

УДК 681.5:62-83:004.09

О.С. Назарова, В.В. Лукьянов, В.О. Шевченко

Національний університет «Запорізька політехніка»

E-mail: nazarova16@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОМАСОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КЛІТИ СТАНА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ ПРУЖНОЇ ПЕРЕДАЧІ

Враховуючи постійно зростаючі вимоги до якості готової продукції, а також світові тенденції розвитку металургії, на комбінаті «Запоріжсталь» постійно проводяться модернізації обладнання та вдосконалення технологічних процесів. Це дозволяє забезпечити виробництво продукції у повній відповідності з вимогами національних стандартів та успішно конкурувати з провідними металовиробниками на світовому ринку. Зроблено аналіз технологічних особливостей реверсивного стану холодної прокатки, проведено вибір потужності електродвигуна кліти і перевірку за нагрівом, змодельовано двомасову систему електропривода кліти у пакеті Matlab, розроблено імітаційну модель, досліджено на моделі електромеханічні процеси з урахуванням нелінійності у пружній передачі.

Ключові слова: двомасова система, кліть, електропривод, стан холодної прокатки, моделювання, електромеханічні процеси, пружна передача.

Е.С. Назарова, В.В. Лукьянов, В.А. Шевченко. Исследование двухмассовой системы электропривода клетки стана холодной прокатки с учетом нелинейности упругой передачи. Учитывая постоянно растущие требования к качеству готовой продукции, а также мировые тенденции развития металлургии, на комбинате «Запорожсталь» постоянно проводятся модернизации оборудования и совершенствования технологических процессов. Это позволяет обеспечить производство продукции в полном соответствии с требованиями национальных стандартов и успешно конкурировать с ведущими металлопроизводителями на мировом рынке. Сделан анализ технологических особенностей реверсивного стана холодной прокатки, проведен выбор мощности электродвигателя клетки и проверку по нагреву, смоделирована двухмассовая система электропривода клетки в пакете Matlab, разработана имитационная модель, исследованы на модели электромеханические процессы с учетом нелинейности упругой передачи.

Ключевые слова: двухмассовая система, клеть, электропривод, стан холодной прокатки, моделирование, электромеханические процессы, упругая передача.

O.S. Nazarova, V.V. Lukianov, V.O. Shevchenko. Investigation of a two-mass electric drive system of a cold rolling mill stand taking into account the nonlinearity of elastic transmission. Taking into account the constantly growing requirements for the quality of finished products, as well as global trends in the development of metallurgy, the Zaporizhstal plant is constantly modernizing equipment and improving technological processes. This allows us to ensure the production of products in full compliance with the requirements of national standards and successfully compete with leading metal manufacturers in the world market. An analysis of the technological features of a reversing cold rolling mill is made, the power of the stand electric motor is selected and the heating is checked, a two-mass stand electric drive system is simulated in the Matlab package, a simulation model is developed, and electromechanical processes are investigated on the model taking into account the nonlinearity of elastic transmission.

Key words: two-mass system, stand, electric drive, cold rolling mill, modeling, electromechanical processes, elastic transmission.

Постановка проблеми. Застосування інформаційних технологій при дослідженні, розробці нових та вдосконаленні існуючих систем автоматичного керування (САК) технологічними процесами дозволяє отримати швидко та повне забезпечення інформацією з розроблюваної проблеми [1,2]; вибір доцільних наукових методик з використанням комп'ютерного моделювання [3,4]; пошук в базі даних потрібних характеристик та параметрів процесів; залежності для вирішення технологічних та науково-дослідних задач, що отримані на основі статистичного оброблення інформації з бази даних; здійснення ефективного порівняльного аналізу отриманих результатів як на проміжному, так і на кінцевому етапах [5,6]. Тому дослідження САК двомасової системи електропривода кліти стану холодної прокатки з урахуванням нелінійності пружної передачі є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з даної проблеми.

