

УДК 621.313.16

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.039>

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДВІСНОЇ КАНАТНОЇ ДОРОГИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

**М.В. Печеник\***, канд.техн.наук., **С.О. Бур'ян\*\***, канд.техн.наук., **Г.Ю. Землянухіна\*\*\***,  
**Д.В. Руднев**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.  
e-mail: [annzemlya@gmail.com](mailto:annzemlya@gmail.com)

*До систем безперервного транспорту, в тому числі й канатним конвеєрам, що призначені для переміщення людей та вантажів, пред'являються досить жорсткі вимоги щодо безпеки та енергетичної ефективності їхньої роботи. Зазвичай підвісні канатні дороги, що експлуатуються, мають нерегульований електропривод із системою плавного пуску. Серед шляхів забезпечення вказаних вимог є використання сучасних регульованих електроприводів. У роботі розглянуто електромеханічну систему з векторно-керованим асинхронним електродвигуном. На основі отриманої моделі в межах пакета прикладних програм MATLAB/Simulink проведено дослідження динамічних характеристик електропривода підвісної канатної дороги. Надано аналіз характеру розподілу динамічної похибки за швидкістю руху та втрат потужності залежно від навантаження та швидкості переміщення канатного тягового елемента транспортної системи. Наведені в статті результати дають змогу обирати раціональні електроприводи для систем безперервного транспорту з канатними тяговими елементами. Бібл. 4, рис. 5, табл.*

**Ключові слова:** підвісна канатна дорога, векторне керування, тяговий елемент, втрати потужності, динамічна похибка.

**Вступ.** Останнім часом спостерігається тенденція дедалі більшого застосування конвеєрних транспортних систем як з гнучкими, так і з жорсткими тяговими елементами, що мають високу продуктивність та добрі умови експлуатації. Достатньо перспективними є системи з використанням канатного тягового елемента, які у вигляді підвісних канатних доріг використовуються у вугільній, гірничорудній промисловості, у сфері туризму та забезпечують переміщення людей і вантажів у важко доступних гірських районах, а також у місцевості зі складним рельєфом [1].

Здебільшого такі електромеханічні системи використовують нерегульований електропривод із системою плавного пуску, водночас у статичних режимах роботи лінійна швидкість руху є незмінною. У процесі роботи транспортного засобу на переміщуваний вантаж діють зовнішні збурювальні чинники, які визначаються погодними умовами (вітрове навантаження, вологість) та викликають коливання в канаті, перевантаження в механічних вузлах. За таких обставин для забезпечення необхідного рівня безпеки транспортування пасажирів та вантажу доцільно за допомогою зміни швидкості руху тягового каната мінімізувати рівень коливань елементів, які несуть вантаж, внаслідок покращення характеристик динамічних процесів в електромеханічній системі механізму.

Одним із напрямів розв'язання таких питань є використання сучасних регульованих систем електроприводів, зокрема з векторно-керованими асинхронними електроприводами, які поряд із високою точністю відпрацюванням заданого закону керування дають змогу забезпечувати високий рівень показників динамічних процесів [2].

Характер технологічного процесу роботи підвісної канатної дороги передбачає широкий спектр змін навантажень, що суттєво впливає як на енергетичні параметри електромеханічної системи, так і на рівень безпеки функціонування транспортної системи.

Тому під час впровадження в оснащення підвісних канатних доріг нових систем електропривода досить актуальним завданням є оцінювання характеристик статичних та динамі-

чних режимів роботи електромеханічної системи за наявності електропривода, що пропонується.

**Мета роботи.** Дослідити характер змін втрат енергії та динамічної похибки за швидкістю руху підвісної канатної дороги в разі різних навантажень та встановленої швидкості тягового каната для випадку використання електромеханічної системи з векторно-керованим асинхронним електроприводом.

**Основні матеріали і результати досліджень.**

Для проведення досліджень використано електромеханічну систему, функціональна схема якої наведена на рис. 1.

