты решения подобной задачи с помощью релейных систем управления (РСУ), работающих в скольльзящем режиме.

Целью данной статьи является анализ ЭП машин и механизмов, работающих на малых скоростях проскальзывания, в которых возможно применить РСУ для устранения срывных АКФ.

В качестве объекта управления при исследовании РСУ с нелинейной характеристикой трения для отработки медленных перемещений принята двухмассовая электромеханическая система (ЭМС) с упругой кинематической связью и нелинейной нагрузкой типа «пара трения» с механической характеристикой $M_{тр} = f(\omega_{ск})$, влияющей на вторую массу. Ее структурная схема, представленная на рис. 1, построена с применением обратных связей по координатам объекта ω_0^* , M_1^* , ω_1^* , M_{12}^* , ω_2^* . Все параметры приведены к скорости вращения электродвигателя (ЭД) и представлены в обобщенных, а координаты системы в безразмерных величинах [3].

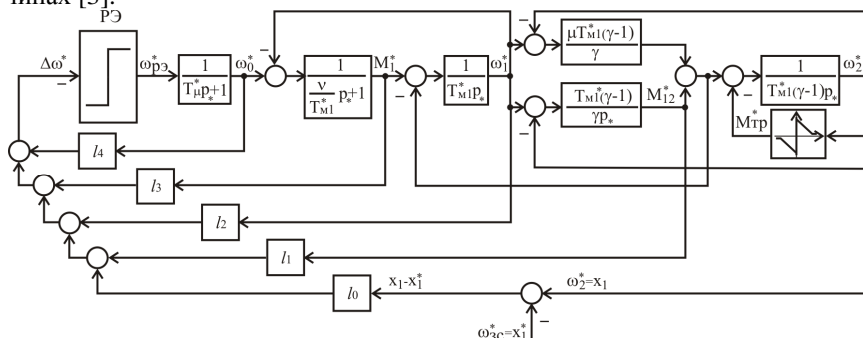


Рис. 1 Структурная схема релейной системы управления

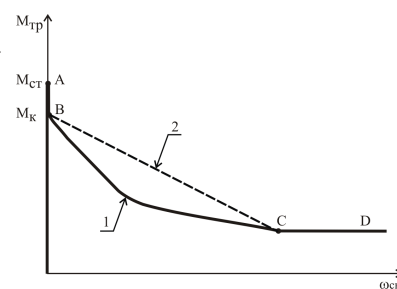


Рис. 2 Характеристика трения

В характеристике трения $M_{тр} = f(\omega_{ск})$ (рис. 2) можно выделить: момент трения покоя $M_{ст}$ (точка А), момент трения начала движения $M_{к}$ (точка В), падающий участок (BC) – 1 или 2, на котором увеличение скорости сопровождается уменьшением момента трения, участок практически неизменного момента трения при увеличении скорости (CD). Переход из точки А в точку В осуществляется скачкообразно, в момент начала проскальзывания. Характеристика трения 1 на рис. 2 подобного вида была получена при постановке физического эксперимента проф. М.Е. Эльясбергом [4], применительно к механизмам подачи металлорежущих станков. Известно [1, 5], что первопричиной срывных АКФ является различие трения покоя и начала движения.

На этапе проверки корректности результатов синтеза, описанного в [2], моделирование синтезированной РСУ с нелинейной характеристикой трения для отработки медленных перемещений производилось с шагом интегрирования $\Delta t^* = 10^{-6}$ в программной среде MATLAB (Simulink). Силовой преобразователь представлен апериодическим звеном. Такое его математическое описание подходит для большинства силовых преобразователей, применяющихся в современных системах автоматизированного ЭП. Релейный регулятор скорости включает в себя релейный элемент (РЭ) и коэффициенты обратных связей ($l_1 \dots l_5$) по координатам объекта регулирования, которые были синтезированы при условии, что точка статического равновесия находится на падающем участке характеристики трения (BC). Сигналы обратных связей суммируются и подаются на вход РЭ. Все параметры модели вводятся в модель Simulink в численном виде: $\gamma = 1,026$, $T_{m1}^* = 0,708$, $\nu = 0,4$, $\mu = 0,096$, а T_{μ}^* принимается в зависимости от типа рассматриваемого преобразователя [6]. На вход системы подается скачком сигнал относительной угловой скорости задания ω_{3c}^* .