Електромеханічна система сучасних промислових машин та агрегатів (прокатні стани, безперервно-технологічні агрегати текстильної і хімічної промисловості, конвеєри, скіпи, ліфти та багато інших механізмів) характеризується досить складною структурою механічної та електричної частин. Механічна частина являє собою багатомасову механічну систему з жорсткими та пружними передачами [7,8]. Електрична частина також є досить складною системою, в залежності від способу керування, схеми з'єднань, діапазону і точності регулювання і таке інше. Тому такі електромеханічні системи характеризуються взаємозв'язком електромагнітних процесів, механічних явищ і технологічних факторів, дією зовнішніх (зміна моменту опору, напруги живлення, температури навколишнього середовища та інш.) і внутрішніх (зміна електромеханічних параметрів системи) збурень [9]. Вказані аспекти мають враховуватися при математичному описі електромеханічного об'єкта.

Відома досить велика кількість робіт, пов'язаних з вивченням впливу пружних передач на якість перехідних процесів одно-, дво- [10, 11], п'яти- [12] і багатомасових систем [13]. Велика частина з цих систем є нерозгалуженими і враховують вплив пружних зв'язків, які описуються законом Гука. Потребує більшої уваги розгляд багатомасових систем з пружними передачами першого і другого роду, а також урахування можливих нелінійностей пружних передач [14].

Мета. Дослідження електромеханічних процесів двомасової системи електропривода кліті стана холодної прокатки з урахуванням нелінійності пружної передачі.

В реальних електромеханічних системах уявлення про жорсткий зв'язок вала двигуна з механізмом є припущення, яке в ряді випадків виявляється недоцільним. Практично будь-який зв'язок двигуна з виконавчим органом не є абсолютно жорсткою, і можливість припущення явищем пружності часто пов'язане з тим, що особиста частота пружних коливань системи двигун – виконавчий механізм (Д – ВМ) виявляється значно більшою частот, істотних для автоматичної системи керування електроприводом [15]. Тому підвищення швидкодії автоматичної системи, обумовлене використанням перетворювачів на базі сучасних напівпровідникових елементів та високоякісних мікропроцесорних систем керування, часто не удається реалізувати із-за впливу пружності.

Розглянемо електромеханічну систему Д – ВМ, в якій зосереджені обертові маси двигуна й механізму зв'язані між собою довгим валом (рис.1) [15]. Приймемо за J_1 момент інерції двигуна, а за J_2 – момент інерції обертових частин ВМ. При аналізі таких систем роблять наступні основні припущення: сили й моменти в системі прикладені до зосереджених мас, які не деформуються; пружні зв'язки невагомі і характеризуються постійною пружністю зв'язка, тобто коефіцієнтом пропорційності між моментом й деформацією; деформація пружних зв'язків лінійна і підпорядковується закону Гука; хвиловим рухом деформації знехтуємо.

При складанні диференціальних рівнянь не будемо виходити за рамки лінійної теорії, процеси в електромагнітній й механічній частині багатомасового електропривода розглядати вкупі [9, 15]. На рисунку 1 позначено: E_n , R_n , L_n – ЕРС, внутрішній опір та індуктивність перетворювача, який живить якір двигуна (В, Ом, Гн); U_n , $U_{дв}$ – напруга живлення перетворювача і двигуна (В); $E_{дв}$, $R_{дв}$, $L_{дв}$ – ЕРС, активний опір та індуктивність якірного кола двигуна (В, Ом, Гн); I_E – струм якірного кола (А); U_3 , I_3 , R_3 , L_3 – напруга, струм, активний опір та індуктивність кола збудження двигуна (В, А, Ом, Гн); J_1 , J_2 – приведені моменти інерції першої (двигун) й другої (механізм) мас ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$); ω_1 , ω_2 – відповідно швидкості обох мас (с^{-1}); $M_{дв}$ – електромагнітний момент двигуна (Н·м); M_C – статичний момент опору з боку виконавчого механізму (Н·м); C_{12} – коефіцієнт жорсткості (Н·м/рад).

