

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ МНОГОМАССОВЫХ СИСТЕМ

Е.С. Назарова - канд. техн. наук, доцент

Национальный университет «Запорожская политехника», Украина

Промышленные технологические комплексы и агрегаты в своем большинстве являются многомассовыми взаимосвязанными системами с рядом особенностей, таких как демпфирующее трение, упругая муфта, клиренс и другие. В статье описаны математическая и компьютерная модели электромеханических процессов взаимосвязанных многомассовых систем с учетом упругих связей первого и второго рода на примере электромеханических систем станов холодной прокатки (СХП). Результаты моделирования показали, что эти модели могут быть использованы при модернизации существующих и проектировании новых систем автоматического управления (САУ) электроприводами взаимосвязанных многомассовых систем.

Ключевые слова: моделирование, электромеханические процессы, многомассовые системы, взаимосвязанные системы, упругие связи.

Введение. В настоящее время автоматизация технологических и производственных процессов с использованием математических и компьютерных моделей является наиболее востребованным и прогрессивным подходом при модернизации существующих и разработке новых систем автоматического управления.

Электропривод как исполнительный механизм многих агрегатов и комплексов, используемых в различных отраслях промышленности, науки и техники, в значительной степени определяет их эксплуатационные характеристики. В переходных электромеханических процессах происходит непрерывное преобразование энергии из одного вида в другой благодаря наличию различных накопителей энергии (электрической, электромагнитной, тепловой, механической), а также различных преобразователей энергии, связанных между собой механическими (упругими), электрическими или магнитными связями. Механическая часть электропривода может иметь разветвленную многомассовую систему с зазорами (люфтами) и упруговязкими механическими элементами (длинный вал, трос, прокатываемая полоса металла), связанными между собой постоянным или переменным передаточным числом [1]. Во время работы промышленного агрегата может меняться величина движущейся массы и момент инерции (разливочные машины, наматывающие и разматывающие прокатываемую полосу механизмы), что влияет на динамику и статику работы всей системы в целом. Все это приводит к сложности анализа и синтеза систем автоматического управления, поэтому разработка математических и компьютерных моделей электромеханических процессов взаимосвязанных многомассовых систем является **актуальной задачей**.

Известно достаточно большое количество работ, связанных с изучением влияния упругих передач на качество переходных процессов одно-, двух- [2, 3], пяти- [4] и многомассовых систем [5]. Большая часть из этих систем является неразветвленными и учитывают влияние упругих связей, описываемых законом Гука. Не достаточно внимания уделено рассмотрению многомассовых систем с упругими передачами первого и второго рода [6].

Цель работы – разработка и исследование математических и компьютерных моделей электромеханических процессов взаимосвязанных многомассовых систем с учетом упругих связей первого и второго рода на примере электромеханических систем станов холодной прокатки (СХП).

В качестве многомассовой взаимосвязанной системы рассмотрена механическая система с вращающимися массами, соединенными последовательно упругими элементами с учетом вязкого трения. Кроме того, в общем случае возможен учет сухого трения, изменения моментов инерции вращающихся масс и передаточного числа в передачах.

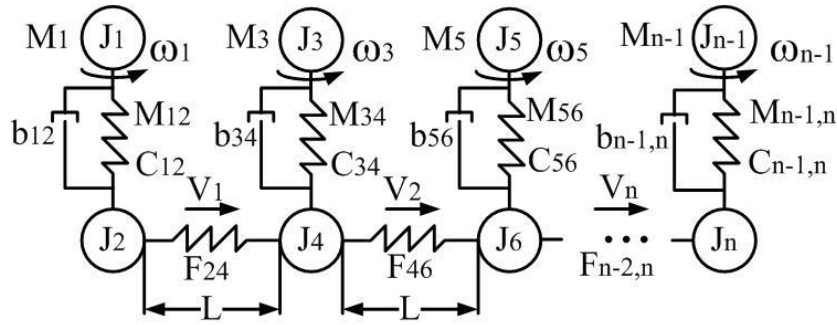


Рисунок 1 – Кинематическая схема многомассовой взаимосвязанной системы с учетом упругих связей первого и второго рода

