

СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОДНОМАССОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ПРИ НАЛИЧИИ ФРИКЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

Мотченко А.И., Щёлоков А.Г.

Донбасский горно-металлургический институт

In given clause the question of liquidation of the phenomenon of frictional auto oscillations is considered by application of relay control systems. For one-mass system of the electrodrive the synthesis of a relay control system by method of a return problem of dynamics is submitted. The results of computer modeling are shown.

На сегодняшний день в различных отраслях промышленности существуют многочисленные машины и механизмы, нагрузка которых в рабочих или аномальных режимах представляет собой пару трения (валки прокатных станов, колесно-рельсовый транспорт, толкатели нагревательных печей и др.). Для указанного класса механизмов в качестве механической характеристики (МХ) фрикционной нагрузки (ФН) наиболее часто принимается зависимость, представленная на рис.1[1, 2]. В работе [1] проф. В.Б. Клепикова доказано, что наличие падающего участка МХ ФН при определенных соотношениях параметров электропривода (ЭП) может привести к возникновению фрикционных автоколебаний (ФА) (см. рис.2). Следствием ФА является ускоренный износ и аварийные разрушения кинематических звеньев механизмов, снижение производительности труда, ухудшение качества выпускаемой продукции и пр.

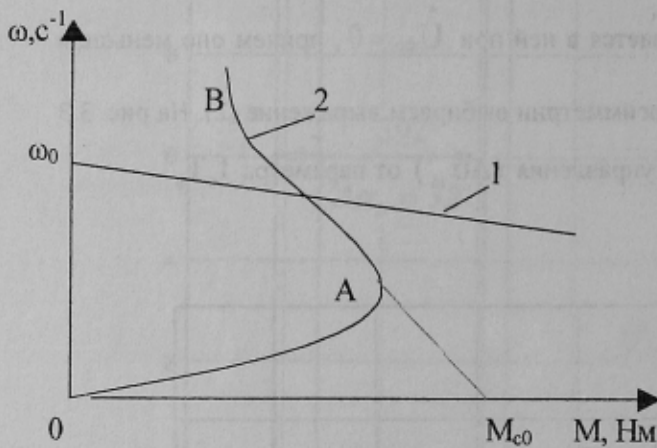


Рисунок 1 – Механические характеристики:
1 – разомкнутой системы ЭП, 2 – ФН

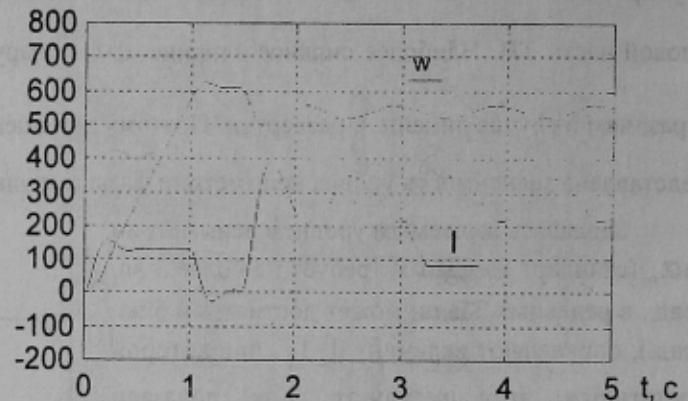


Рисунок 2 – Графики переходных процессов для тока и скорости двигателя при пуске разомкнутой системы ЭП на холостом ходу и набросе ФН (результаты моделирования)

Реальные промышленные ЭП функционируют в условиях действия различных параметрических и координатных возмущений [3]. Во многих ЭП явления ФА и нестационарности параметров могут существовать одновременно, причиняя тем самым еще больший вред. Поэтому задача одновременной ликвидации ФА и последствий нестационарности параметров объекта управления (ОУ) при обеспечении требуемых показателей качества является весьма актуальной.

В [4] доказано, что решение данной комплексной задачи возможно путем применения релейных систем управления (РСУ), синтезированных методом аналитического конструирования регуляторов. Однако существует и другой способ синтеза РСУ – метод обратной задачи динамики (ОЗД) [5]. Воспользуемся этим методом для получения наиболее полного представления о работе РСУ при наличии ФН.