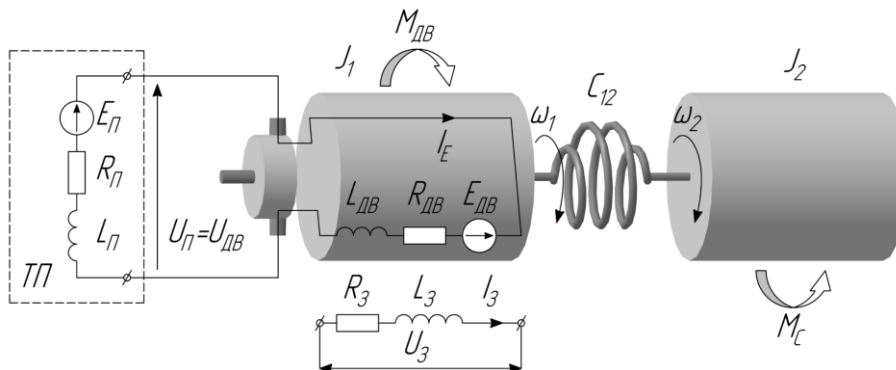


Рисунок 1 – Двомасова модель електропривода з ДПС НЗ

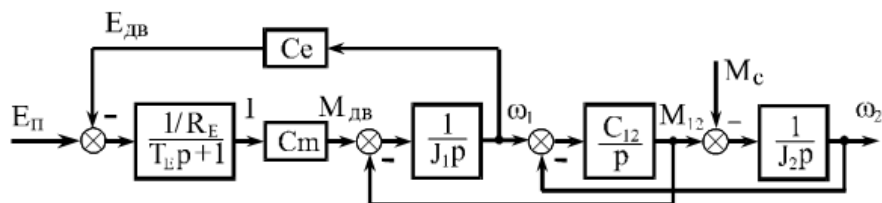


Рисунок 2 – Структурна схема двомасової електромеханічної системи

Структурна схема (рис. 2) має дві вхідні координати: зі сторони керування – напруга подана на двигун від перетворювача, зі сторони збурення – статичний момент опору, механічними втратами в двигуні знехтуємо.

Розрахунки електроприводів виконані на основі функціональних та принципових схем, представлених в томах Э66515.2... Э66515.7 документації ЦХП-1 ВАТ «Запоріжсталь». Параметри електричних машин прийняті на основі каталожних даних, паспортів та клієнтських формулярів заводів-виготівників. Дані механізмів та режими роботи прийняті та обчислені за кінематичними схемами та технологічною інструкцією ТИ 226.ПХЛ 1-03-88.

Використовуючи структурну схему двомасової електромеханічної системи (рис. 2) та результати обчислення основних параметрів двомасової електромеханічної системи у пакеті прикладних програм розроблено комп'ютерну модель вказаної системи та досліджено її особливості при варіюванні значення коефіцієнта жорсткості пружної передачі. Побудовані графіки залежностей показників якості двомасової системи при варіюванні коефіцієнта жорсткості C_{12} (рис.4).