На рисунке 1 показана рассматриваемая система, где $J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$ – вращающиеся массы системы, $\text{Нм} \cdot \text{с}$, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ – угловые скорости указанных масс, с^{-1} , $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ – моменты движущихся масс, Нм , $M_{12}, M_{34}, M_{56}, \dots, M_{n-1,n}$ – моменты, создаваемые в упругой связи первого рода «длинный вал», Нм , $C_{12}, C_{34}, C_{56}, \dots, C_{n-1,n}$ – жесткость упругого соединения «длинный вал», Нм/рад , $b_{12}, b_{34}, b_{56}, \dots, b_{n-1,n}$ – коэффициент внутреннего вязкого трения в передачах между J_{n-1} и J_n , $\text{Нм} \cdot \text{с}$, $F_{24}, F_{46}, \dots, F_{n-2,n}$ – силы натяжения, возникающие в упругой связи второго рода (например, прокатываемая полоса металла), Н , L – расстояние между соседними массами, соединенными упругой связью второго рода, м .

Как известно, суммарный момент, действующий на n вращающуюся массу, равен алгебраической сумме моментов, которые присоединены к этой массе. В общем случае это: момент электродвигателя, момент сопротивления нагрузки, момент деформации упругого элемента (упругий момент), моменты сухого и вязкого (внутреннего и внешнего) трения, а также переменный упругий момент вследствие неравномерности хода машин [1].

Масса J_n представляет собой электродвигатель, приводящий во вращение исполнительный механизм J_{n-1} . Они соединены упругой связью первого рода «длинный вал», деформация которой линейна и подчиняется закону Гука. Упругий момент пропорционален углу закручивания вала или разности углов поворота отдельных масс $M_{n-1,n}$, момент внутреннего вязкого трения $M_{\text{внт}}$ в упругом элементе пропорционален разности скоростей и весьма мал, момент внешнего вязкого трения $M_{\text{вшт}}$ (момент демпфирования) пропорционален скорости и влияет на динамический момент, однако его величина пренебрежимо мала и часто не учитывается в расчетах. Упругая связь первого рода описывается системой (1), где β_n – коэффициент демпфирования J_n массы в $\text{Нм} \cdot \text{с}$.

$$\begin{cases} M_{n-1,n}(p) = C_{n-1,n}(\varphi_{n-1}(p) - \varphi_n(p)) = \frac{C_{n-1,n}}{p}(\omega_{n-1}(p) - \omega_n(p)), \\ M_{\text{внт}}(p) = b_{n-1,n}(\omega_{n-1}(p) - \omega_n(p)), \\ M_{\text{вшт}}(p) = \beta_n \omega_n(p), \end{cases} \quad (1)$$

Расположенные последовательно друг за другом исполнительные механизмы J_n , J_{n-2} (для станов холодной прокатки это разматывающий механизм, клеть или клетки, наматывающий механизм) соединены упругими связями второго рода, например, транспортируемый материал или прокатываемая полоса металла, которые описываются системой (2)

$$\begin{cases} F_{n-2,n}(p) = \frac{C_{n-2,n}}{p} \{V_n(p) - [1 + \varepsilon_{n-2,n}(p)]V_{n-1}(p)\}; \\ \varepsilon_{n-2,n}(p) = \frac{1}{C_{n-2,n}L} F_{n-2,n}(p); \end{cases} \quad (2)$$

где $\varepsilon_{n-2,n}$ – относительное удлинение.

При описании упругой связи второго рода приняты допущения [6]: материал однороден и имеет по всей длине одинаковую толщину и длину; влиянием массы материала на его деформацию можно пренебречь; деформация имеет чисто упругий характер и равномерно распределяется по поперечному сечению; волновыми процессами, связанными с распределением деформации по длине, можно пренебречь.

На основании математического описания электромеханических процессов прокатки, созданы компьютерные модели, имитирующие работу намоточного (размоточного) механизма, рабочей клетки, упругого соединения «длинный вал», а также модель прокатываемой полосы [7]. Управление этими моделями обеспечивалось при помощи моделей двигателей постоянного тока независимого возбуждения и систем автоматического управления. Каждая модель представляет собой самостоятельную подсистему с портами входных и выходных координат, логотипом и интерфейсом. Такой подход имеет преимущества, так как любые модели могут соединяться друг с другом по каналам механических, электрических и информационных связей. Имеется возможность наблюдения любых электромеханических координат и задания различных режимов прокатки в зависимости от технологического процесса [7,8]. В математическом описании намоточного (размоточного) устройства учтены J'_{n-1} - переменная составляющая момента инерции наматывающего (разматывающего) устройства СХП, m_{n-1} - масса прокатываемого рулона металла; i - передаточный коэффициент редуктора; ρ - удельная плотность прокатываемого материала; R_0 - радиус барабана наматывающего (разматывающего) устройства, h - толщина прокатываемой полосы металла, что показано в системе (3).