В качестве ОУ принимаем одномассовый электромеханический объект с ФН (преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения). С учетом общеизвестных допущений, данный ОУ описывается следующей системой дифференциальных уравнений в относительных единицах:

$$\begin{cases} px_1 = a_{12}x_2; \\ px_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3; \\ px_3 = a_{33}x_3 + b_3U, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$a_{12} = \frac{C\Phi \cdot I_m}{J_{\Sigma} \cdot \omega_m}; \quad a_{21} = -\frac{C\Phi \cdot \omega_m}{I_m \cdot T_3 \cdot R_3}; \quad a_{22} = -\frac{1}{T_3}; \quad a_{23} = \frac{E_{nm}}{I_m \cdot T_3 \cdot R_3};$$

$$a_{33} = -\frac{1}{T_{\mu}}; \quad b_3 = \frac{k_n \cdot U_m}{T_{\mu} \cdot E_{nm}}; \quad x_1 = \frac{\omega}{\omega_m}; \quad x_2 = \frac{I}{I_m}; \quad x_3 = \frac{E_n}{E_{nm}}; \quad U = \frac{U_y}{U_{ym}};$$

$\omega_m, I_m, E_{nm}, U_{ym}$ – максимальные значения скорости и тока двигателя, ЭДС преобразователя и управляющего напряжения;

ω, I, E_{nm}, U_y – текущие значения скорости и тока двигателя, ЭДС преобразователя и управляющего напряжения;

x_1, x_2, x_3, U – текущие значения скорости и тока двигателя, ЭДС преобразователя и управляющего напряжения в относительных единицах.

При этом зависимость $M_c = f(\omega)$ не учитывается, т.е. ФН представлена как координатное возмущение.

Осуществим синтез РСУ одномассового ЭП методом ОЗД. Исходя из требований к качеству переходных процессов, зададимся нормированным полиномом второго порядка:

$$D_{II}(p) = p^2 + b_1 \omega_0 p + \omega_0^2,$$

где ω_0 – среднегеометрический корень.

Задаем желаемую траекторию x_1^* в виде:

$$d_0 x_1^* = (p^2 + d_1 p + d_0) x_1,$$

где $d_1 = b_1 \omega_0, d_0 = \omega_0^2$ – элементы вектора $D = [d_0 \ d_1 \ 1]$.

Согласно [5], получаем алгоритм управления релейного регулятора скорости в фазовом пространстве производных:

$$U_{pc} = U_m \text{sign} [L (Z^* - Z)], \quad (2)$$

где $L = D = [d_0 \ d_1 \ 1]$ – вектор коэффициентов обратных связей, $Z = [x_1 \ p x_1 \ p^2 x_1]^T$ – вектор канонических координат, $Z^* = [x_1^* \ p x_1^* \ p^2 x_1^*]^T$ – вектор заданных траекторий.

Структурная схема РСУ, реализующей алгоритм управления (2), представлена на рис. 3 а).

Полученная система автоматического регулирования обеспечивает квазиинвариантность к параметрическим и координатным возмущениям и, как следствие, нулевую статическую ошибку. Однако РСУ, синтезированная в фазовом пространстве производных, обладает определенными недостатками – сложностью технической реализации и высокой чувствительностью к помехам в канале обратных связей. Поэтому представляет интерес синтез альтернативной РСУ в фазовом пространстве координат, лишенной данных недостатков.

В этом случае алгоритм управления релейного регулятора скорости имеет вид:

$$U_{pc} = U_m \text{sign} [L (X^* - X)], \quad (3)$$

где $L = D K^{-1} = [l_1 \ l_2 \ l_3]$ – вектор коэффициентов обратных связей, $X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ – вектор исходных координат, $X^* = [x_1^* \ 0 \ 0]^T$ – вектор заданных траекторий, K – матрица канонического преобразования [5].