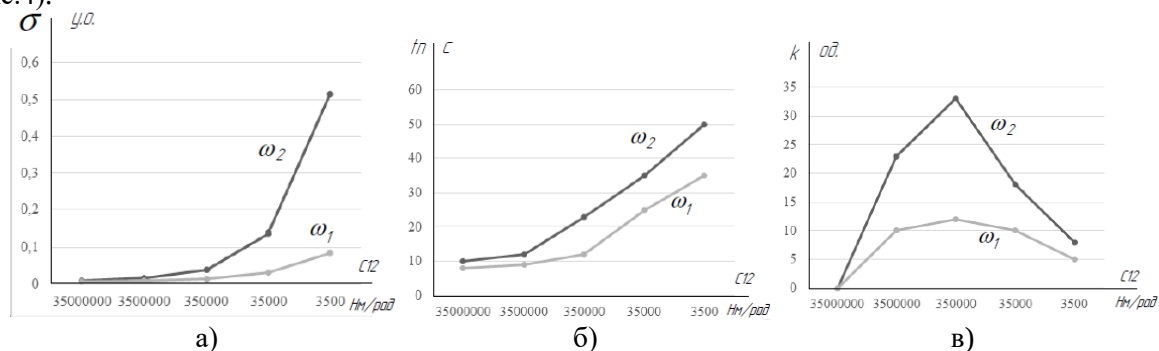


Рисунок 4 - Графіки залежностей відносного перерегулювання кутових швидкостей першої та другої мас від коефіцієнта жорсткості C_{12} (а), часу регулювання кутових швидкостей першої та другої мас від коефіцієнта жорсткості C_{12} (б), коливальності кутових швидкостей першої та другої мас від коефіцієнта жорсткості C_{12} (в).

Наявність зазорів в механічних передачах (зубчасті, ланцюгові, гвинтові і т.д.) є несприятливою особливістю. Це удари при вибірці зазорів, що впливає на точність виконання технологічних операцій, точність спостереження, знос і шум механічних передач.

Структурна схема двомасової системи рис.2 дозволяє оцінити пружні моменти, що виникають при виборі зазорів. Так як інерційні маси механізму J_2 при цьому нерухомі, процес вибору зазору закінчується пружним ударом, при якому запасена енергія маси J_1 частково розсіюється у вигляді тепла, а в основному переходить в енергію пружних деформацій, викликаючи додаткові динамічні навантаження передач (рис. 5) [16, 17].

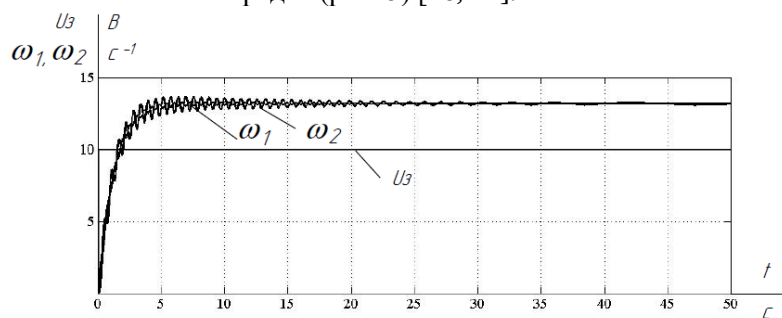
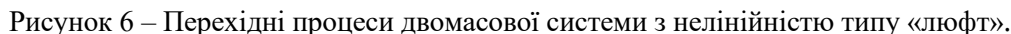
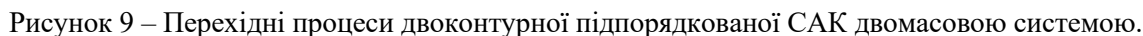
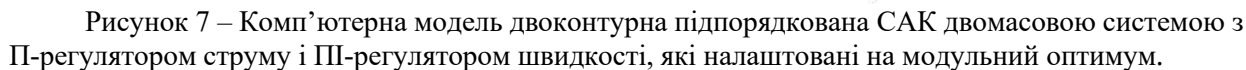


Рисунок 5 – Перехідні процеси двомасової системи з нелінійністю типу «мертва зона»



Отже, із збільшенням значення «мертвої зони» зростає спотворення вихідного сигналу блоку, тобто кутової швидкості другої маси. Із збільшенням значення нелінійності типу «люфт» збільшується коливальність системи.

Для порівняння електромеханічних процесів систем автоматичного керування підпорядкованого типу та оптимізованої засобами Матлаб розроблено комп'ютерні моделі (рис. 7 і 10) та отримані графіки перехідних процесів (рис. 8, 9, 11, 12).



