

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.3

УДК 622.673

Бельмас І.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-2112-0303, e-mail: belmas09@meta.ua

Танцура Г.І., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8672-1153, e-mail: hannaivan71@gmail.com

Білоус О.І., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-6398-8843, e-mail: bilouselena66@gmail.com

Швачка А.В., аспірант ORCID: 0000-0002-6934-6152, e-mail: a.shvachka@ukr.net

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Belmas Ivan, Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of Mechanical Engineering and Welding Technology

Tantsura Ganna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering

Bilous Olena, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering

Shvachka Angelina, postgraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОРИВІВ ТРОСІВ ВАНТОВОГО КАНАТУ

Запропоновано метод обстеження багатошарового вантового каната за схемою прикладання електричного опору до одного кінця троса та однієї сторони каната. За мету ставилося фіксування небезпечних ситуацій, пов'язаних із втратою міцності канатів, та завчасне попередження про необхідність їх зміни. Для цього проаналізовано методи діагностики вантового мосту. Встановлені вимоги до системи контролю тросів у вантовому канаті забезпечують по чергове контролювання електричних опорів ланцюгів утворених тросами. Циклічне тестування, яке закладено в автоматичну систему контролю, дає можливість для перешкодження руйнування тросів. Розроблені вимоги до системи виявлення пориву містять параметри обстеження кожного шару тросів, які входять у багатошаровий канат, та забезпечують потенційне покращення конструкційної міцності вантових мостів.

Ключові слова: вантовий канат; електричний сигнал; система контролю; розрив; трос.

A method of examining a multi-layered wire rope according to the scheme of applying electrical resistance to one end of the cable and one side of the rope is proposed. The goal was to detect dangerous situations associated with the loss of strength of the ropes and provide an early warning about the need to change them. For this purpose, the methods of diagnosis of the cable-stayed bridge were analyzed. The established requirements for the cable control system in the cable-stayed cable provide alternate control of the electrical resistances of the chains formed by the cables. Cyclic testing, which is included in the automatic control system, provides an opportunity to prevent the destruction of cables. The developed requirements for the gust detection system include inspection parameters for each layer of cables included in a multi-layer rope and provide potential improvements in the structural strength of cable-stayed bridges.

Keywords: wire rope; electrical signal; control system; breaking; rope.

Постановка проблеми

Вантові мости, які побудовані у Сполучених Штатах, Японії, Європі, а також у країнах третього світу, привернули увагу фахівців через їхню здатність охоплювати великі прогони. Сучасні вантові мости сягають майже 1000 м, наприклад, міст Татара у Японії, Нормандський міст у Франції.

В Україні, у місті Запоріжжя, будується міст із загальною довжиною прогону 9,1 км. Першу частину згаданого мосту відкрито для автомобільного руху у 2022 році.

Несприятливі випадки або надзвичайні події зумовлюють динамічне навантаження на вантовий міст. Щоб врахувати втрату міцності тросів при проектуванні вантових канатів, інженери мостів покладаються на норми (ЕС3, 2006; PTI D-45.1-12, 2012). Нормативи інформують про допустимі навантаження, які відповідають безпечним умовам експлуатації моста (Mozos and A.C. Aparicio) [1].

Застосування каната не круглого, а еліптичного або близького до нього перерізу, дозволить зменшити вплив вітрових навантажень [2]. Технічно реалізувати вказане можна, створивши вантовий канат як композитну конструкцію у вигляді системи паралельних тросів, з'єднаних еластичним матеріалом, наприклад поліуретаном або гумою.

Аналогом такому канату можна вважати двошаровий гумотросовий канат. Збільшенням кількості шарів канату можна отримати канати із заданим опором вітровим навантаженням. Багатошаровий канат можна розробити шляхом вулканізаційного з'єднання одношарових або двошарових гумотросових канатів безпосередньо на місці монтажу. На сьогодні виготовлення гумотросових канатів відбувається тільки в Україні. Практика використання довела їх переваги: термін роботи гумотросових багатошарових канатів перевищує термін роботи звичайних канатів у 6 разів [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Було проведено низку досліджень щодо впливу розривів на троси канату вантових мостів (Mozos і Aparicio; Hyttinen та ін.; Wolff і Starossek; Kao і Kou; T. Zoli і Woodward) [1]. Ці дослідники з'ясували, що використання коефіцієнтів динамічного посилення є надто спрощеним, і цей коефіцієнт може змінюватися в різних місцях вантового мосту залежно від типу та місця розриву, що досліджується. Вони також провели нелінійний динамічний аналіз, змінюючи місце пориву каната, кількість втрачених тросів і навантаження, яке отримали під час розриву.

