УДК 62-83: 004.942

Е. С. НАЗАРОВА, канд. техн. наук, доц., Запорожский национальный технический университет;
Р. А. ЕФИМЕНКО, магистрант, Запорожский национальный технический университет.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМ МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ

Введение. На практике очень часто встречаются электромеханические системы (ЭМС), у которых в процессе работы значения статического момента, массы, радиуса, жёсткости и момента инерции изменяются. К таким системам относятся электроприводы промышленных установок роторного типа: грохотов, шаровых мельниц, смесителей, грануляторов, роторных зернистых фильтров для очистки газов, сушил и др. Периодическое изменение момента инерции ротора этих установок обусловлено перераспределением сыпучего материала, заполняющего ротор при его вращении [1]. Другим типом систем с переменными механическими параметрами, а именно, моментом инерции, являются намоточно-размоточные механизмы прокатки стального листа, проволоки, бумагоделательного производства [2].

В общем случае динамический момент электропривода моталки состоит из нескольких составляющих [3]: составляющей, определяемой ускорением полосы при намотке, составляющей, определяемой величиной изменения радиуса рулона наматываемого материала и составляющей, связанной с изменением момента инерции. Вторая составляющая проявляется при намотке полосы на высокоскоростных прокатных станах, в то время, как первая составляющая существенно влияет на точность поддержания натяжения полосы, независимо от скорости намотки. Благодаря внедрению мощных электродвигателей и автоматизированного электропривода скорость прокатки значительно возросла, достигнув 10 м/с на станах горячей прокатки и 50 м/с на станах холодной прокатки (против 1-2 м/с в 1930 г.) [4]. Поэтому разработка имитационной модели, учитывающей полный динамический момент, позволяющей без нарушения производственного цикла тихоходных и высокоскоростных прокатных станов исследовать их электромеханические процессы, является актуальной задачей. Использование этой модели при разработке новых систем управления и модернизации существующих снизит трудоемкость и затраты на проведение этих работ.

Цель работы. Разработка универсальной имитационной модели электропривода наматывающего механизма, в которой учитывается полный динамический момент, для исследования электромеханических процессов тихоходных и высокоскоростных станов холодной прокатки.

Материалы и результаты исследования. Исследованию электромеханических процессов прокатных станов посвящено достаточно много работ, например, в книге [5] приведены математические описания законов, определяющих связь электромеханических параметров стана с параметрами технологических процессов. В работе [6] изложены основы теории прокатки и автоматизации непрерывного стана холодной прокатки, где этот стан и его автоматизированный многодвигательный электропривод рассматривается как единый электрифицированный агрегат. В статье [7] разработана и описана имитационная модель для непрерывного стана «Тандем». В монографии [8] рассмотрены общие принципы работы различных реверсивных станов холодной прокатки. Анализ известных работ показывает, что не достаточно внимания уделено вопросам углубленного рассмотрения динамических процессов, связанных с влиянием нескольких составляющих динамического момента наматывающего устройства на электромеханические процессы электропривода стана.

В процессе прокатки полоса разматывается с одной моталки и наматывается на другую, при этом диаметры рулонов непрерывно изменяются (рис. 1), где используются такие обозначения: υ – линейная скорости движения полосы, ω – угловая скорость наматывающего механизма, $R_р$ – текущее значение радиуса рулона, $R_б$ – радиус барабана, h – толщина полосы, F – сила натяжения полосы, C_p – жесткость прокатываемой полосы.

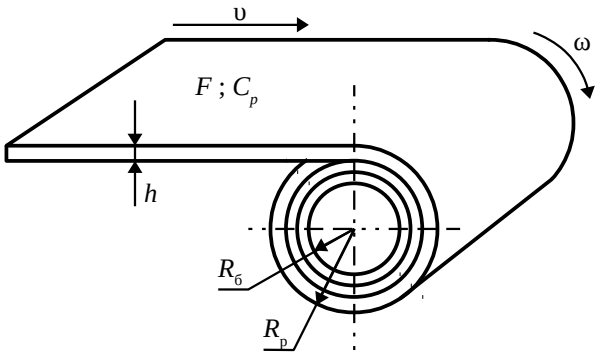

Рис. 1 Кинематическая схема намотки полосы в рулон

© Е.С. Назарова, Р.А. Ефименко, 2017

Чтобы поддерживать постоянной линейную скорость прокатки, необходимо скорость двигателя разматывающего механизма уменьшать или увеличивать в зависимости от режима работы стана.