$$\begin{cases} J'_{n-1}(p) = m_{n-1}(p)(R_{n-1}(p) - R_0)^2 / i^2; \\ m_{n-1}(p) = \rho \cdot \pi (R_{n-1}^2(p) - R_0^2); \\ R_{n-1}(p) = \sqrt{R_0^2 + \frac{h}{\pi} V_{n-1}(p)}; \\ V_{n-1} = R_{n-1} \omega_{n-1}(p); \\ V_n = R_n \omega_n(p). \end{cases} \quad (3)$$

При помощи разработанных моделей были созданы компьютерные модели электромеханических процессов взаимосвязанных многомассовых систем одноклетевого реверсивного СХП 1680 (рис.2), представляющего собой шестимассовую систему (DPT-1, DPT-2, DPT-3, Motalka, Kletka, Motalka1) с тремя упругими связями первого рода (VAL-1, VAL-2, VAL-3) и двумя упругими связями второго рода (Prokat, Prokat1). При моделировании использованы данные оборудования цеха холодной прокатки №1 ПАО «Запорожсталь».

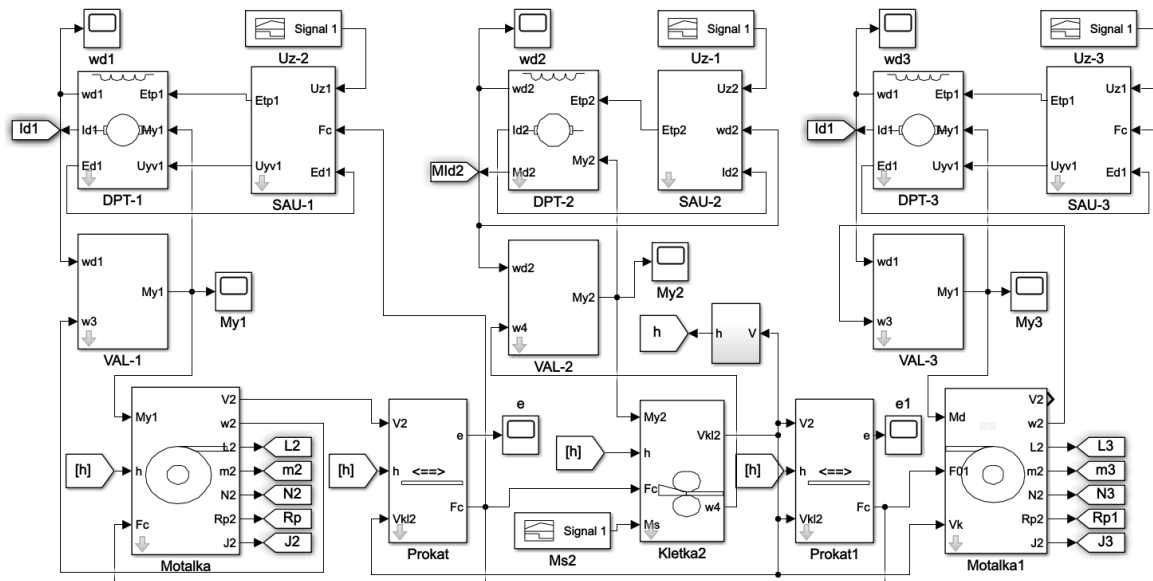


Рисунок 2 – Компьютерная модель одноклетевого реверсивного СХП 1680

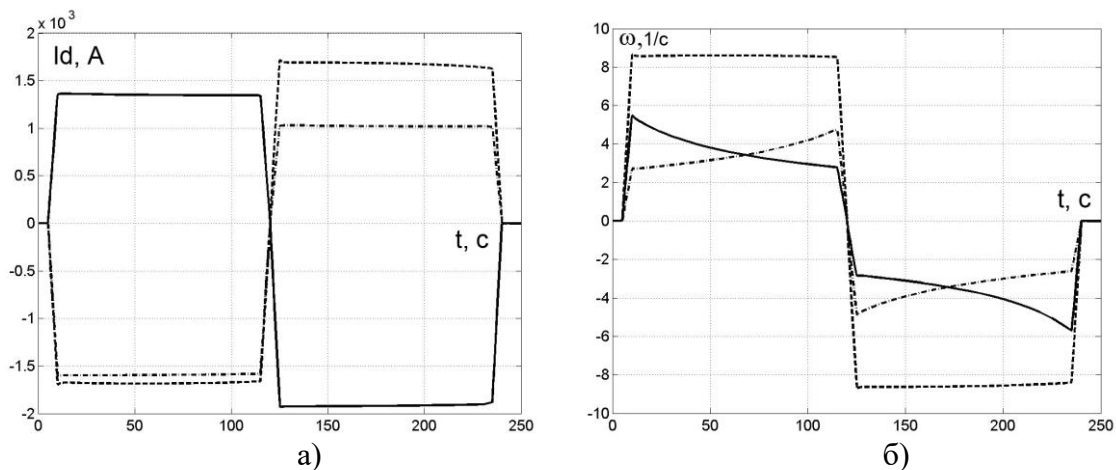


Рисунок 3 – Результаты моделирования электромеханических процессов одноклетового реверсивного СХП 1680: токи якорной цепи (а) и угловые скорости (б) наматывающего механизма, клетки и разматывающего механизма.

На рисунке 3 показаны электромеханические процессы при разгоне, выход на рабочую скорость прокатки, реверсирование стана, работа на рабочей скорости в обратном направлении и торможение до полной остановки, что представляет собой полный технологический цикл прокатки одного рулона.

Заключение. Разработаны и исследованы математические и компьютерные модели электромеханических процессов взаимосвязанных многомассовых систем с учетом упругих связей первого и второго рода на примере электромеханических систем СХП. Сравнение результатов моделирования и мониторинга производственного оборудования подтвердило их адекватность (относительная погрешность менее 9%) и возможность использования разработанных компьютерных моделей для синтеза и исследования САУ электроприводами основных механизмов СХП, что позволит существенно снизить энергозатраты по сравнению с предварительными экспериментами на реальном производственном оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакаев В. Н. Моделирование систем : учеб. пособие / В.Н. Бакаев. – Вологда: ВоГТУ, 2013. - 159 с.
2. Seppo E. Saarakkala and Marko Hinkkanen. Identification of Two-Mass Mechanical Systems Using Torque Excitation: Design and Experimental Evaluation // IEEE Transactions On Industry Applications, vol. 51, no. 5, september/october 2015, pp. 4180- 4189.