Для проверки методики расчета релейного регулятора скорости [2] на условие существования скользящего режима принимается:

– величина среднегеометрического корня (СГК) $\Omega_0^* = 314/\Omega_{12}$, соответствующего полосе пропускания РСУ $f = 50$ Гц, где $\Omega_{12} = 98,728 \text{ c}^{-1}$;

– в звене РЭ ширина петли гистерезиса равна 0;

– нелинейная характеристика трения линеаризована на характерных участках (характеристика 2 на рис. 2);

– постоянная времени силового преобразователя равна $T_{\mu}^* = 0,003 \cdot \Omega_{12}$;

– относительная угловая скорость задания равна критической скорости $\omega_{3c}^* = 0,1234$, соответствующая линейной скорости подачи $v_{3c} = 0,0168$ м/с (выше которой колебания не возникают, а ниже – имеют место).

На рис. 3 приведены графики переходных процессов в ЭП с релейным регулятором скорости, реализующим алгоритм управления в виде $\omega_{3c}^* = -\omega_{3c}^* \max \text{sign} [l_1 \cdot (x_1 - x_1^*) + l_2 x_2 + l_3 x_3 + l_4 x_4 + l_5 x_5]$, где x_1^* – желаемая траектория управляемой координаты; $\omega_2^* = x_1$, $M_{12}^* = x_2$, $\omega_1^* = x_3$, $M_1^* = x_4$, $\omega_0^* = x_5$ [2].

Из рис. 3,а видно, что в системе с момента времени $t^* = 1,49$ наблюдается скользящий режим. Стабилизация выходной координаты системы ω_2^* , а также ω_1^* (рис. 3,б), действительно обеспечивается на заданном уровне при переключении релейного регулятора скорости с частотой $f_{p3} = 78,46$ кГц. Однако в реальной системе управления РЭ, как правило, не используется без петли гистерезиса,

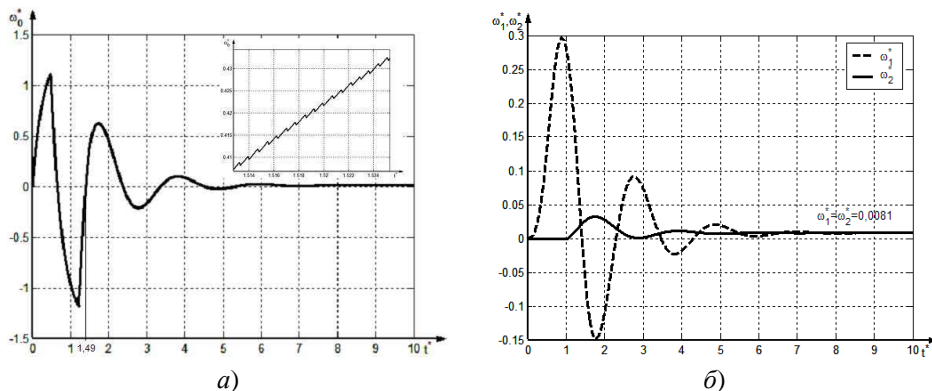


Рис. 3 Временные диаграммы выхода силового преобразователя ω_0^* (а), скорости ЭД ω_1^* и рабочего органа ω_2^* (б) РСУ при скорости задания $\omega_{3c}^* = 0,1234$, соответствующей линейной скорости подачи $v_{3c} = 0,0168$ м/с

а полоса пропускания контура тока, например, с тиристорным преобразователем в ЭП ЭТб, не превышает 80 Гц [7]. Поэтому возникает необходимость ввести в модель РЭ с петлей гистерезиса и, варьируя ее значения, оценить, будут ли колебания на выходе релейного регулятора лежать в пределах полосы пропускания РСУ с тиристорным преобразователем $f = 50$ Гц, а затем то же выполнить и для транзисторного преобразователя.