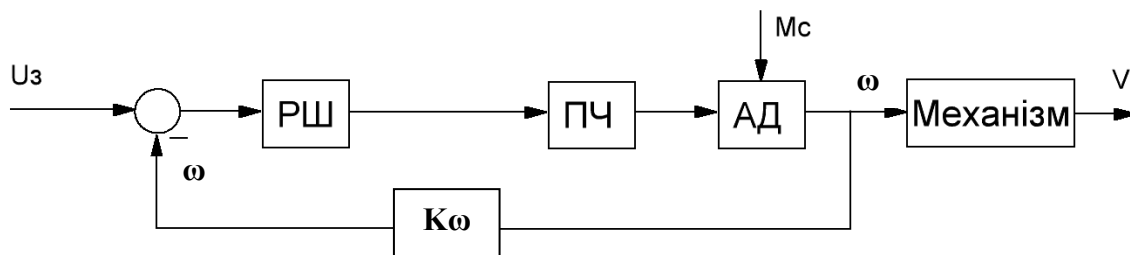


Рис. 1

У схемі прийнято такі позначення: РШ – регулятор швидкості, використовує ПІ - закон керування; ПЧ – перетворювач частоти; АД – асинхронний електродвигун;  $M_c$  – момент статичного навантаження;  $K\omega$  – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю;  $v$  – лінійна швидкість переміщення тягового елемента;  $\omega$  – кутова швидкість обертання електродвигуна.

Під час розроблення математичної моделі електромеханічної системи електродвигун, перетворювач частоти та регулятор швидкості описано диференціальними рівняннями за допомогою відомих методів [3, 4], отримано математичну модель електромеханічної системи, на базі якої в межах пакета прикладних програм “MATLAB” розроблено модель для дослідження динамічних режимів роботи електромеханічної системи підвісної канатної дороги з урахуванням векторно-керованого асинхронного електродвигуна.

Дослідження виконано на прикладі підвісної канатної дороги з такими параметрами: продуктивність – 400 чол/год; довжина – 700 м; номінальна потужність асинхронного двигуна – 200 кВт; номінальна частота обертання – 1500 об/хв.

Програма досліджень має в собі пуск до сталої швидкості без навантаження. У момент часу з 2.1 с до 3.1 с прикладається навантаження у вигляді статичного моменту, після цього відбувається гальмування.

Дослідження виконано за 3 етапи:

1. Для варіації навантаження тягового елемента  $M_c = M_{сн}$ ,  $M_c = 1.1M_{сн}$ ,  $M_c = 0.9M_{сн}$ ,  $M_c = 0.8M_{сн}$ ,  $M_c = 0.7M_{сн}$ ,  $M_c = 0.6M_{сн}$ ,  $M_c = 0.5M_{сн}$ ,  $M_c = 0.4M_{сн}$ ,  $M_c = 0.3M_{сн}$ ,  $M_c = 0.2M_{сн}$ , лінійна швидкість руху  $v = v_n = 2.2 \text{ м/с}$ , кутова –  $\omega = \omega_n$ , де  $v$ ,  $v_n$  – відповідно поточна та номінальна лінійна швидкість сталого руху тягового елемента;  $M_c$ ,  $M_{сн}$  – поточне та номінальне навантаження підвісної канатної дороги,  $\omega_n$  – номінальна кутова швидкість електродвигуна.
2. Для варіації  $M_c$ , що і в п. 1, для випадку  $v = 0,73 \cdot v_n = 1,6 \text{ м/с}$ .
3. Для варіації  $M_c$ , що і в п. 1, для випадку  $v = 0,45 \cdot v_n = 1 \text{ м/с}$ .

Результати досліджень наведено на рис. 2 та 3 і в табл. 1. На рис. 2 наведено такі графіки коли  $M_c = M_{сн}$ ,  $\omega = \omega_n$ : а) діаграма швидкості руху, б) динамічна похибка відпрацювання швидкості, в) втрати потужності. На рис. 3, а, б наведено графіки динамічної похибки відпрацювання кутової швидкості та втрат активної потужності коли  $M_c = 0.2M_{сн}$ ,  $\omega = \omega_n$  відповідно.

