

Забезпечення подання струму до одного кінця троса при різних параметрах вантового каната

I.V. Бельмас¹ • O.I. Білоус¹ • G.I. Танцура¹ • A.V. Швачка¹

Received: 10 January 2023 / Revised 17 February 2023 / Accepted: 7 March 2023

Проблематика. Системи структурного моніторингу тросів широко використовуються для діагностування стану вантових мостів. Відомі методи неруйнівного контролю напруженого стану не можуть у ряді випадків досить повно бути використані, або їх використання важке та економічно не доцільно чи неефективно.

Мета дослідження. Фіксування небезпечних ситуацій пов'язаних із втратою міцності канатів та завчасно попереджати про необхідність їх зміни. За допомогою розробленої математичної моделі раніше ми провели аналіз розподілу струму та потенціалів. Отримані результати необхідні для впровадження подальших технічних рішень, які дозволять забезпечити надійність каната при багатьох ступенях пошкодження.

Методика. Найбільш зручний метод для моніторингу механічних параметрів тросів вантового канату – метод електричного опору.

Результати. Представлені результати залежності розподілу напружень та струму від параметрів канату. Досліджений метод забезпечить підвищення надійності, безпеки та терміну служби вантових мостів.

Наукова новизна. Робота полягає у вивченні впливу обриву тросів, з яких складаються вантові канати. Для цього створена модель, яка дозволяє поєднати декілька параметрів (питомий опір та електропровідність, довжина, кількість тросів). Нами розглянутий випадок для зняття сигналу з одного кінця троса і встановлено, що при поступовому збільшенні довжини канату на графіку починається збільшення напруги для не ушкодженого та ушкодженого троса. Представлені результати максимальних показників напруги для довжини канату від 1 м до 10 м та від 10 м до 100 м.

Практична значимість. Автоматична система виявлення розриву тросів з функцією визначення місця ушкодження дозволяє в автоматичному режимі в процесі експлуатації підйомної машини обладнаної плоским гумотросовим канатом контролювати технічний стан тросів завулканізованих в гумову оболонку та зупинити машину у разі пориву будь-якого троса. Таким чином система яка контролює по черзі троси сповіщає про наявність руйнування та дає можливість запобігти подальших аварій.

Ключові слова: електричний опір, контроль, вантовий канат, трос, математична модель, порив.

Вступ

Мости, особливо мости з великим прольотом, як правило, більш вразливі до руйнування у випадку локалізованого розривання тросів.

Нині відомі випадки, коли сильний вітер впливає на стан канатів і через обриви значної кількості тросів відбулися техногенні колапси руйнівального характеру. Такі як: автоміст Генуї в Італії 2018, міст Чияра

в Колумбії у січні 2018 та обвал моста в Індії у жовтні 2022 року.

Одним з сучасних напрямів вдосконалення споруд в будівництві є застосування сталевих залізобетонних систем. В таких системах використовуються вантові канати для сприйняття сил розтягу. Конструкція таких канатів близька до традиційних круглих. Вантові мости можуть сприймати значні вітрові навантаження шляхом удосконалення канатів.

Запропонований вантовий канат за конструкцією можна розглядати як декілька плоских гумотросових канатів з'єднаних як декілька шарів. Конструкція двошарового гумотросового канату обґрунтована в роботі [1].

Вперше, використовувати плоский багатотросовий канат в якості тягового органу підйомної машини

✉ I.V. Бельмас
science@dstu.dp.ua

¹ Дніпровський державний технічний університет,
Кам'янське, Україна

було запропоновано Сілезькому технічному університету Польщі [2, 3].

Еліптична форма або подібна до цього перерізу форма канату дозволить зменшити вплив вітрових навантажень. Технічно реалізувати вказане можна створивши вантовий канат як композитну конструкцію у вигляді системи паралельних тросів з'єднаних еластичним матеріалом, наприклад поліуретаном або гумою.