У ряді робіт було обґрунтована можливість контролю пориву тросів гумотросових канатів та стрічок на основі зміни електричного опору [3]. Запропоновано низку технічних рішень з виявлення ушкоджень тягового осердя гумотросових канатів та стрічок [4, 5]. У [6] запропоновано метод моделювання напружено-деформованого стану гумотросового тягового органу. Визначення напруженого стану канату приведено у роботах [7, 8]. У статті [9] наведено вплив геометрії гумової оболонки на її опір як провідника електричного струму.

У публікації [10] розглянуто схеми зняття сигналу з тросів гумотросового канату, але пропозиції до розробки системи безперервного контролю багатошарового канату не наводяться.

Формулювання мети дослідження

З метою забезпечення експлуатаційної безпеки та підвищення терміну експлуатації вантових мостів роботу спрямовано на розроблення вимог та покрокового алгоритму дій автоматичної системи контролювання гумотросових багатошарових канатів і визначення їх напруженого стану за рахунок прикладання електричного опору до кінців тросів.

Виклад основного матеріалу

Розробка вимог до системи автоматичного виявлення розривів тягових складових каната з розташуванням тросів в його перерізі рядами в шарах за довільного місця ушкодження зазвичай має проектуватися на основі наступних даних: тип каната, його довжина, кількість тросів в шарах та кількість шарів в канаті, можливість доступу до одного або обох кінців каната, питомий електричний опір тросів каната, питома електрична провідність гуми розташованої поміж тросами.

Для перевірки цілісності тросів та виявлення номера ушкодженого троса в ряді та визначення місця ушкодження функціонування системи контролю повинне передбачати:

- циклічне звіряння кожного шару М та тросів в шарах N (рис. 1), номери рядів в яких ідентифікуються з метою визначення електричного опору між двома точками підключення;
- порівняння виміральної величини між парою точок з «нормативною» величиною, що відповідає нормальному стану контрольованого вузла, та знаходженні результату порівняння «Розрив виявлено» або «Стан робочий»;
- формування сигналу відключення електричного двигуна приводу підйомної машини;
- визначення місця ушкодження, як функції змін електричних опорів, заміряних між різними парами тросів.

На рис. 1 наведено структурну схему автоматичної системи контролю розриву тросів вантового каната та визначення місця ушкодження.

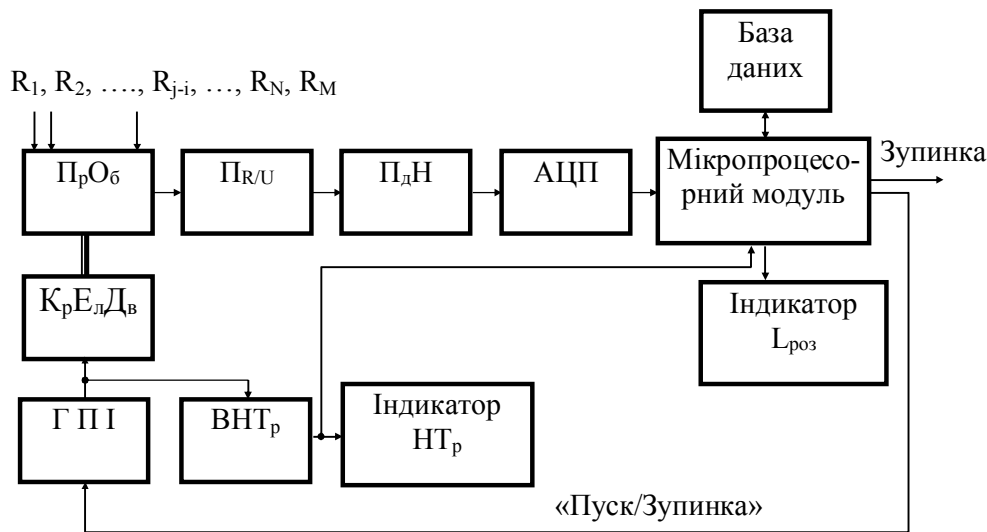


Рис. 1. Структурна схема автоматичної системи контролю розриву тросів вантового канату