Данная РСУ обладает статической ошибкой по задающему и возмущающему воздействиям. Для обеспечения астатизма первого порядка по заданию и возмущению предлагается дополнить алгоритм управления (3) пропорционально-интегральной связью, целесообразность применения и методика расчета которой представлены в [6]. Получаем новый алгоритм управления релейного регулятора скорости:

$$U_{pc} = U_m \text{sign} [\Theta_{mic} + L (X^* - X)], \quad (4)$$

где Θ_{mic} – величина пропорционально-интегральной связи, зависящая от ошибки регулирования $\eta_1 = x_1^* - x_1$.

Структурная схема РСУ, реализующей алгоритм управления (4), представлена на рис. 3 б).

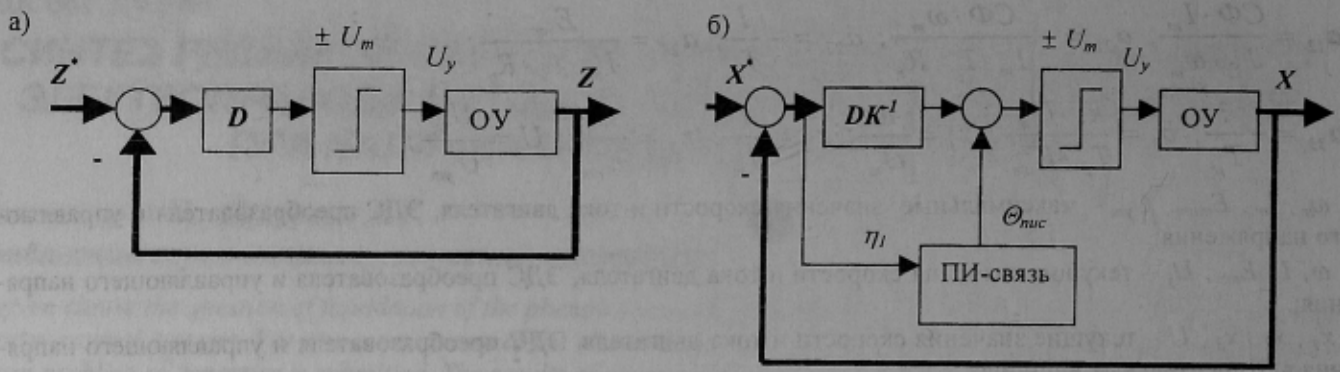


Рисунок 3 – Структурные схемы РСУ в различных фазовых пространствах: а) в пространстве производных; б) в пространстве координат при наличии ПИС

Следует отметить, что в реальных РСУ частота скользящего режима является конечной величиной. При чрезмерных координатных и параметрических возмущениях возможен срыв скользящего режима. Аналогичная ситуация может возникнуть, если быстродействие желаемой траектории выше определенного значения. Возникает вопрос: возможно ли для данного класса ОУ расширение зоны существования скользящего режима (хотя бы теоретически) без применения дополнительных устройств? Решение этой задачи попытаемся получить путем представления ФН как параметрического возмущения, входящего в математическое описание ОУ.

Существуют различные математические описания МХ ФН. При условии ее линеаризации (см. рис.1), наиболее часто используется зависимость следующего вида [1, 2]:

$$M_c = \begin{cases} \alpha \omega_{ск}, & \text{на восходящем участке ОА;} \\ M_{с0} + \beta \omega_{ск}, & \text{на падающем участке АВ,} \end{cases} \quad (5)$$

где α, β - жесткости соответственно восходящего и падающего участков МХ ФН; $\omega_{ск}$ - скорость проскальзывания, зачастую равная скорости механизма.

Такое представление ФН допустимо при исследовании и моделировании ФА, определении зон динамической устойчивости ЭП. Однако при синтезе РСУ использование данной зависимости нежелательно по следующим причинам:

- 1) невозможно одновременно учитывать восходящий и падающий участки МХ ФН;
- 2) невозможно учесть величину $M_{с0}$ в системе уравнений (1), что искажает математическое описание ФН.