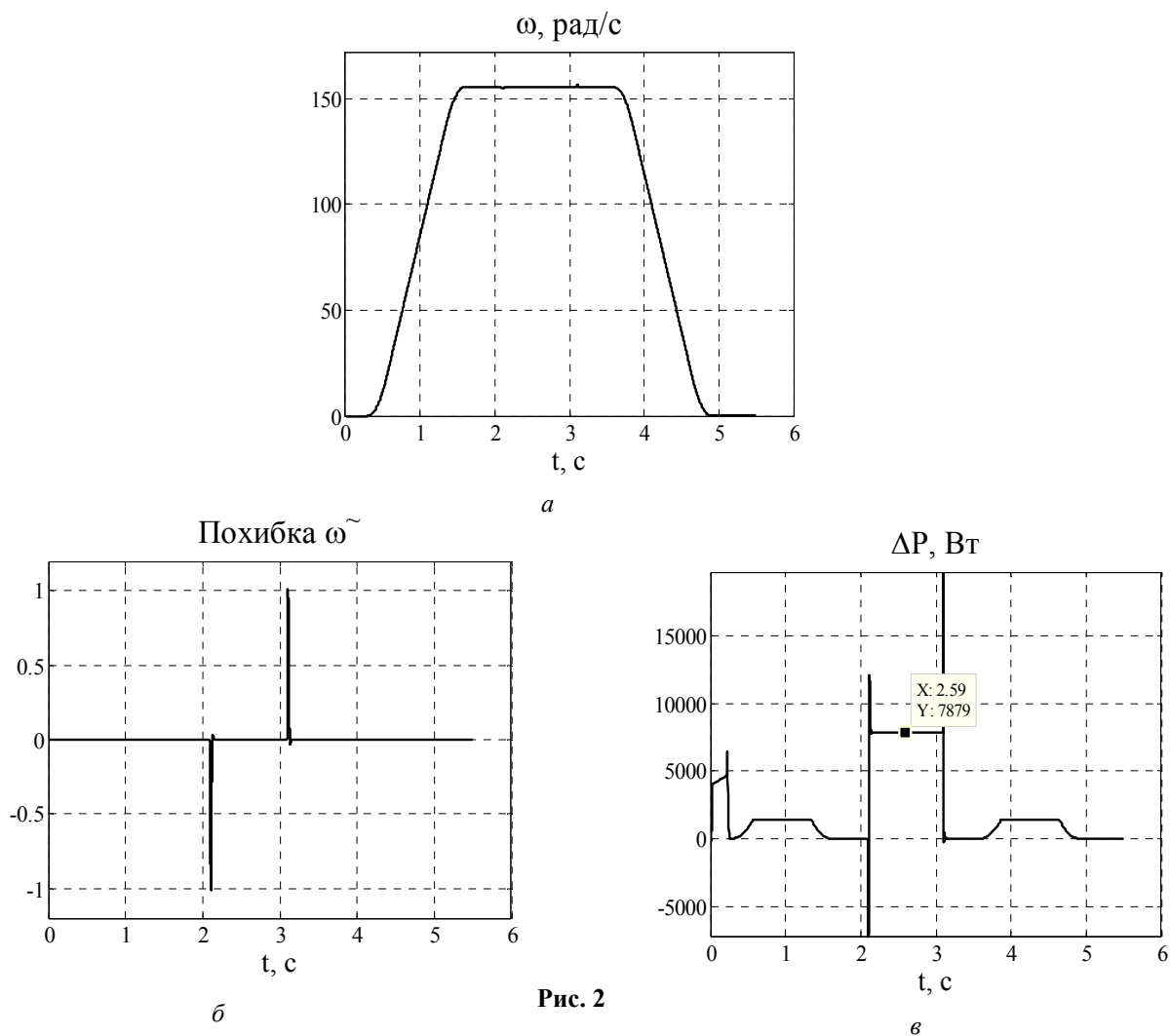


Рис. 2

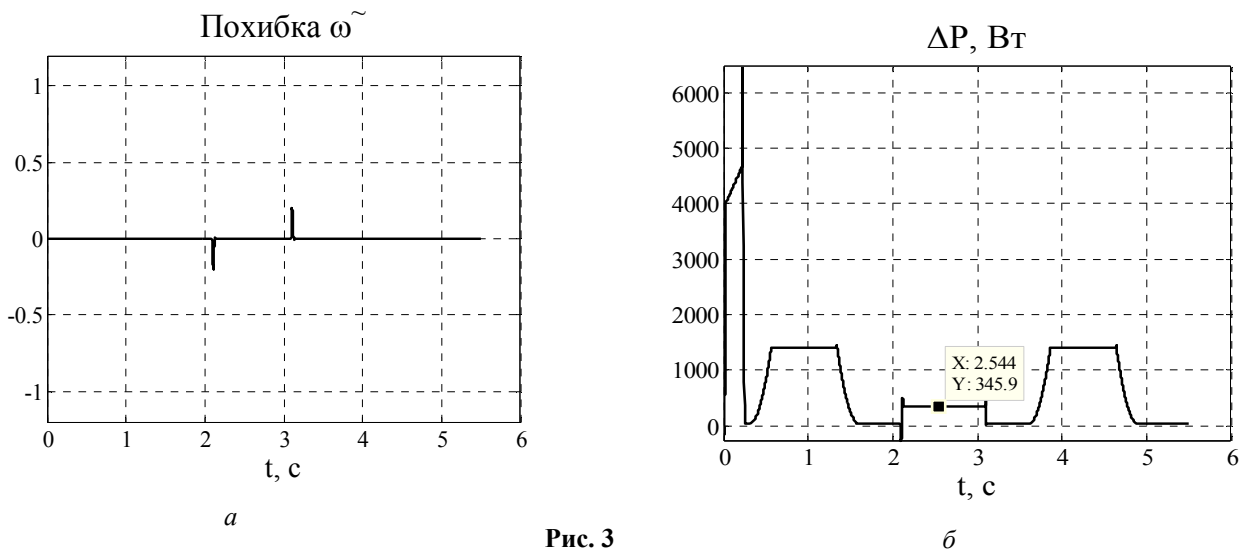
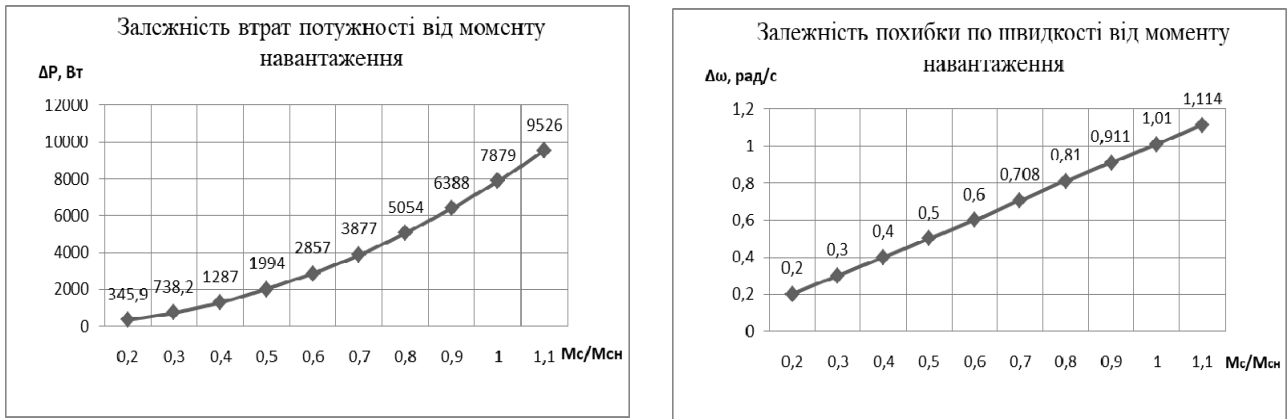


Рис. 3

Аналогічно проведено дослідження для  $M_c=1.1M_{сн}$ ;  $M_c=0.9M_{сн}$ ;  $M_c=0.8M_{сн}$ ;  $M_c=0.7M_{сн}$ ;  $M_c=0.6M_{сн}$ ;  $M_c=0.5M_{сн}$ ;  $M_c=0.4M_{сн}$ ;  $M_c=0.3M_{сн}$ .

