

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХМАССОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЯХ И ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННЫХ СИЛ ТРЕНИЯ

Жердев А. В., Задорожний Н. А.

Рассмотрено явление автоколебаний, возникающих в механической подсистеме электропривода на примере привода подъёмника слябов машины непрерывного литья заготовок. Проанализировано характеристическое уравнение электромеханической системы на предмет устойчивости в зависимости от непрерывно изменяющегося коэффициента вязкого трения. Получены осциллограммы работы ЭМС в режимах положительного, отрицательного и отсутствующего вязкого трения при набросе нагрузки. Установлен диапазон коэффициента вязкого трения для выполнения условия устойчивости ЭМС.

Розглянуто явище автоколивань, що виникають в механічній підсистемі електроприводу на прикладі приводу підйомника слябів машини безперервного лиття заготовок. Проаналізовано характеристичне рівняння електромеханічної системи на предмет стійкості в залежності від коефіцієнта в'язкого тертя, який безперервно змінюється. Отримано осцилограми роботи ЕМС в режимах позитивного, негативного і відсутнього в'язкого тертя при набірці навантаження. Встановлено діапазон коефіцієнта в'язкого тертя для виконання умови стійкості ЕМС.

The phenomenon of self-excited oscillations arising in the mechanical subsystem of the drive on the example of the drive lift slab continuous casting machine was considered. We analyzed the characteristic equation of electromechanical system for stability depending on the continuously varying ratio of viscous friction. EMC works waveform were obtained in the positive mode, negative and lack of viscous friction with load-on. The range of coefficient of viscous friction to perform EMC stability conditions was established.

Жердев А. В.

студент ДГМА

Задорожний Н. А.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА  
ket@dgma.donetsk.ua

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 255:29.1

Жердев А. В., Задорожний Н. А.

**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХМАССОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЯХ И ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННЫХ СИЛ ТРЕНИЯ**

Главной задачей разработки автоматизированных электроприводов технологических машин является точное воспроизведение заданных законов движения исполнительных органов и уменьшение динамических нагрузок.

Для групп регулируемых электроприводов, используемых в станкостроении, робототехнике, металлургических машинах и подъемно-транспортных механизмах наличие упругих механических звеньев и переменных сил трения на валу механизма является характерной особенностью. В динамике упругие механические звенья являются причиной возбуждения колебаний с ростом дополнительных механических нагрузок электропривода, искажением заданных законов движения и снижения устойчивости системы в целом.

Целью работы является исследование изменений устойчивости при наличии переменных сил трения в упругой двухмассовой системе.

Объект исследования – упругая механическая подсистема с вязким трением на валу механизма.

Материалы и результаты исследований. В диапазоне скоростей электродвигателя  $\omega_1 < \omega_d < \omega_3$  при отработке ошибки регулирования, составляющие вязкого трения изменяются по величине и могут принимать отрицательные значения (рис. 1). В результате влияния «отрицательного» вязкого трения на валу механизма ослабляется демпфирование упругих колебаний в механической подсистеме электропривода, и при определенных значениях коэффициента трения  $\alpha_2 = dM_{тр}/d\omega_d$  происходит самовозбуждение колебаний (дестабилизация) и потеря устойчивости.