Изменение диаметров рулонов в течение всего цикла прокатки должно учитываться для поддержания постоянства натяжения полосы прокатываемого металла [8].

Как известно, уравнение движения системы с переменной массой, отнесенной к валу, который вращается с угловой скоростью ω, имеет вид [3]:

$$M_{д}=J\frac{d\omega}{dt}+\frac{\omega}{2}\cdot\frac{dJ}{dt}=\frac{J}{R_{р}}\cdot\frac{d\upsilon}{dt}-\frac{J\upsilon}{R_{р}^{2}}\cdot\frac{dR_{р}}{dt}+\frac{\omega}{2}\cdot\frac{dJ}{dt}\,, \tag{1}$$

где J – суммарный момент инерции вращающихся частей наматывающего устройства вместе с рулоном, приведенный к валу двигателя.

Первая составляющая в правой части (1) определяет величину и знак динамического момента, который необходим для изменения кинетической энергии электропривода, связанного с увеличением или уменьшением скорости прокатки. Вторая составляющая определяет величину динамического момента, который необходим для уменьшения кинетической энергии электропривода при снижении угловой скорости вращения в процессе намотки полосы из-за увеличения диаметра рулона на барабане наматывающего устройства [3]. При медленном изменении момента инерции второй составляющей обычно пренебрегают [9]. Третья составляющая связана с производной момента инерции, является переменной, так как зависит от радиуса рулона.

Момент инерции J рулона состоит из двух частей: неизменного момента инерции J' (вращающихся частей механизма и собственного момента двигателя) и меняющегося с изменением радиуса рулона момента инерции наматываемого (разматываемого) рулона металла [8]

$$J''=m\left(R_{р}-R_{б}\right)^{2}/i^{2}\,, \tag{2}$$

где i – передаточный коэффициент редуктора.

В последнем выражении параметр m рассчитывается в виде:

$$m=\rho\cdot10^{3}\pi\left(R_{р}^{2}-R_{б}^{2}\right)b \tag{3}$$

и представляет собой массу материала в рулоне с удельной плотностью ρ, при текущем радиусе $R_{р}$, радиусе барабана (на который наматывается материал, $R_{б}$) и ширине материала b.

Подставив (2),(3) в (1) получим:

$$M_{д}=\left(\frac{\rho\cdot10^{3}\pi b}{2}iR_{р}^{3}+\frac{J_{0}i}{R_{р}}\right)\frac{d\upsilon}{dt}-\left(\frac{\rho\cdot10^{3}\pi b}{2}iR_{р}^{2}\upsilon+\frac{J_{0}\upsilon i}{R_{р}^{2}}\right)\frac{dR_{р}}{dt}+\frac{\omega}{2}\cdot\frac{dJ}{dt}\,, \tag{4}$$

где $J_{0}=J'-\dfrac{\rho\cdot10^{3}\pi b}{2i^{2}}R_{б}$.

Текущее значение радиуса рулона определяется из соотношения [8]:

$$R_{р}=\sqrt{R_{б}^{2}+\frac{h}{\pi}\int_{0}^{t}\upsilon\,dt}\,. \tag{5}$$

Используя приведенное выше математическое описание и известную модель одноклетевого реверсивного прокатного стана (рис. 2) разработана имитационная модель наматывающего механизма стана холодной прокатки, учитывающая полный динамический момент (рис. 3).