Результаты исследований показали, что частота переключения РЭ изменяется по экспоненциальной зависимости (график 1 на рис. 4) и при ширине петли гистерезиса РЭ $\delta = 0,008$ она равна $f_{p3} = 106$ Гц. На рис. 5 для этого случая представлены графики переходных процессов, из которых видно, что система входит в скользящий режим при $t^* = 2,94$, а частота переключения РЭ действительно равна $f_{p3} = 106$ Гц. Из временной диаграммы скорости рабочего органа ω_2^* (рис. 5,б) видно, что до вхождения системы в скользящий режим наблюдается его остановка, т.е. $\omega_2^* = 0$. Это свидетельствует о том, что системе не хватило запаса по напряжению при принятом быстродействии преобразователя. Таким образом, чтобы для этого и других механизмов сделать вывод о возможности реализации синтезированной системы на базе тиристорного преобразователя необходимо дополнительно провести ее исследования с учетом реальных его свойств.

Если же в качестве силового преобразователя рассматривать транзисторный преобразователь с постоянной времени $T_{\mu}^* = 0,0003 \cdot \Omega_{12}$, то, как установлено, при ширине гистерезиса РЭ $\delta = 0,003$ частота его переключения получается равной $f_{p3} = 2,75$ кГц. Это приемлемо для приводов с транзисторными преобразователями, например, серий ПРП, ЭШИР или ЭШИМ, в которых частота переключения ШИМ выше 3 кГц [7]. График зависимости частоты переключения РЭ от ширины петли гистерезиса на входе транзисторного преобразователя представлен на рис. 4 (график 2), а процессов для РСУ с транзисторным преобразователем на рис. 6.

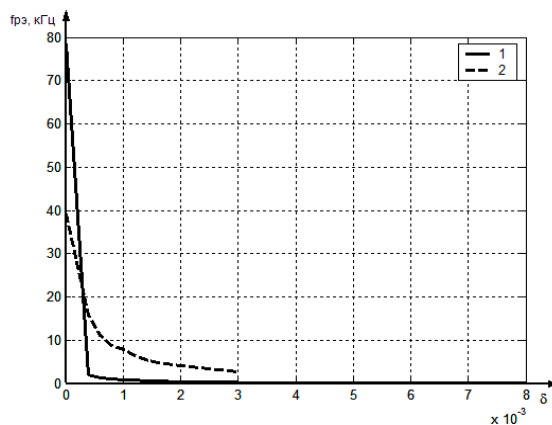


Рис. 4 Зависимость частоты переключения от ширины петли гистерезиса РЭ

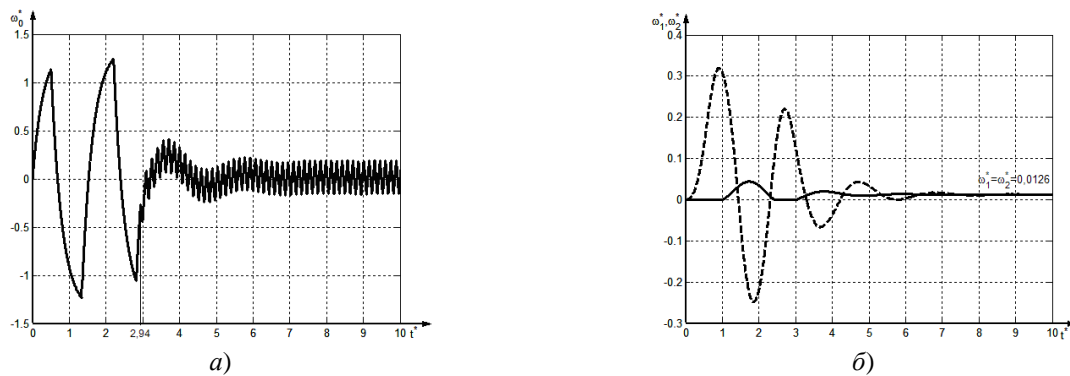


Рис. 5 Временные диаграммы выхода тиристорного преобразователя ω_0^* (а), скорости ЭД ω_1^* и рабочего органа ω_2^* (б) РСУ при скорости задания $\omega_{зс}^* = 0,129$, соответствующей линейной скорости подачи $v_{зс} = 0,0176$ м/с