3. Kaniuk G., Vasylets T., Varfolomiyev O., Mezeria A., Antonenko N. Development of neural-network and fuzzy models of multimass electromechanical systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019. - 3/2 (99). – pp. 51-63.
4. Aboah Boateng Emmanuel, Normanyo Erwin. Investigating Efficiency of a Five-Mass Electromechanical System having Damping Friction, Elastic Coupling and Clearance // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2017. - Vol. 6. – pp. 94-98.
5. Dominik Łuczak. Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection // 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, (MMAR), 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/289579780-Mathematical_model_of_multi-mass_electric_drive_system_with_flexible_connection
6. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 228 с.
7. Назарова, Е.С. Математическое моделирование электромеханических систем станов холодной прокатки / Е.С. Назарова // Технічна електродинаміка. – 2015. – Вип. 5. – С. 82-89.
8. Новое в моделировании и исследовании электромеханических систем станов холодной прокатки : монографія / А. В. Садовой, Е. С. Назарова, В. И. Бондаренко, А. В. Пирожок; Запорізьк. нац. техніч. ун-т, Дніпродзерж. держ. техніч. ун-т – Запоріжжя: «Просвіта», 2014. – 144 с.

MODELING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES OF INTERCONNECTED MULTIMASS SYSTEMS

O.Nazarova

National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine, Zaporizhzhia

Industrial technological complexes and assemblies for the most part are multi-mass interconnected systems with a number of features, such as damping friction, elastic coupling, clearance, and others. The article describes the mathematical and computer models of the electromechanical processes of interconnected multi-mass systems, taking into account the elastic connections of the first and second kind on the example of electromechanical systems of cold rolling mills (CRM). The simulation results showed that these models can be used to upgrade existing and design new automatic control systems (ACS) for electric drives of interconnected multi-mass systems.

Keywords: modeling, electromechanical processes, multi-mass systems, interconnected systems, elastic connection.