Результати досліджень наведено на рис. 4 та в таблиці, водночас втрати  $\Delta P$  та максимальне значення похибки відпрацювання швидкості визначалися в статичному режимі коли  $t = (2,1 - 3,1)$  с. На рис. 4, а наведено графік розподілу втрат потужності залежно від варіації

навантаження коли  $\omega = \omega_n$ , на рис. 4, б – характер зміни максимальної динамічної похибки відпрацювання швидкості залежно від зміни навантаження коли  $\omega = \omega_n$ .



а

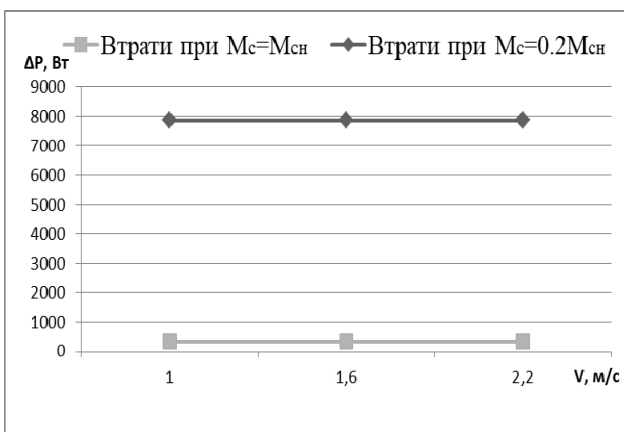
Рис. 4

б

Таблиця

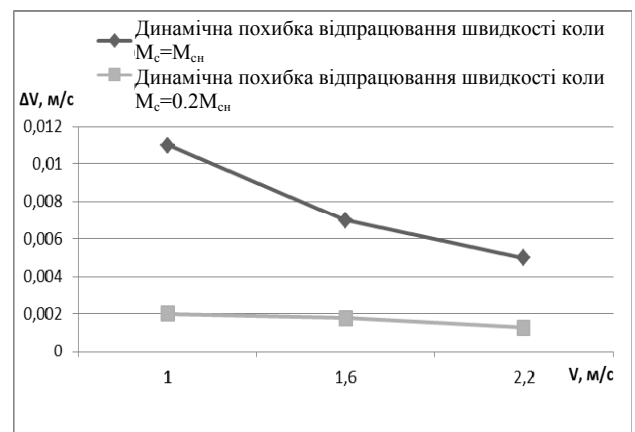
$\frac{M_c}{M_{сн}}$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1
$\Delta P, \text{Вт}$	345.9	738.2	1287	1994	2857	3877	5054	6388	7879	9526
$\Delta P, \%$	0.85	1.21	1.58	1.95	2.32	2.69	3.06	3.42	3.78	4.15
$\tilde{\omega}, \text{рад/с}$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.81	0.91	1.01	1.11
$\tilde{\omega}, \%$	0.12	0.19	0.25	0.32	0.38	0.45	0.52	0.58	0.64	0.71

У таблиці позначено:  $\Delta P_i = P_{a_i} - P_{m_i}$ ;  $\Delta P_i, \% = \frac{P_{a_i} - P_{m_i}}{P_{a_i}} \times 100$ ;  $\tilde{\omega}_i = \frac{\tilde{\omega}_i}{\tilde{\omega}_n} \times 100$ ;  $P_{a_i}$  – споживана активна потужність;  $P_{m_i}$  – механічна потужність на валу електродвигуна;  $\tilde{\omega}_i$  – похибка за швидкістю.



а

Рис. 5



б

Характер змінювання втрат активної потужності та динамічної похибки відпрацювання лінійної швидкості за варіацій навантаження та швидкості усталеного руху тягового каналу надано на рис. 5, а, б відповідно.