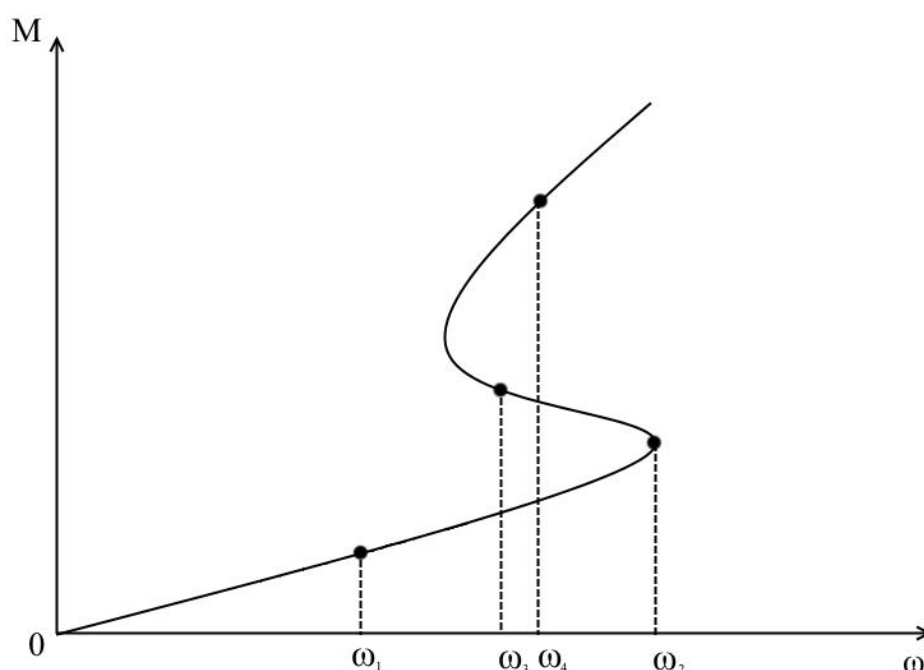


Рис. 1. Механическая характеристика электропривода

В электромеханических системах, таких как подъёмно-транспортные машины, металлообрабатывающие станки, рельсовый транспорт, валки прокатных станов могут возбуждаться механические колебания. К одной из причин их появления можно отнести отрицательное вязкое трение. Автоколебания, возникающие в ЭМС, сокращают срок службы агрегатов, увеличивают упругие нагрузки в кинематических звеньях, ухудшают технологический процесс.

Для решения данной проблемы предложены различные способы: использование адаптивных регуляторов, введение дополнительных обратных связей по координатам электропривода, а также применение нейронных сетей в системе управления.

Динамические свойства механической подсистемы исследуемого электропривода можно представить структурной схемой в обобщенной форме и общепринятыми обозначениями, приведенной на рис. 2.

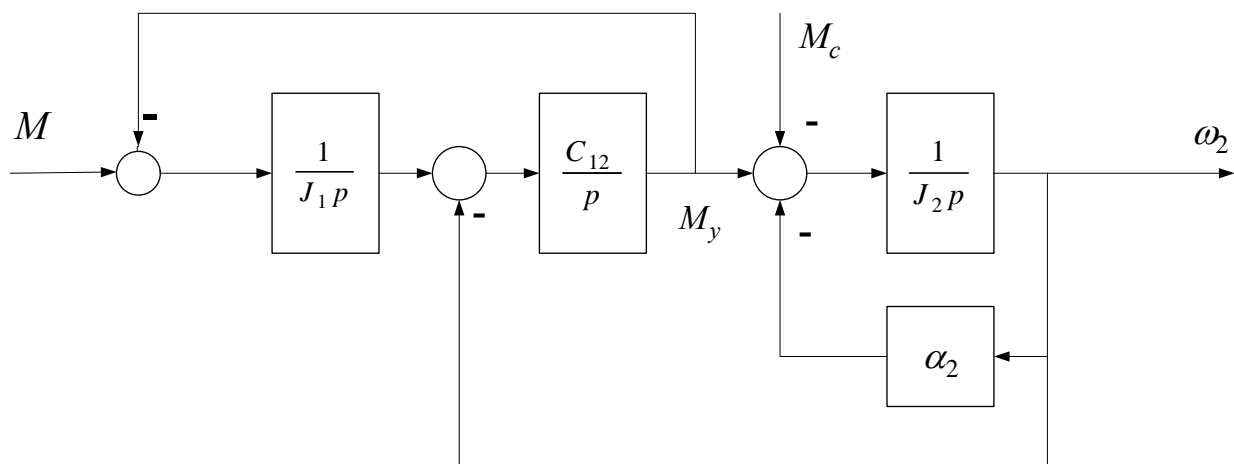


Рис. 2. Механическая подсистема

Механическая подсистема (МП) описана двухмассовой расчетной схемой с упругим звеном. Трение принимается вязким, но в зависимости от скорости знак коэффициента принимает положительные и отрицательные значения. Исследование электропривода как электромеханической системы (ЭМС) производится на основании метода её представления отдельными (парциальными) взаимодействующими подсистемами – МП и ЭП.

Свойства ЭМС определяются характеристическим уравнением:

$$\frac{J_1 J_2}{\beta C_{12}} p^3 + \frac{\alpha_2 J_1}{\beta C_{12}} p^2 + \frac{\gamma J_1}{\beta} p + \frac{\alpha_2}{\beta} = 0 \quad (1)$$

где  $\beta = dM/d\omega$ ;

$\alpha_2$  – коэффициент вязкого трения.