Анализ вида МХ ФН показывает, что данная зависимость на рабочем участке ОАВ может быть представлена с достаточной точностью полиномом третьей степени:

$$M_c = (m_3 p^3 + m_2 p^2 + m_1 p + m_0) \omega.$$

Дополнив данным выражением систему уравнений (1), получаем математическое описание одномассового ЭП с учетом ФН как параметрического возмущения и синтезируем алгоритм управления релейного регулятора скорости в расширенном фазовом пространстве с пропорционально-интегральной связью:

$$U_{pc} = U_n \operatorname{sign} [\Theta_{пис} + L (X^* - X)], \quad (6)$$

где $L = DK^{-1} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5]$, $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [\omega/\omega_n \ p\omega/\omega_n \ p^2\omega/\omega_n \ I/I_n \ E_{mn}/E_{mny}]^T$, $X^* = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ 0 \ 0]^T$.

Структурная схема РСУ, реализующей алгоритм управления (6), аналогична предыдущей (рис.3 б).

На основании синтезированных алгоритмов управления (2), (4), (6) в пакете MATLAB было проведено компьютерное моделирование пуска на холостом ходу и наброса ФН для различных РСУ. Моделирование ФН осуществлялось с помощью зависимости (5) при следующих условиях:

- 1) $M_{с, max} = 1.2 M_n$, $M_{с, min} = 0.8 M_n$;
- 2) МХ разомкнутой системы ЭП и ФН пересекаются при $M_c = M_n$;
- 3) падающий участок МХ ФН начинается при $\omega = 0.9 \omega_n$.

Результаты моделирования представлены на рис.4.