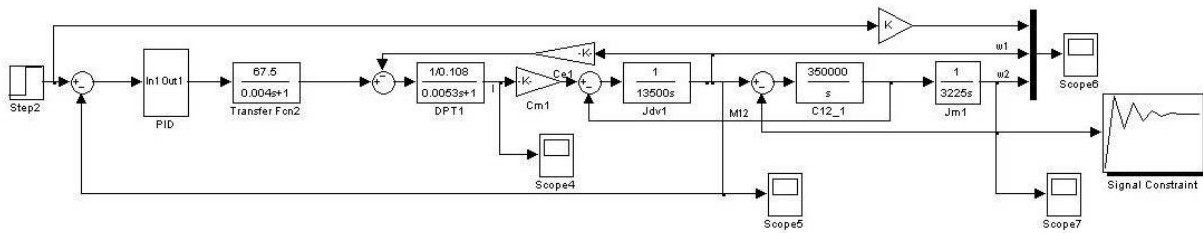


Рисунок 10 – Комп’ютерні моделі САК двомасовою системою з П-регулятором струму і ПД-регулятором швидкості, який оптимізовано засобами Матлаб.

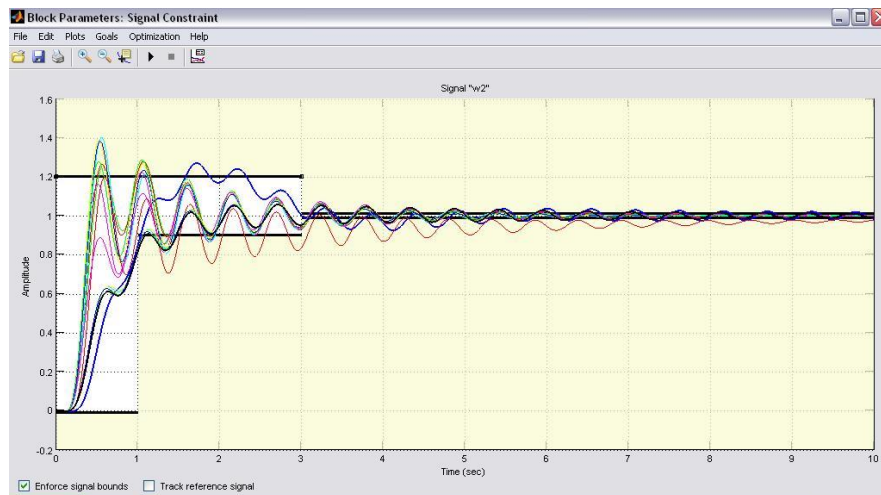


Рисунок 11 – Перехідні процеси двомасової системи при підборі оптимальних параметрів ПД-регулятора

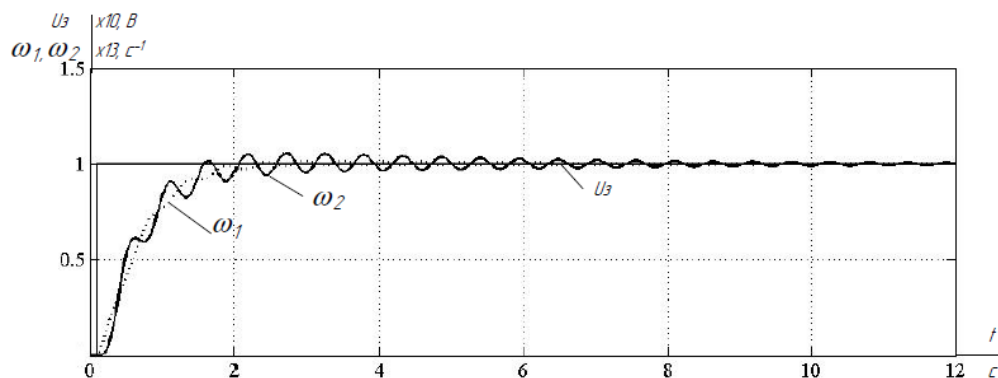


Рисунок 12 – Перехідні процеси САК з ПД-регулятором, що оптимізована засобами Матлаб

Отже, система автоматичного керування оптимізована засобами Матлаб показала кращі результати щодо показників якості керування у порівнянні з підпорядкованою системою автоматичного керування, а саме, практично відсутність перерегулювання, зменшення коливальності системи, зменшення часу регулювання.