Преобразуем уравнение к каноническому виду:

$$\gamma T_{m1} T_y^2 p^3 + T_{m1} T_\delta p^2 + \gamma T_{m1} p + \varepsilon - 1 = 0 \quad (2)$$

где  $\gamma = (J_1 + J_2) / J_2$  – коэффициент соотношения инерционных масс;

$T_{m1} = J_1 / \beta$  – постоянная механическая времени двигателя;

$T_y = 1 / \sqrt{C_{12}(1/J_1 + 1/J_2)}$  – постоянная времени упругости;

$T_\delta = \alpha_2 / C_{12}$ ;

$\varepsilon = 1 + \frac{\alpha_2}{\beta} = \frac{\omega_0}{\omega_2}$ .

Параметр  $\varepsilon$  выведен из уравнения механической характеристики  $\omega=f(M)$  для линейной части графика при допущении установившегося режима:  $\omega = \omega_0 - M_T / \beta$ , где  $M_T = \alpha_2 \omega$ . Этот параметр был выбран для изучения, так как его изменение в процессе пуска, торможения и регулирования скорости двигателя напрямую влияет на условия устойчивости механической подсистемы.

В ходе исследования был рассмотрен механизм подъёма слябов машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), разработанной и изготовленной на Новокраматорском машиностроительном заводе (г. Краматорск, Украина). Она обладает следующими параметрами электромеханической системы (табл. 1).

Таблица 1

Параметры МП механизма подъёма слябов машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

Номинальная мощность двигателя:	$P_H = 200$ кВт
Номинальное напряжение двигателя:	$U_H = 380$ В
Номинальный ток якоря:	$I_H = 349$ А
Номинальная частота вращения якоря двигателя:	$n_H = 990$ мин <sup>-1</sup>
Номинальное скольжение:	$S_H = 0,01$
Момент инерции якоря двигателя:	$J_1 = 8.3$ кг·м <sup>2</sup>
Число пар полюсов индуктора двигателя:	$p_H = 3$
Кратность пускового тока:	8,7
Кратность пускового момента:	2,2
Кратность критического момента:	2,7
Номинальный КПД	0,95
Номинальный коэффициент мощности	0,87
Частота колебаний механической подсистемы	12,339 с <sup>-1</sup>
Коэффициент соотношения инерционных масс	1,4

Было определено, что для реальных механизмов коэффициент вязкого трения может варьироваться в пределах  $0,2-0,6$ , т.к.  $\lambda_{em} = 2\pi\alpha / \Omega_{12} = 0,1...0,3$  [2].

Так как в рабочем механизме возникают вязкие колебания с потерей устойчивости, то для исследования устойчивости электромеханической системы предлагается воспользоваться критерием Гурвица для уравнения третьего порядка [3]. Согласно [2], для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты уравнения были положительными, а также соблюдалось соотношение

$$a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0. \quad (3)$$

Ввиду физического смысла переменных (постоянные времени), положительность всех коэффициентов достигается при  $\varepsilon > 1$ . Запишем достаточное условие устойчивости:

$$T_{M1} T_{\partial} > T_y^2 (\varepsilon - 1); \quad (4)$$

Коэффициент вязкого трения, в свою очередь, должен быть положительным ( $\varepsilon > 1$ ), что является необходимым условием устойчивости системы.

Так как устойчивость системы определяется знаком действительной части корней уравнения, то уместным будет изобразить на графике вариацию действительной части корней в зависимости от номера итерации и  $\varepsilon$  (рис. 2).