Необхідним кроком для впровадження таких канатів є розробка автоматичної системи контролю для виявлення поривів. Вимоги до системи виявлення пориву мають забезпечити потенційне покращення конструкції міцності вантових мостів і отримати економічну користь для суспільства.

Постановка задачі

В ряді робіт було обґрунтовано пориви тросів гумотросових канатів та стрічок на основі зміни електричного опору тросів [4]. Вплив розривів елементів армування композитних плоских гумотросових канатів (стрічок) розглянуто в роботі [5]. Запропоновано низку технічних рішень контролю гумотросових канатів та стрічок [6, 7]. У вантовий канат пропонується закладати провідник струму форми спіралі та контролювати його електричний опір. Із розрізуванням спостерігається руйнуванням закладеної спіралі, що призводить до зростання електричного опору, яке фіксується системою контролю. Вантовий канат є нерухомий. Небезпека його розрізування відсутня, а міцність залежить від стану тросів [8–11].

Раніше було розглянуто схеми прикладання опору [12]. Але остаточно способів застосування методу не затверджено, через відсутність достовірних результатів щодо довжини на якій треба відстежувати розриви.

Основна частина

Канат – це система з тросами, що розташовані вздовж осей координат. В системі координат (x, i, j) троси розташовані по рядах та в рядах в трьох напрямках.

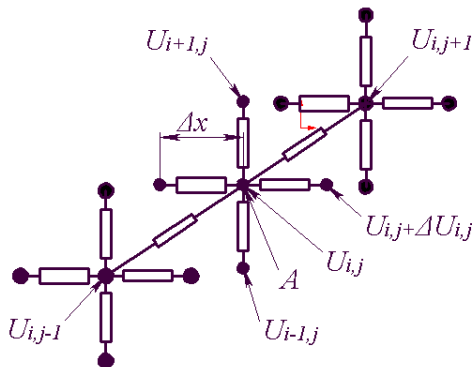


Рис. 1. Схема взаємодії відрізка i, j троса з суміжними тросами як провідниками струму

Канат довжиною L , троси розташовані в N рядах, ряд складається з M тросів. Питомий опір троса позначимо r , питому електричну провідність гуми поміж тросами q . Електрична провідність тросів значно перевищує відповідний показник гуми, розташованої поміж ними. Для i, j трос та суміжними тросами $i+1, j; i-1, j; i, j+1; i, j-1$ довжиною Δx [1].

Врахуємо можливість рівності нулю номерів рядів та номерів тросів в рядах. Задамо суми експонент з уявними аргументами тригонометричними функціями, отримаємо вираз для визначення характеристичних показників NM однорідних рівнянь:

$$U_{i,j} = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x}) \cos(\mu_m(i-0,5)) \times \cos(\chi_n(j-0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} (A_m^M e^{\beta_m^M x} + B_m^M e^{-\beta_m^M x}) \times \cos(\mu_m(i-0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} (A_n^N e^{\beta_n^N x} + B_n^N e^{-\beta_n^N x}) \times \cos(\chi_n(j-0,5)) + \frac{I_0}{MN} r x \quad (1)$$

$$I_{i,j} = r^{-1} \left(\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} - B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x}) \beta_{m,n} \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} (A_m^M e^{\beta_m^M x} - B_m^M e^{-\beta_m^M x}) \beta_m^M \times \cos(\mu_m(i-0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} (A_n^N e^{\beta_n^N x} - B_n^N e^{-\beta_n^N x}) \beta_n^N \times \cos(\chi_n(j-0,5)) \right) + \frac{I_0}{MN} \quad (2)$$

До кінця тросу, в перерізі $x = 0$ підведено електричний сигнал в $1A$. Значимо, значення індексів у номерах тросів для зручності відповідають координаті перерізу, для якого вони розглядаються. Їх потенціал приймемо рівним нулю.