Схема передбачає реєстрацію електричного опору тросів: $R_1, R_2, \dots, R_{j-i}, \dots, R_N, R_M$. Значення опору залежать від технічного стану вантового каната, вони надходять у пристрій обігу (ПрОб). У заданій схемою послідовності пристрій обігу приєднує кожен фіксований номер ряду тросу та в ньому пару тросів до вимірювальної ланки системи.

Кроковий електродвигун (КрЕлДв) враховує час приєднання датчика, інтервал часу між вимірюваннями опору заданих пар тросів. Джерелом живлення електродвигуна є генератор прямокутних імпульсів (ГПІ). Електричні параметри (період генерації імпульсів, їх ширина) визначають тривалість приєднання тросів та паузу між вимірюваннями опору відповідних пар тросів. Паралельно вихідні імпульси ГПІ надходять у визначальник номера пари тросів (ВНТр), що ідентифікує пару, яка у цю мить приєднана до системи. ВНТр — це двійковий лічильник імпульсів з дешифратором. На відповідному табло системи (Індикатор НТр) показується номер пари тросів. Опір приєднаної пари тросів перетворюється у блоці (PR/U) в електричну напругу. Напруга за допомогою підсилювача (ПдН) доводиться до нормованого значення. Це значення визначається максимальною величиною робочого діапазону аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Перетворювач (PR/U) побудовано за схемою нерівноважного моста. АЦП перетворює аналоговий вихідний сигнал у 10-ти розрядний двійниковий код. Цей код надходить на системну шину даних мікропроцесорного модулю. Інформація, що пов'язана з фактом виникнення пошкодження троса та розрахунком місця цього ушкодження, накопичується в базі даних. Визначення пошкодженого троса та місця ушкодження для канатів незначної довжини здійснюється програмно.

На рис. 2 наведено структурну схему алгоритму роботи такої програми. У складі цієї схеми 16 алгоритмічних блоків. Початок роботи системи визначається блоком 1. Блок 2 для кожного шару N та тросів в шару M формує масив нормативних опорів R_{j-i} для порівняння їх значень із відомими опорами R_{j-i} (блок 6), які замірюються у процесі роботи автоматичної системи контролю. Блок 3 розміщує інформацію про загальну кількість шарів та номерів рядів з тросами (N, M) у вантовому канаті, які підлягають контролю.

У схемі передбачено внутрішній і зовнішній цикли роботи системи. Внутрішній цикл здійснює тестування визначеного троса в шарі N та M (блок 5), оцінює його стан (блоки 6 і 7). У випадку нормального стану троса, який щойно контролювався, внутрішній цикл переходить на контроль наступного (блок 8).