Отримані результати показують, що в разі коливань моменту статичного навантаження від  $0.2 M_{сн}$  до  $1.1 M_{сн}$  втрати потужності змінюються в межах від 0.86 % коли  $M_c = 0.2 M_{сн}$  до 4.15 % коли  $M_c = 1.1 M_{сн}$  від споживаної активної потужності. Динамічна похибка за швидкістю в такому діапазоні змін навантаження коливається в межах від 0.12 % до 0.71 % від номінальної сталої швидкості руху тягового елемента, що є допустимим за умовами безпеки

переміщення пасажирів за допомогою канатної дороги. Похибка за швидкістю відпрацьовується в межах 0.1 с. Після закінчення перехідного процесу швидкість руху тягового канату встановлюється на рівні заданої величини.

**Висновки.** Аналіз отриманих результатів досліджень показує, що система електропривода з векторно-керованим асинхронним двигуном має достатньо високі показники щодо втрат потужності в усьому можливому діапазоні коливань навантаження, водночас рівень динамічної похибки швидкості не перевищує допустимої величини для підвісних канатних доріг. Зважаючи на це, система електропривода з векторно-керованим асинхронним двигуном повною мірою відповідає вимогам безпеки експлуатації канатної транспортної системи безперервної дії і може бути рекомендована для використання під час проектування нових і модернізації діючих систем підвісних канатних доріг.

1. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги. М. 1966. 130 с.
2. Janusz Kowal, Jacek Snamina, Andrzej Podiadlo, Jaroslaw Konieczny Static and dynamic analysis of the cableway. *Researchgate*. 2008. URL: [https://www.researchgate.net/publication/258297882\\_Static\\_and\\_dynamic\\_analysis\\_of\\_the\\_cableway](https://www.researchgate.net/publication/258297882_Static_and_dynamic_analysis_of_the_cableway).
3. Пересада С.М., Ковбаса С.М. Узагальнений алгоритм прямого векторного керування асинхронним двигуном. *Технічна електродинаміка*. 2002. С. 17–22.
4. Печеник М.В., Бур'ян С.О., Наумчук Л. М. Дослідження енергетичних режимів роботи багатодвигунного стрічкового конвеєра. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 82–84.

#### ANALYSIS OF THE OPERATING MODES OF THE SUSPENDED CABLE CAR ELECTRIC DRIVE USING THE VECTOR CONTROL SYSTEM

**M.V. Pechenik, S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, D.V. Rudniev**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: [annzemlya@gmail.com](mailto:annzemlya@gmail.com)

*Continuous transport systems, including rope conveyors designed to move people and goods, are subject to very strict safety and energy efficiency requirements. As a rule, suspended cableways in operation have an unregulated electric drive with a smooth start system. Among the ways to meet these requirements is the use of modern regulated electric drives. The electromechanical system with a vector-controlled asynchronous electric motor is considered in the work. Based on the obtained model, within the framework of the MATLAB / Simulink application package, an investigation of the dynamic characteristics of the cableway electric drive was carried out. An analysis of the nature of the distribution of dynamic error in terms of speed and energy losses depending on the load and speed of movement of the rope traction element of the transport system is given. The results presented in the article make it possible to choose rational electric drives for continuous transport systems with rope traction elements. References 4, figures 5, table.*

**Keywords:** cable car, vector control, traction element, power losses, dynamic error.

1. Dukelskiy A.Y. Suspended cable cars. Moskva. 1966. 130 p. (Rus)
2. Janusz Kowal, Jacek Snamina, Andrzej Podiadlo, Jaroslaw Konieczny Static and dynamic analysis of the cableway. *Researchgate*. 2008. URL: [https://www.researchgate.net/publication/258297882\\_Static\\_and\\_dynamic\\_analysis\\_of\\_the\\_cableway](https://www.researchgate.net/publication/258297882_Static_and_dynamic_analysis_of_the_cableway).
3. Peresada S.M., Kovbasa S.M. Generalized algorithm of direct vector control of an induction motor. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2002. Pp. 17–22. (Ukr)
4. Pechenik M.V., Burian S.O., Naumchuk L. M. Research of energy modes of operation of a multi-engine belt conveyor. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 82–84. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.082>

Надійшла: 07.04.2021

Received: 07.04.2021