Гранична умова $x = 0$, сигнал подано на один трос. Запишемо цей випадок у формі добутків рядів Фур'є:

$$I_{i,j} = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m,n} - B_{m,n}) \beta_{m,n} (\cos(\mu_m(i-0,5)) \times \cos(\chi_n(j-0,5))) + \sum_{m=1}^{M-1} (A_m^M - B_m^M) \beta_m^M \cos(\mu_m(i-0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} (A_n^N - B_n^N) \beta_n^N (\chi_n(j-0,5)) + \frac{I}{MN} \quad (3)$$

Визначимо співвідношення поміж сталими величинами:

$$A_{m,n} - B_{m,n} = \frac{4}{MN\beta_{m,n}} \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_0 - 0,5)) \times \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_0 - 0,5)); \quad (4)$$

$$A_m^M - B_m^M = \frac{2}{M\beta_m^M} \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_0 - 0,5)); \quad (5)$$

$$A_n^N - B_n^N = \frac{2}{N\beta_n^N} \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_0 - 0,5)). \quad (6)$$

Коли закоротка на іншому кінці каната, то:

$$A_{m,n} e^{\beta_{m,n}L} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n}L} = 0 \quad (7)$$

$$A_m^M e^{\beta_m^M L} + B_m^M e^{-\beta_m^M L} = 0 \quad (8)$$

$$A_n^N e^{\beta_n^N L} + B_n^N e^{-\beta_n^N L} = 0 \quad (9)$$

Отримаємо значення після підстановки:

$$B_{m,n} = - \frac{4e^{\beta_{m,n}L} \cos(\chi_n(J - 0,5)) \cos(\mu_m(I - 0,5))}{M N (e^{\beta_{m,n}L} + e^{-\beta_{m,n}L}) \beta_{m,n}}; \quad (10)$$

$$B_m^M = - \frac{2e^{\beta_m^M L} \cos(\mu_m(I - 0,5))}{M (e^{\beta_m^M L} + e^{-\beta_m^M L}) \beta_m^M}; \quad (11)$$

$$B_n^N = - \frac{2e^{\beta_n^N L}}{N (e^{\beta_n^N L} + e^{-\beta_n^N L}) \beta_n^N} \cos(\chi_n(J - 0,5)); \quad (12)$$

$$A_{m,n} = \frac{4}{M N \beta_{m,n}} \cos(\chi_n(J - 0,5)) \cos(\mu_m(I - 0,5)) + B_{m,n}; \quad (13)$$

$$A_m^M = \frac{2}{M \beta_m^M} \cos(\mu_m(I - 0,5)) + B_m^M; \quad (14)$$

$$A_n^N = \frac{2}{N \beta_n^N} \cos(\chi_n(J - 0,5)) + B_n^N. \quad (15)$$

Знайдені вектори сталих дозволяють визначати розподіли потенціалів, струмів в тросах вантового каната без ушкоджень. Аналіз результатів показав, що схема зняття сигналу не суттєво впливає на розподіл потенціалів в перерізі $x = 0$. Подання різниці потенціалів на протилежні кінці тросів вантового каната, для створення рівного сигналу, треба підвести більшу різницю потенціалів. Відносна різниця значень підведених потенціалів залежить від кількості тросів гумотросового вантового каната. Вона збільшується зі зростан-

ням кількості тросів, та зі зростанням довжини канату та залежить від розташування тросу в перерізі. Для куттового вона більша ніж для середнього.

Аналіз отриманих результатів

Розрахунки розподілу струму та потенціалів для каната з характеристиками: $r = 0,1$ Ом/м, $q = 0,01$ м/Ом. Тросів в кожному ряду та кількість рядів приймали рівний семи, довжину ушкодження $L = 20$ м, $i = 1, j = 1$.

Виконано аналіз розрахунків при зміні довжини ушкодження та різної кількості тросів і рядів у вантовому канаті. Розподіл для випадків підведення струму до одного троса на рис. 2, для каната з ушкодженням тросом на рис. 3.