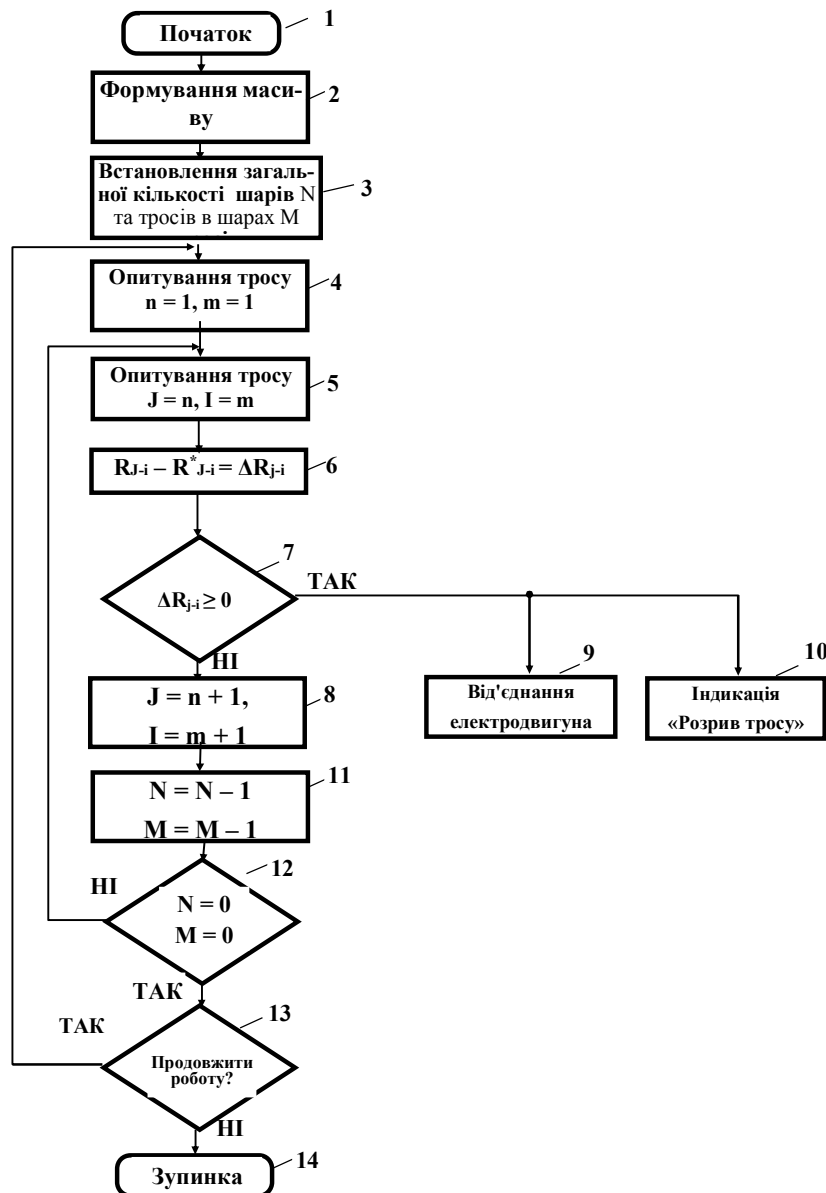


Рис. 2. Структурна схема алгоритму функціонування автоматичної системи контролю розриву тросів багатошарового канату

Якщо ж трос виявився пошкодженим (розірвався), блок 7, реагуючи на результат порівняння значення R_{j-i} , видає логічний сигнал «ТАК», що від'єднує електродвигун (блок 9) від силового контуру і «сповіщає» про факт розриву троса (блок 10).

Блоки 11, 12 утворюють лічильник кількості тросів у шарах N та M , контроль яких ще не здійснений. Блок 13 підпорядкований прийняттю рішення оператором або на зупинку (блок 14) функціонування автоматичної системи контролю (сигнал «НІ»), або його продовження (сигнал «ТАК»). Зворотній зв'язок блоку 13 через його вихід «ТАК» з блоком 4 утворює зовнішній цикл схеми алгоритму.

У системі контролю канатів значної довжини програмна складова будується на оптимізації залежності отриманих за різними схемами зняття показань пристрою вимірювання електричного опору.

Нижню межу значень опір має у випадку контролю опору каната без ушкоджень, при підведенні потенціалів до протилежних кінців троса, ближчого до середини каната. Величина цього опору менша за величину опору окремо взятого троса та не менша за опір паралельно з'єднаних поміж собою тросів. Відповідно мінімальне значення електричного опору, який має контролюватися, становить опір паралельно з'єднаних тросів. Величина опору при цьому визначається відомою залежністю [9]

$$R_{min} = r_0 \frac{4L}{n\pi d^2 f},$$

де r_0 — питомий електричний опір металу троса; f — коефіцієнт заповнення перерізу троса металом.

Коефіцієнт заповнення перерізу троса металом зазвичай залежить від конструкції троса. Він менший за одиницю, становить 0,7—0,8.