Висновки:

Зроблено аналіз особливостей технологічного процесу і враховані технологічні вимоги, пропонувані до головного електропривода однокільового стану холодної прокатки. Розраховано САК електропривода постійного струму складена загальна структурна схема САК при двоконтурному підпорядкованому керуванні; розраховані основні параметри двомасової системи; проведено дослідження впливу зміни значення коефіцієнта жорсткості пружної ланки на показники якості САК; проведено моделювання двомасової системи електропривода кліти з урахуванням нелінійності пружної передачі; розроблено оптимізовану засобами Матлаб САК двомасовою системою електропривода кліти стану холодної прокатки, що показала кращі показники якості САК

у порівнянні з двоконтурною підпорядкованого типу з П-регулятором струму у внутрішньому контурі і ПІ-регулятором швидкості у зовнішньому контурі. Отримані результати моделювання підтвердили правильність вибору системи керування і її відповідність вимогам технологічного процесу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Назарова, Е. С. Математическое моделирование электромеханических систем станов холодной прокатки / Е. С. Назарова // Технічна електродинаміка. – 2015. – Вип. 5 – С. 82-89.
2. Mykhailenko V.V. Mathematical Model of the Semiconductor Converter with Twelve-zone Regulation of Output Voltage / V.V. Mykhailenko, S.O. Buryan, T.B. Maslova, L.M. Naumchuk, J.M. Chunyak, O.S. Charnyak // in Proc. IEEE Int. Conf. UKRCON-2017, pp. 365-368.
3. Andrii Kolb, Yuliya Pazynich, Adam Mirek and Oksana Petinova (2020). Influence of voltage reserve on the parameters of parallel power active compensators in mining. E3S Web Conf., 201 (2020) 01024 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101024>
4. Ostroverkhov, Nikolay and Nikolay Buryk. “Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive.” 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP) (2020): 1-5. DOI:10.1109/PAEP49887.2020.9240903
5. Prus, V.. “An Integrated Approach to the Analysis of the Aging of Electric Machines.” 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP) (2020): 1-4. DOI:10.1109/PAEP49887.2020.9240795
7. Бондаренко, В. И. Моделирование систем управления взаимосвязанных электроприводов процесса прокатки с учетом упругостей первого и второго рода / В. И. Бондаренко, А. В. Пирожок, Е. С. Назарова // Техническая электродинамика. Спецвып. – 2010. – Ч. 1. – С. 129-134.
8. Назарова, Е. С. Исследование электромеханических процессов многомерных систем прокатного производства с учетом упругостей первого и второго рода / Е. С. Назарова // Вісник КДПУ. – 2010. – Вип. 3(62). – Ч. 1. – С. 22-25.
9. Sadovoi O., Nazarova O., Bondarenko V., Pirozhok A., Hutsol T., Nurek T., Glowacki Sz. Modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills. Monograph. – Krakow: Traicon, 2020. – 138 p. ISBN 978-83-65180-22-3
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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
14. Назарова, О.С. Застосування засад структурного моделювання при дослідженні об'єктів з пружними зв'язками / О.С. Назарова, В.В. Лук'янов // Тиждень науки : наук.-практ. конф., 15-19 квіт. 2019 р. : тези доп. – Запоріжжя, 2019. – С. 122-123. Режим доступу: http://zntu.edu.ua/uploads/dept_s&r/2019/conf/1/TN_2019 ETF.pdf (дата звернення: 06.11.2019)
15. Nazarova Olena. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Vol. 2608, pp. 489-498. CEUR-WS.org/Vol-2608/paper36.pdf
16. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. – 410 с.
17. Назарова, О.С. Мікропроцесорні вимірювальні системи як засіб автоматизації технологічного процесу / О.С. Назарова, В.О. Шевченко // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., 1–3 квіт. 2020 р., м. Івано-Франківськ / Академія технічних наук України. Івано-Франківськ : ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», 2020. Т. 1. – С. 109-110.