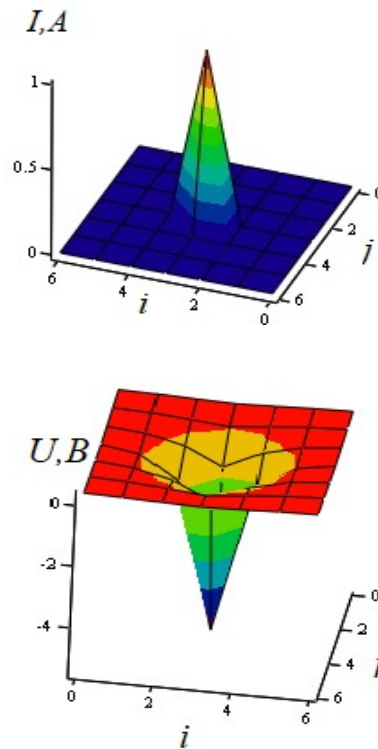


Рис. 2. Розподіл струму та потенціалів для електричного з'єднання з одним кінцем не ушкодженого троса

Для порівняння характеру зміни розподілу при різній довжині виконано розрахунки для $L = 50$ м (рис. 4).

Результати графіків дали змогу помітити зміни при різній довжині канату зняття сигналу для ушкодженого троса та не ушкодженого.

На рис. 5 зображено пряму для довжини канату від 1 м до 10 м не з ушкодженням тросом – УО та для каната з перерізом ушкодження троса – UE. Напряга збільшується при збільшенні довжини канату. Для не ушкодженого троса при 1 м максимальна напруга – 0.02 В, а для 10 м напруга – 0.201 В. Для каната з ушкодженням тросом при 1 м напруга 0.01 В, для 10 м – 0.1 В.

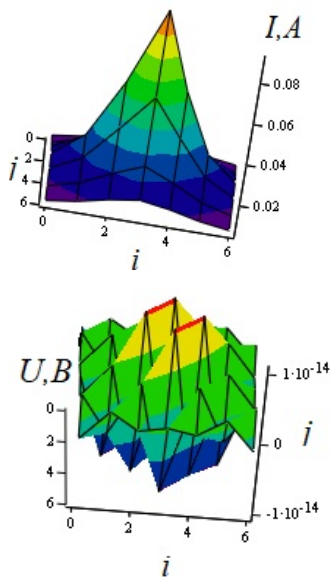


Рис. 3. Електричне з'єднання з одним кінцем ушкодженого троса: розподіл струму; розподіл потенціалів

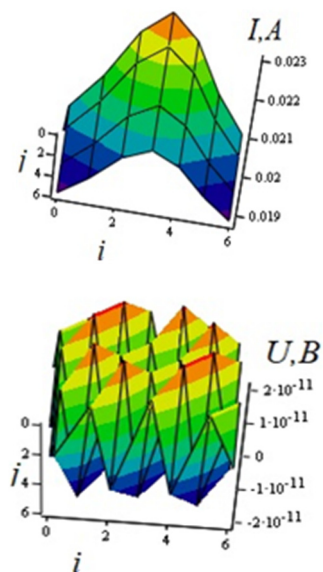


Рис. 4. Електричне з'єднання з одним кінцем ушкодженого троса: розподіл струму; розподіл потенціалів

На рис. 6 зображено результати для ушкодженого троса – UE та для не ушкодженого троса – U0. На графіку помітна гіперболічна залежність для канату без ушкодження. Для мінімальної довжини канату 10 м максимальне значення напруги – 0.201 В. Максимальна довжина канату для якої забезпечується контроль тросів 50 м при напрузі 0.367 В. З графіку видно що від довжини канату 50 м і до 100 м значення напруги не змінюється. Це свідчить про те, що точність контролю можливо забезпечити для довжини канату від 10 м і до

50 м, далі система враховує довжину, але відобразити параметри розрахунків напруги на моніторі не можливо за рахунок відсутності потужності комп'ютера. Для того, щоб система перевірила канат довжиною від 50 м і до 100 м необхідно прикласти струм у двох місцях. Отже, на відображеному графіку з'ясували, що при збільшенні довжини канату напруга подання на контроль тросів зростає.