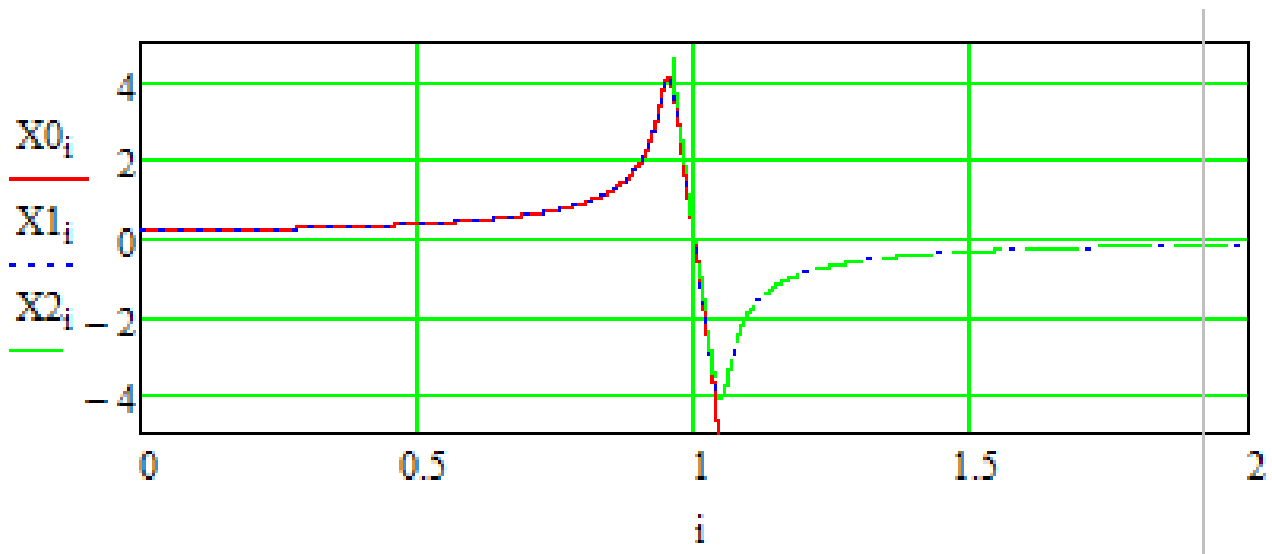


Рис. 2. Вариация действительной части корней в зависимости от итерации и  $\varepsilon$

На данном графике подтверждается, что САУ переступает через границу устойчивости при  $\varepsilon > 1$ , что было получено выше, при этом асимптотически приближаясь к оси абсцисс.

Исходя из результатов исследования, можно сделать вывод, что механическая подсистема двухмассовой электромеханической системы будет устойчива только при наличии сил трения ( $\varepsilon > 1$ ), оказывающих сопротивление движению инерционных масс. Следовательно, отрицательное вязкое трение можно отнести к полностью вредным явлениям в работе электромеханических систем.

Для наглядности выполнения условий устойчивости необходимо провести моделирование работы ЭМС при различных значениях коэффициента вязкого трения относительно нуля. На рис. 4 изображены возможные вариации происходящих процессов в ЭМС при разных значениях вязкого трения для режимов наброса нагрузки. В качестве общей закономерности на полученных осциллограммах можно проследить дестабилизирующее действие отрицательного вязкого трения при увеличении  $\varepsilon$ .