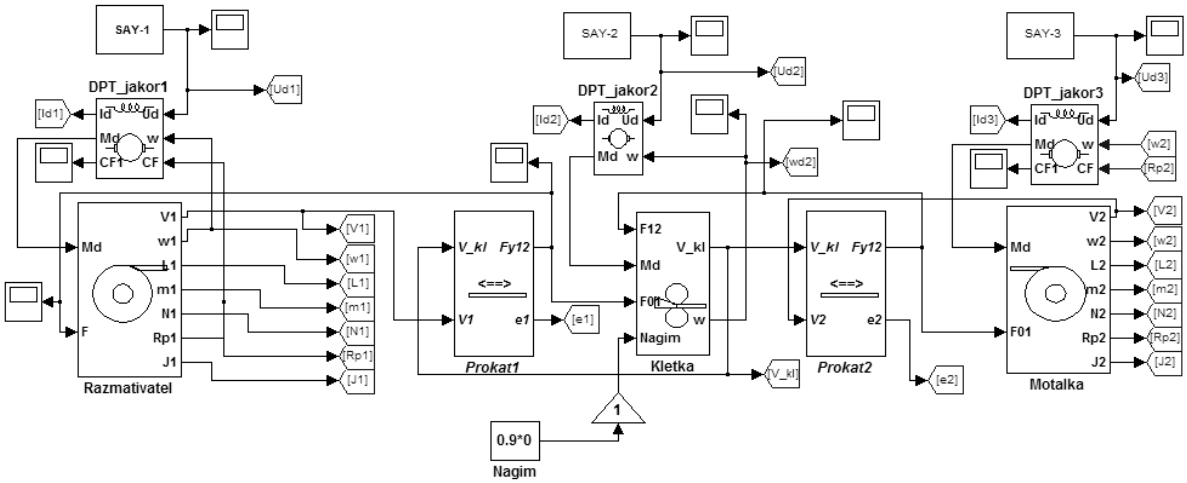

Рис.2. Общий вид модели одноклетевого реверсивного прокатного стана

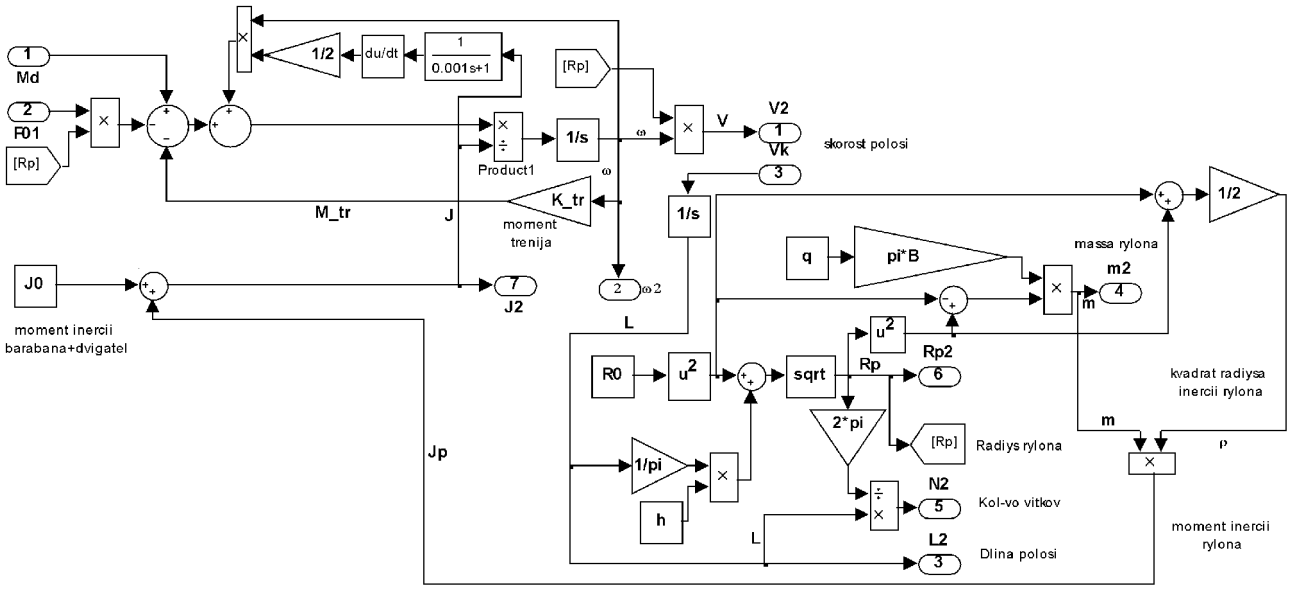

Рис. 3 Модель модифицированной подсистемы «Motalka»

Проведено математическое моделирование электромеханических процессов одноклетевого реверсивного стана холодной прокатки с использованием разработанной имитационной модели наматывающего механизма, дополненной выражением третьей составляющей динамического момента. На рис. 4 приведены результаты моделирования для разных скоростей прокатки 1,39 м/с (рис.4, а), 2,16 м/с (рис. 4, б), 2,79 м/с (рис. 4, в), 3,24 м/с (рис. 4, г) , где 1 – угловая скорость наматывающего механизма без учета дополнения модели, 2 – с учетом.