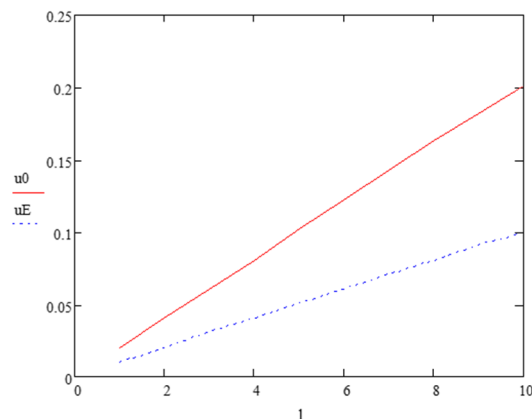


Рис. 5. Залежність напруги від мінімальної довжини канату

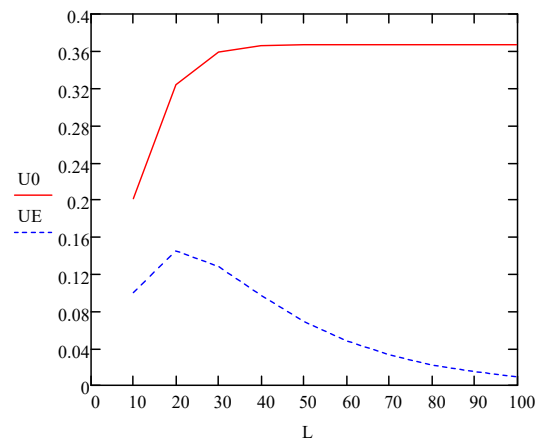


Рис. 6. Залежність допустимої напруги від довжини канату від 10 м до 100 м

Для випадку канату з ушкодженим тросом характер залежності графіка напруги UE до довжини 20 м зростає – 0.145 В, при поступовому збільшенні довжини залежність іде на спад до мінімальної позначки напруги 0.009 В для довжини канату 100 м. Для довжини 10 м значення напруги 0.1 В.

На рис. 7 представлені результати прикладення опору до троса для каната з довжиною від 1 м до 10 м та від 10 м до 100 м: 1 – не ушкоджений трос, 2 – пошкоджений трос при: $r = 0,1 \text{ Ом/м}$, $q = 0,0001 \text{ м/Ом}$. Розглядається випадок без ушкоджень.

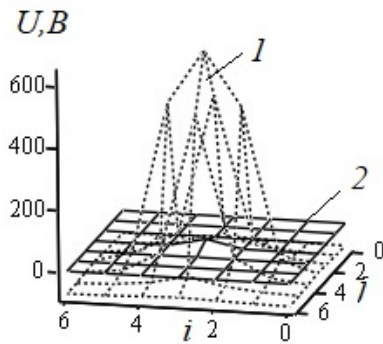


Рис. 7. Розподіл потенціалів в тросах довжиною 30 м

На рис. 8 відображені результати прикладення опору до троса для каната з різною довжиною, l – не ушкоджений трос, 2 – пошкоджений трос при: $r = 0,1$ Ом/м, $q = 0,0001$ м/Ом. Для випадку в перерізі ушкодження троса.

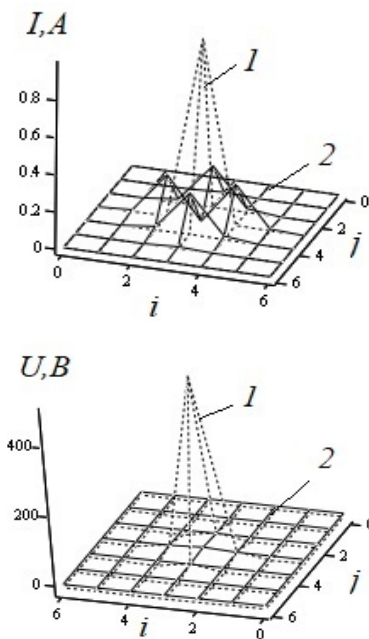


Рис. 8. Розподіл струму та потенціалів в тросах довжиною 10 м

На рис. 9 зображено залежність напруги від довжини канату від 10 м до 100 м для ушкодженого троса – UE1 та без ушкоджень – U01. Результати показників напруги для довжини канату від 1 м до 10 м збігаються із результатами на рис. 5.