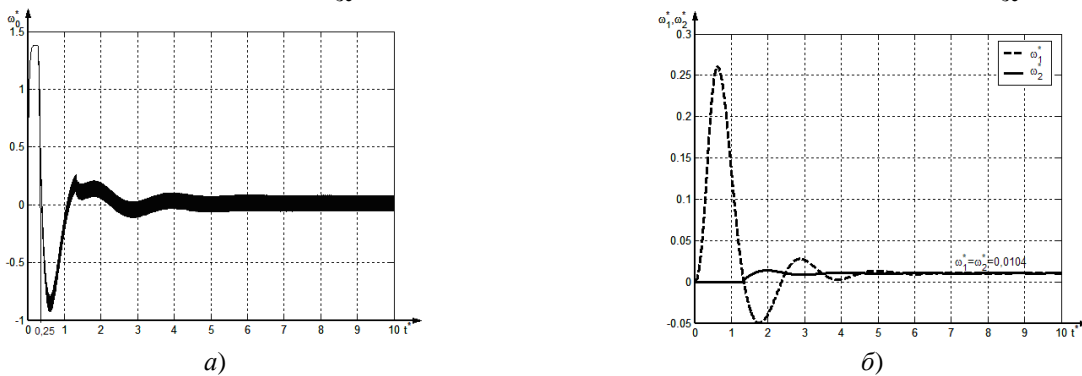


Рис. 6 Временные диаграммы выхода транзисторного преобразователя ω_0^* (а), скорости ЭД ω_1^* и рабочего органа ω_2^* (б) РСУ при скорости задания $\omega_{зс}^* = 0,127$, соответствующей линейной скорости подачи $v_{зс} = 0,0172$ м/с

Из временных диаграмм видно, что синтезированная РСУ [2] приемлема для приводов с транзисторным преобразователем. Дополнительную проверку работоспособности системы можно произвести, рассмотрев транзисторный преобразователь не апериодическим звеном, а более детально – с учетом ключевого режима работы его транзисторов.

Таким образом, синтезированная в [2] РСУ представляется применимой для ЭМС с ЭД постоянного тока и транзисторным преобразователем. Подобная РСУ также применима для сервоприводов переменного тока с синхронной машиной с постоянными магнитами, а именно для управления моментобразующей составляющей тока статора при условии, что поток постоянный [8]. Что касается ЭП с тиристорным преобразователем, которые достаточно часто встречаются в станочных приводах, то ширина петли гистерезиса релейного регулятора скорости должна быть проверена/подобрана на виртуальной модели РСУ, поскольку частота переключений РЭ лежит близко к границе полосы пропускания тиристорного преобразователя.

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. Асмолова Л.В. Синтез релейного регулятора условно неустойчивой электромеханической системы для устранения срывных фрикционных автоколебаний // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2012. – вип. 3(19). – С. 320 – 323.
3. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
4. Эльясберг М.Е. Расчет механизмов подачи металлорежущих станков на плавность и чувствительность перемещения. (О разрывных колебаниях при трении) // Станки и инструмент. – 1951. – № 11. – С. 1 – 7, № 12. – С. 6 – 9.
5. Пуш В.Э. Малые перемещения в станках. – М.: Машгиз, 1961. – 124с.
6. Асмолова Л.В. Исследование срывных фрикционных автоколебаний в системе подчиненного регулирования при традиционных и нетрадиционных настройках регуляторов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – вип. 3 (32). – С. 84 – 88.
7. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
8. Полилов Е.В., Батрак А.М., Руднев Е.С. Практическая реализация разрывных алгоритмов в системах векторного управления синхронными электродвигателями // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Ч.1, вип. 3 (62). – С. 30-36.