Відносна величина зростання електричного опору у разі пошкодження одного з тросів буде залежати від того, який трос ушкоджено та в якому місці. Межа зміни відносного зростання електричного опору становить $1 \div \infty$. У реальних конструкціях ∞ може мати місце практично лише у разі порушення в системі комутації вимірювального пристрою та тросів. Реальна межа зміни відносного зростання електричного опору становить $1 \div 100$. Відповідно контрольоване значення електричного опору має лежати в межах $(1 \div 100)R_{min}$.

Зміна відстані до місця ушкодження на декілька метрів при загальній довжині каната 100 та більше метрів не суттєво впливає на значення електричного опору. Відповідно при швидкості руху до декількох метрів на секунду. Час зняття показань та їх аналіз може перевищувати одну секунду.

Висновки

Сформульовані практичні рекомендації щодо застосування системи постійного контролю вантового канату. Шляхом циклічного тестування система інформує щодо наявності розривів в усіх шарах. Зміна значення опору та зміна параметра в блоці індикації на «розрив троса» сповіщає про необхідність обслуговування канату.

Завдяки розробленій системі діагностування, контроль тросів відбувається структурно та враховується кожен шар з тросами вантового канату. Заздалегідь інформується службу перевірки про необхідність технічного обслуговування тросів, що є необхідним для практичного впровадження та безпечного користування в цілому мостами.

Наступний крок досліджень повинен бути спрямований на розробку технічних умов та самої системи перевірки цілісності тросів за значенням їх електричного опору при доступі до одного кінця каната.

Список використаної літератури

1. Олуремі О. Структурний аналіз конструкції вантових мостів на втрату міцності канату: дис. ... д-ра. філ. наук. Суррей: Університет Суррей. 2017. 363 с.
2. Колосов Д.Л. Обґрунтування параметрів та конструкцій двошарових гумотросових конвеєрних стрічок для гірничих підприємств. дис.... канд. техн. наук: 05.05.06. Дніпро: НГУ 2002. 164 с.
3. Бельмас І.В. Контроль міцності ГТК. Наука підприємства. 1991. С. 342–345.
4. Пристрій автоматичного контролю цілісності врівноважувального канату: пат. 9515А Україна: МПК В66С 13/04, заявл. 16.05.1994; опубл. 30.09.1996, бюл. №3.
5. Пристрій для контролю за станом гумотросового канату: пат. 27372 Україна: МПК В65G 43/02, № u2007 07313; заявл. 02.07.2007; опубл. 05.10.2007, бюл. №17.
6. Колосов Л.В., Бельмас І.В. Застосування електричних моделей на дослідження композитних матеріалів. Механіка композитних матеріалів. 1981. № 1. С. 115–119.

7. Бельмас І.В., Данияров Н. А., Танцура Г.І. Контроль стану тросів гумотросового тягового органу. Праці університету Карагандинського технічного університету, м. Караганда.: 2016. № 2, С.76–78.
8. Бельмас І.В., Білоус О.І., Нельга А.Т., Бельмас О.Л. Контроль тросів гумотросового канату. Наукові дослідження – теорія та експеримент: Матеріали четвертої міжн. наук.-практ. конф. Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2008. Т. 8. С. 8–12.
9. Бельмас І.В., Сабурова І.Т., Поліщук Я.П. Електричний опір гумової оболонки гумотросового канату. *Механізація виробничих процесів рибного господарства, промислових та аграрних підприємств*. 2007. № 8. С. 89–62.
10. Belmas I.V., Bilous O.I., Tantsura H.I., Shvachka A.V. Development of a System for Continuous Automatic Monitoring of the Cable Rope Condition (Розробка системи безперервного автоматичного моніторингу стану каната). *Опір матеріалів*. 2022. №5. С. 825–840.

REQUIREMENTS FOR THE MONITORING SYSTEM OF WIRE ROPE CABLE BREAKS

Abstract

One of the modern trends in the improvement of structures in construction is the use of steel-reinforced concrete systems. In such systems, cable-stayed ropes are used to absorb tensile forces. The cited works did not consider the issue of the interaction of the rope and the node connecting its ends to the structure. Ropes are used in various fields of technology: suspended cableways, mine and elevator equipment, lifting cranes, etc.

The construction of such ropes is close to traditional round ones. At the same time, the conditions of operation, assembly of structures using them are different from traditional round ropes. Thus, cable-stayed cables of bridges perceive significant wind loads. Transportation of ropes for the perception of significant loads is complicated due to their significant bending stiffness.