З урахуванням отриманих графіків можна стверджувати, що система коригує відображення при виявленні пориву в різних рядах тросів та номерів тросів. Тобто система враховує зміни та демонструє це шляхом і розподілу в потрібному місті.

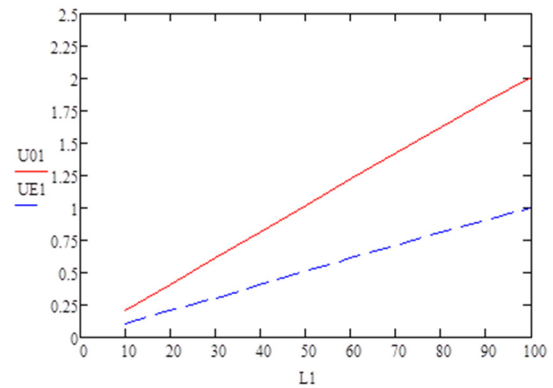


Рис. 9. Залежність напруги від довжини при електричній провідності – 0.0001 м/Ом

Подальші дослідження спрямовані для визначення розподілів для випадку підведення струму і зняття сигналу з двох тросів та для протилежних кінців канату.

Висновки

Відображені результати розподілу струму та потенціалів при різній довжині та іншому показникові електричної провідності, представлено характер залежності напруги від мінімальної довжини канату до максимальної. З'ясовано, що при прикладенні струму до троса без ушкоджень напруга зростає зі збільшенням довжини канату. При контролі канату з ушкодженим тросом характер залежності до довжини 30 м зростає, а потім показники напруги при збільшенні довжини спадають.

Результати при зміні значення електричної провідності продемонстрували збіжність значень для каната довжиною від 1 м до 10 м. Та невелику розбіжність значень для довжини канату від 10 м до 100 м. Характер залежності на рис. 8 визначено, пряма зростає. Для 10 м максимальна напруга 0.204 В не в ушкодженому тросі, для ушкодженого напруга 0.102 В. Канат довжиною 100 м необхідна напруга 2.009 В без ушкоджень та з ушкодженим тросом напруга – 0.998 В. Це дало змогу оцінити точність роботи системи та перевірити спроможність методу на проведення обстеження ушкоджень та для майбутнього програмування на основі отриманих розв'язків математичної моделі.

Максимальні значення напруги при прикладенні струму 1А до неушкодженого троса для довжини каната 10 м становило 0.201 В, для максимальної довжини канату 100 м значення напруги 0.367В. Випадок ушкодженого троса найвищий показник напруги 0.1 В для мінімальної довжини контролювання канату, показник потенціалу для довжини 100 м – 0.009 В. Виходячи з отриманих даних стверджуємо, що точність відображення показників контролю канату забезпечується до довжини 50 м, а далі результати не відобра-

жаються через відсутність необхідних системних характеристик, тому для забезпечення роботи системи необхідно враховувати цей момент. На максимальних довжинах перевірки канату прикладати електричний струм у тросах на двох відстанях для обстеження всієї довжини канату.

Проте для максимально ефективної діагностики необхідно врахувати наступні дослідження пов'язанні з аналізом прикладання опору до двох тросів вантового канату одразу.