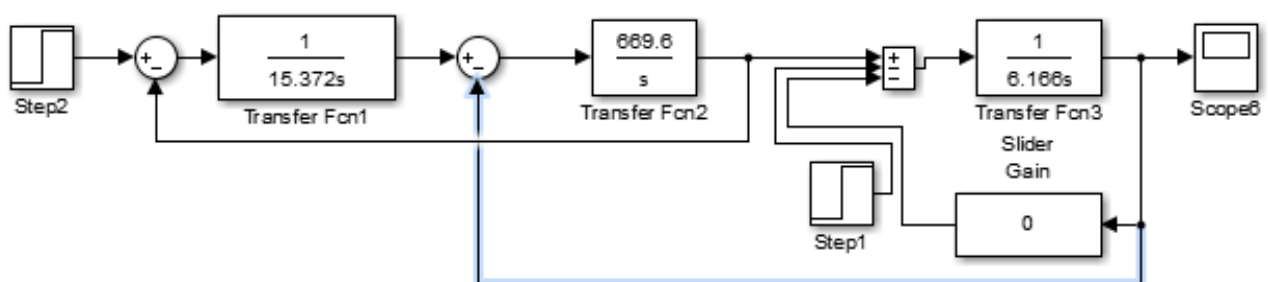


Рис. 3. Модель исполнительного механизма

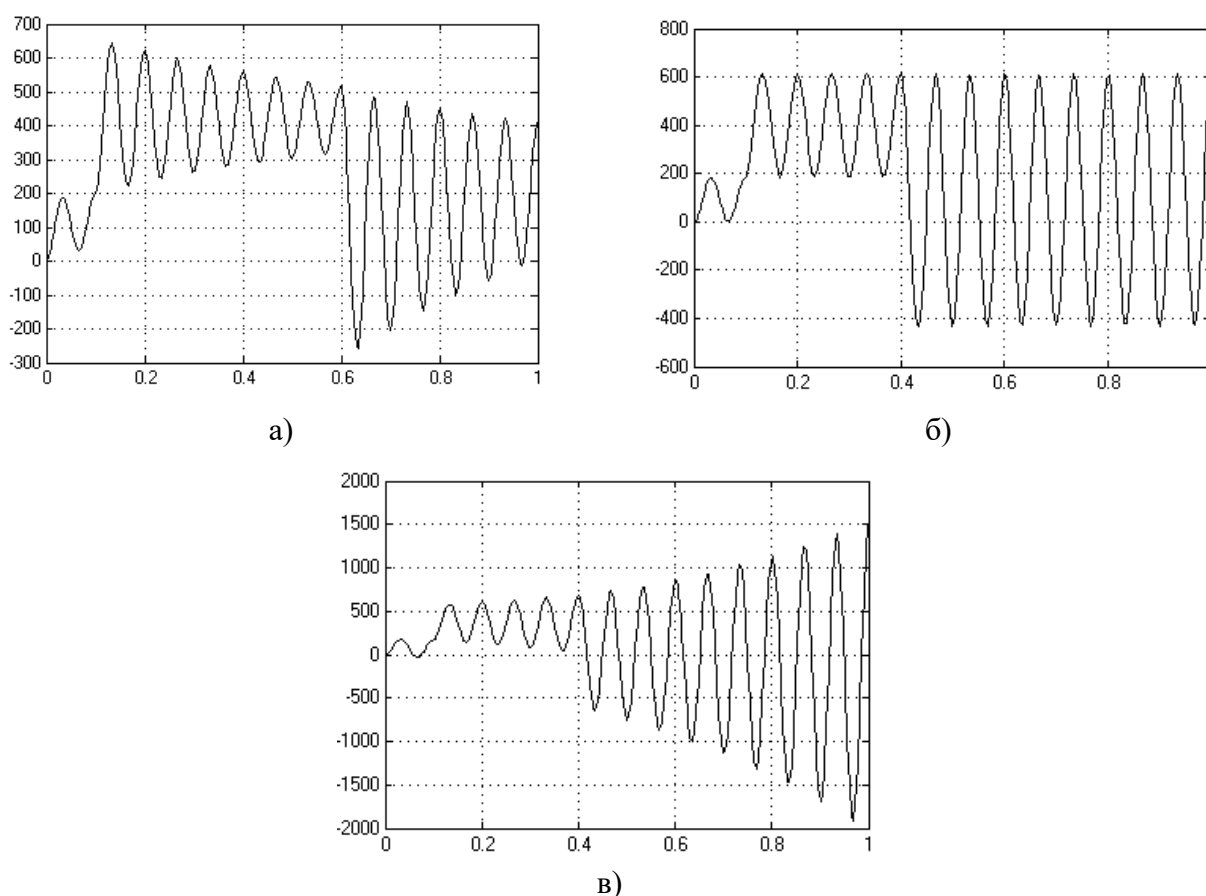


Рисунок 4. Осциллограмма упругого момента:  
а –  $\varepsilon > 1$ ; б –  $\varepsilon = 1$ ; в –  $\varepsilon < 1$

### ВЫВОДЫ

В механической подсистеме на рабочих участках механической характеристики могут иметь место режимы незатухающих колебаний и дестабилизации с потерей устойчивости. Условия устойчивости показывают, что обеспечить требуемые технологические процессы можно за счёт выбора конструктивных параметров при формировании жёсткости механической характеристики. Устойчивое движение удобно обеспечивать средствами управления электроприводом, сохраняя в системе положительное вязкое трение.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванченко Ф.К. Динамика металлургических машин / Ф. К. Иванченко, В. А. Красношапка. – М.: Металлургия, 1983. – 295 с.
2. Ключев В.И. Анализ электромеханической связи при упругих колебаниях в электроприводе / В. И. Ключев // *Электричество*. – 1971. – № 9. – С. 47–51.
3. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский. – М.: Энергоиздат, 1975 – 767 с.
4. Ребедак О. А. Оптимизация режимов работы слябового подъемника машины непрерывного литья заготовок с целью ограничения динамических нагрузок / О. А. Ребедак, С. А. Бакан, Н. А. Задорожний // *Электромеханічні і енергозберігаючі системи*. – № 3/2012 (19). – С. 439–444.
5. Клепиков В.Б. Квазинейрорегулирование двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением / В. Б. Клепиков, И. С. Полянская // *Электротехника*. – 2003. – № 3. – С. 29–33.
6. Лозинский О.Ю. Синтез электромеханических систем с использованием обобщенного характеристического полинома / О. Ю. Лозинский // *Электротехника*. – 2003. – № 3. – С. 25–29.

Статья поступила в редакцию 27.09.2016 г.