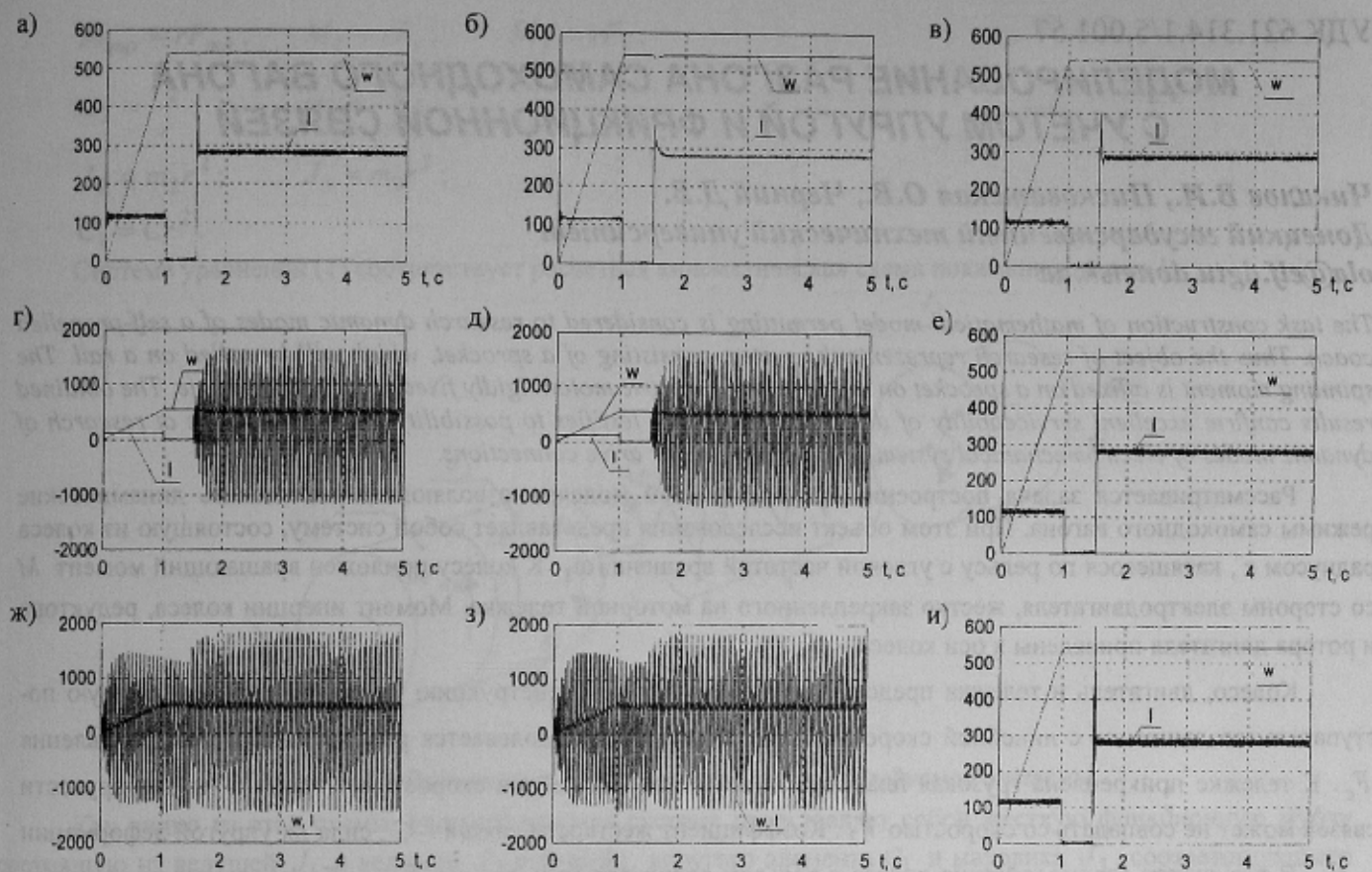


Рисунок 4 – Графики переходных процессов тока и скорости двигателя при пуске РСУ одномассового ЭП с ФН: а) пространство производных, $\omega_0 = 250 \text{ c}^{-1}$; б) пространство координат, $\omega_0 = 250 \text{ c}^{-1}$; в) расширенное фазовое пространство, $\omega_0 = 250 \text{ c}^{-1}$; г) пространство производных, $\omega_0 = 750 \text{ c}^{-1}$; д) пространство координат, $\omega_0 = 750 \text{ c}^{-1}$; е) ; в) расширенное фазовое пространство, $\omega_0 = 750 \text{ c}^{-1}$; ж) пространство производных, $\omega_0 = 1000 \text{ c}^{-1}$; з) пространство координат, $\omega_0 = 1000 \text{ c}^{-1}$; и) ; в) расширенное фазовое пространство, $\omega_0 = 1000 \text{ c}^{-1}$

На рис. 4 а) - в) показана возможность успешного применения РСУ, синтезированных методом ОЗД в различных фазовых пространствах для ликвидации ФА и получения высоких показателей качества регулирования. При увеличении быстродействия заданной траектории (в данном случае в 3 раза) РСУ как в пространстве производных, так и в пространстве координат успешно работают только на холостом ходу, а при набросе ФН возникают большие автоколебания (рис. 4 г) – д)). В этих же условиях РСУ в расширенном пространстве (с контролем ФН) продолжает нормально работать (рис. 4 е)). При дальнейшем увеличении быстродействия заданной траектории РСУ в пространствах производных и координат не работают и на холостом ходу (рис. 4 ж) – з)), а РСУ в расширенном пространстве продолжает обрабатывать заданную траекторию (рис. 4 и)).

ВЫВОДЫ: 1) доказана возможность успешного применения РСУ, синтезированных методом ОЗД в различных фазовых пространствах, для одновременной ликвидации ФА, обеспечения квазиинвариантности к изменению параметров ЭП и получения высоких статических и динамических показателей качества; 2) показано, что при синтезе релейных алгоритмов управления учет фрикционной нагрузки как параметрического возмущения расширяет зону существования скользящего режима и увеличивает возможности РСУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клепиков В.Б. О «фрикционных» автоколебаниях в электроприводах. – Электричество, № 4, 1986, С.59-62.
2. Осичев А.В. Определение областей динамических режимов электромеханической системы с упругой связью и фрикционной нагрузкой // Диссертация канд. техн. наук, 1990.
3. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина.: Под. ред. А.В. Садового. – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с.
4. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г. Синтез двухмассовой системы электропривода с фрикционной нагрузкой методом аналитического конструирования регуляторов // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. Вып. 1/2000 (8) – Кременчуг: КГПИ, 2000. – С.17-19.
5. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. М.: Наука, 1988 – 328 с.
6. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г. Выбор оптимальных параметров релейной системы управления электропривода при наличии фрикционной нагрузки // Вестник МАНЭБ. – 2001. - №1. - С.68-70.