An elliptical shape or a shape similar to this section of the rope will reduce the impact of wind loads. Technically, this can be implemented by creating a cable rope as a composite structure in the form of a system of parallel cables connected by an elastic material, such as polyurethane or rubber.

A multi-layer rope can be obtained by vulcanizing the connection of single-layer or double-layer rubber ropes directly at the installation site. The practice of use has proven their advantages - the service life of rubber balancing ropes exceeds the service life of ordinary ropes by 6 times.

The design requirements of the study will contribute to those given in the bridge design standards and will correct the current lack of knowledge regarding the analysis of sudden or gradual cable pull. This will also provide a more realistic estimate of the dynamic amplification factor expected in the case of failure. The requirements for the gust detection system are intended to provide a potential improvement in the structural strength of cable-stayed bridges and provide economic benefits to society.

References

- [1] Oluremi O. (2017). Strukturnyy analiz konstruktsiyi vantovykh mostiv na vtratu mitsnosti kanatu [Structural Response of Cable-Stayed Bridges to Cable Loss.]. *A Thesis submitted*. University of Surrey [in English].
- [2] Kolosov D.L. (2002). Obgruntuvannia parametriv ta konstruktsii dvosharovykh humotrosovykh kon-veiernykh strichok dlia hirnychykh pidpriemstv [Justification of the parameters and designs of two-layer rubber conveyor belts for mining enterprises] *Technical Sciences* Dnipro: NGU [in Ukrainian].
- [3] Belmas I.V. (1991). Kontrol mitsnosti HTK [Control of strength of GTK]. *Nauka pidpnyemstva. Enterprise science*, 342–345 [in Russian].

- [4] Prystrii avtoma-tychnoho kontroliu tsilisnosti zrivnovazhuvalnogo kanatu [Device for automatic control of the integrity of the balancing rope]: pat. 9515 Ukraine: MPK B66C 13/04, opubl. 30.09.1996. [in Ukrainian].
- [5] Prystrii dlia kontroliu za stanom humotrosovoho kanatu [Device for monitoring the condition of the rubber cable rope]: pat. 27372 Ukraine: MPK B65G 43/02, № u2007 07313; zayavl. 02.07.2007; opubl. 05.10.2007. [in Ukrainian].
- [6] Kolosov L.V., Belmas Y.V. (1981). Zastosuvannia elektrychnykh modelei na doslidzhennia kompozytnykh materialiv [Application of electrical models to the study of composite materials]. *Mekhanika kompozytnykh materialiv. Mechanics of composite materials*, 1. 115–119 [in Russian].
- [7] Belmas I.V., Danyiarov N. A., Tantsura H.I. (2016). Kontrol stanu trosiv humotrosovoho tiahovoho orhanu [Control of the condition of the cables of the rubber cable traction body]. *Pratsi universytetu – Works of the university.*: Karahandyns'kyi tekhnichnyi universytet, 2, 76-78 [in Russian].
- [8] Belmas I.V., Bilous O.I., Nelha A.T., Belmas O.L. (2008) Kontrol trosiv humotrosovoho kanatu [Control of rubber rope ropes]. *Naukovi doslidzhennia – teoriia ta eksperyment.*: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. (Vols 8), (pp.8–12). Poltava. Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University [in Ukrainian].
- [9] Belmas I.V. Saburova I.T. Polishchuk J.P. (2007). Elektrychnyi opir humovoi obolonky humotrosovoho kanatu [Electrical resistance of the rubber sheath of the rubber rope] *Mekhanizatsiya vyrobnychyykh protsesiv rybnoho hospodarstva, promyslovykh ta ahrarnykh pidpryyemstv – Mechanization of production processes of fisheries, industrial and agricultural enterprises*, 8, P. 89–62 [in Ukrainian].
- [10] Belmas I.V., Bilous, O., Tantsura H., Shvachka A. (2022). Development of a System for Continuous Automatic Monitoring of the Cable Rope Condition. *Opir materialiv – Strength of Materials*, V. 54, №5, P. 825–840 [in English].

Надійшла до редколегії 22.02.2023