References

- [1] D.L. Kolosov, "Justification of the parameters and designs of two-layer rubber rope conveyor belts for mining enterprises", Dis. Cand. technical Sciences: 05.05.06, Dnipropetrovsk, 2002.
- [2] A. Carbogno, "Bobbin drum hoists with fiat steel rubber-coated ropes", LOADO2001. Logistics & Transport, Zbornik - ADS Graphic, Koshice 2001, pp. 218–221.
- [3] A. Carbogno, V. Ropaj and V. Zajczenko, "Stan naprezen i odkształcen powloki gumowej liny wyrównawczej płaskiej na bebnie zawieszenia górniczego wyciągu szybowego", *Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie*. Praca zbiorowa. Ledziny, Polska, pp. 63–70, 2011.
- [4] I.V. Belmas, RTK durability control. Science - production, Higher education Kyiv, pp. 342–345, 1991.
- [5] I. Belmas and D. Kolosov, "The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding", *Technical and Geoinformational Systems in Mining*, Taylor & Francis Group, London, UK 2011 pp. 211–214. DOI: 10.1201/b11586-35
- [6] I.V. Belmas *et al.*, "Control of the condition of the cables of the rubber-cable traction body", *Enbectori University*, Karaganda technical Univ., No. 2, pp. 76–78, 2016.
- [7] V.A. Ropai *et al.*, Device for automatic control of the integrity of the balancing rope. Patent of Ukraine 9515A.B.V. No. 3. 30.09.96. patent owner
- [8] Yu.M. Konokh and I.V. Belmas, Device for monitoring the condition of a rubber cable rope Patent of Ukraine for utility model No. 27372. patent issuer Dniprodzerzhyn State Technical University.
- [9] L.V. Kolosov and I.V. Belmas, "Application of electrical models for the study of composite materials", *Mechanics of composite materials*, No. 1, pp. 115–119, 1981. DOI: 10.1007/BF00604895
- [10] I.V. Belmas *et al.*, "Control of rubber rope ropes", in *Proc. Scientific research - theory and experiment: the fourth international science and practice conf. Poltava*, Vol. 8, pp. 8–12, 2008.
- [11] I.V. Belmas *et al.*, "Electrical resistance of the rubber sheath of the rubber rope", *Sat. science tr. Kerch Maritime Technological University*. Mechanization of production processes of fish farming, industrial and agricultural enterprises, Vol. 8. pp. 89–62. 2007.
- [12] I.V. Belmas *et al.*, Development of a System for Continuous Automatic Monitoring of the Cable Rope Condition. Strength of Materials, Vol. 54, No. 5, pp. 825–840, 2022. DOI: 10.1007/s11223-022-00459-3

Ensuring the supply of current to one end of the cable with different wire rope parameters

I.V. Belmas, O.I. Bilous, G.I. Tancura, A.V. Svachka

Dnipro State Technical University, Kamianske, Ukraine

Issues. Structural cable monitoring systems are widely used to diagnose the condition of cable-stayed bridges. Known methods of non-destructive control of the stressed state cannot in some cases be fully used, or their use is difficult and economically impractical or inefficient.

The aim of the study. Fixing dangerous situations related to the loss of strength of ropes and early warning about the need to change them. With the help of the developed mathematical model, we previously analyzed the distribution of current and potentials. The obtained results are necessary for the implementation of further technical solutions that will ensure the reliability of the rope with many degrees of damage.

Method. The most convenient method for monitoring the mechanical parameters of cable ropes is the electrical resistance method.

The results. The results of the dependence of the stress and current distribution on the rope parameters are presented. The researched method will increase the reliability, safety and service life of cable-stayed bridges.

Scientific novelty. The work consists in studying the impact of breaking the cables that make up cable ropes. For this, a model was created that allows you to combine several parameters (specific resistance and electrical conductivity, length, number of cables). We have considered the case for removing the signal from one end of the cable and found that with a gradual increase in the length of the rope, the voltage on the graph begins to increase for the undamaged and damaged cable. The results of the maximum tension indicators for the length of the rope from 1 m to 10 m and from 10 m to 100 m are presented.

Practical significance. The automatic cable break detection system with the function of determining the place of damage allows in automatic mode during the operation of a lifting machine equipped with a flat rubber rope to monitor the technical condition of the cables vulcanized in a rubber shell and to stop the machine in the event of a break of any cable. In this way, the system that monitors the cables in turn notifies about the presence of destruction and makes it possible to prevent further accidents.

Keywords: electrical resistance, control, wire rope, cable, mathematical model, impulse.