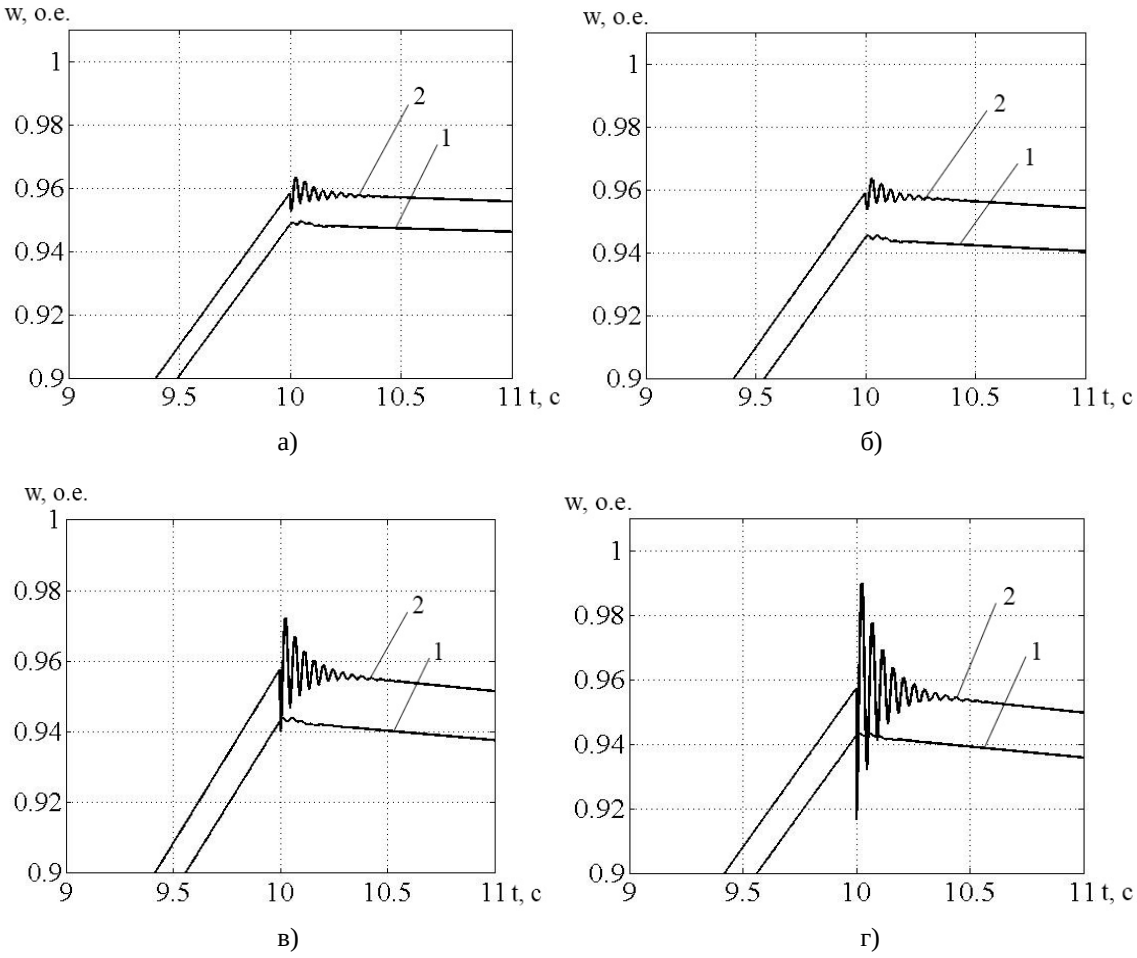

Рис. 4 Переходные процессы электропривода наматывающего механизма при разных скоростях прокатки

Из графиков видно, что с увеличение скорости прокатки влияние третьей составляющей динамического момента возрастает. При сравнении участков графиков, соответствующих переходу от разгона к постоянной скорости прокатки, угловых скоростей исходной и модифицированной моделей наматывающего механизма видно, что в модифицированной модели появляются колебательные процессы, амплитуда которых увеличивается с увеличением скорости прокатки.

Использование модифицированной имитационной модели наматывающего устройства стана холодной прокатки, учитывающей полный динамический момент, при разработке и исследовании новых систем автоматического управления повысит адекватность полученных результатов моделирования физическому объекту управления.

Выводы. Разработанная имитационная модель электромеханической системы с переменным моментом инерции на примере электропривода наматывающего механизма стана холодной прокатки учитывает полный динамический момент, что способствует повышению достоверности результатов моделирования, приближая их к реальным параметрам. Модель может быть использована при модернизации существующих и проектировании новых систем автоматического управления как тихоходными, так и высокоскоростными станами холодной прокатки, что позволит сократить время и стоимость процесса проектирования. Дальнейшие исследования следует продолжить в направлении разработки системы управления электроприводом наматывающего механизма, не чувствительной к ряду дестабилизирующих факторов и обеспечивающей требуемые показатели качества управления.

Список литературы: 1. Нестеров, С.В. Определение условий возбуждения первого параметрического резонанса в электромеханических системах с переменным моментом инерции [Текст] / С.В. Нестеров, А.В. Нестеров // VII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения». - Томск, 2013 - С. 263-265. 2. Inside Machines: Winding Technology in the Drive. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.controleng.com/single-article/ inside-machines-winding-technology-in-the-drive/eb680a884a5005fc8787f554ec9c3fbe.html 3. Лимонов, Л.Г. Автоматизированный привод промышленных механизмов [Текст]. – Х.: «Форт», 2009. – 272 с. 4. Энциклопедия по машиностроению XXL. [Электронный ресурс] – Режим доступу: http://mash-xxl.info/page/09019201224302119407505616201007817221912123514 4/ 5. Зеленов, А.Б. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводами постійного струму з вентильними перетворювачами. [Текст] Навч. посіб. для студ. вузів / А.Б. Зеленов, І.С. Шевченко, І.Н. Андреева. – Алчевськ : ДГМІ, 2002. – 400 с. 6. Півняк, Г.Г. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві [Текст] / Г.Г. Півняк, О.С. Бешта, М.П. Фількін. – Дніпропетровськ, 2008. – 224 с. 7. Пирожок А.В. Имитационные модели электромеханических процессов тонколистового стана холодной прокатки [Текст] / А.В. Пирожок, А.А. Супрун, А.Ю. Супрун // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. - №2. -С.34-42. 8. Новое в моделировании и исследовании электромеханических систем станов холодной прокатки [Текст] : монографія / А.В. Садовой, Е.С. Назарова, В.И. Бондаренко, А.В. Пирожок; Запорізьк. нац. техніч. ун-т, Дніпродзерж. держ. теніч. ун-т – Запоріжжя: «Просвіта», 2014. – 144 с. 9. Квашнин, В.О. Синтез модели электропривода разматывателя с системой управления стабилизации скорости размотки полосы [Текст] / В.О. Квашнин, Ю.Н. Мусиенко, А.А. Мельникова // Вісник КДУ ім. М. Остроградського . Вип. 4/2010 (63). Ч.2 – С. 150-153.

Bibliography (transliterated): 1. Niestierov, S.V., and Niestierov A.V. “Determination of excitation conditions for the first parametric resonance in electromechanical systems with a variable moment of inertia” // VII International Scientific and Technical Conference “Modern Problems of Mechanical Engineering”.Tomsk. 263-265. Print. 2. Schaedlich, Alexander, and William, Gilbert. “Inside Machines: Winding Technology in the Drive”, 2011. http://www.controleng.com/single-article/inside-machines-winding-technology-in-the-drive/eb680a884a5005fc8787f554ec9c3fbe.html Web. 22 July 2011 3. Limonov, L.G. “Automated drive of industrial mechanisms”. Kharkov: Fort, 2009. 272. Print. 4. “Encyclopedia of Mechanical Engineering XXL”. http://mash-xxl.info/page/09019201224302119407505616201007817221912123514 4/ Web. 28 April 2017 5. Zielienov, A.B., et al. “Synthesis and simulation of digital control electric valve DC converters”. Alchievsk: DGMI, 2002. 400. Print. 6. Pivniak, G.G., et al. “Automated electric drive in the rolling production”. Dnipropetrovsk, 2008. 224. Print. 7. Pirozhok A.V., Suprun A.A. and Suprun A. Yu. “Simulation models of electromechanical processes of sheet cold rolling mills”. Elektrotekhnika ta elektroenergetika. Zaporizhzhia: ZNTU. 2. 2005. 34-42. Print. 8. Sadovoi, A.V. et al. “New in modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills”. Zaporizhzhia: Prosvita, 2014. 144. Print. 9. Kvashnin, V.O., et al. “Synthesis of the decoiler electric drive model with the control system of stabilization of the strip unwinding speed”. Visnyk KDU im. M. Ostrogradskii. 4(63). 2010. 150-153. Print.

Поступила 30.04.2017