

© І.В. Бельмас¹, О.І. Білоус¹, Г.І. Танцура¹, А.В. Швачка¹

¹ Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

АНАЛІЗ РОБОТИ СХЕМИ ПІДВЕДЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ ДО ТРОСА У БАГАТОШАРОВОМУ ВАНТОВОМУ КАНАТІ

© I. Belmas¹, O. Bilous¹, G. Tancura¹, A. Shvachka¹

¹ Dniprovskiy State Technical University, Kamyanske, Ukraine

ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE ELECTRICAL CURRENT SUPPLY SCHEME TO TWO CABLES OF A MULTILAYER WIRE ROPE

Мета. Регулярна перевірка канатів на вантових мостах є ключем до забезпечення безпеки життя людей. Однак сигнали виявлення зазвичай ускладнюються через переплетені структури тросів, які змушують змішувати сигнал дефекту каната і сигнал пасма. Для забезпечення робото-спроможності вантового каната необхідно регулярно перевіряти цілісність тросів.

Методика дослідження. У роботі використовуються аналітичні методи спостережень та математико-статистичної обробки даних; системного аналізу при розробці критеріїв оцінки фактичного технічного стану вантових канатів; метод математичного моделювання при розробці прогностичних моделей обривів троса.

Результати дослідження. В роботі проаналізовано систему контролю вантового каната при зміні параметрів довжин прикладання електричного струму до двох тросів, та відображено характер розподілу при зміні номера ушкодженого троса на інший. Отримані результати демонструють необхідність застосування цього способу підведення, бо система чітко спрацьовує при різних випадках.

Наукова новизна. 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 зупиняти машину у разі пориву будь-якого троса.

Зміна електричної напруги поміж кінцями ушкодженого троса залежить від довжини канату так: при довжині каната 10 м – різниця потенціалів не перевищує 7В, а при 100 м – 10^6 , при 300 м – 10^{15} пропорційно залежить кореню квадрату і здобутку електричного опору троса та питомої провідності гумових прошарків канату.

Практичне значення. Впровадження автоматичної системи контролю дасть змогу оперативно приймати рішення спрямовані на ліквідацію ушкодження плоских одношарових та вантових багатошарових канатів, зупиняти «розвиток» ушкоджень, зменшити витрати часу на відновлення робочого стану підйомної машини, а головне - підняти її надійність та безпеку її експлуатації.

Ключові слова: вантовий канат, обрив, діагностика, троси, електричний опір.

Актуальність. Розвиток і застосування комп'ютерів відкрили нові і практично необмежені можливості для точного вирішення цих дуже статично невизначених систем і для точного статичного аналізу їх тривимірної продуктивності. Це призводить до економічних переваг, які можуть сприяти створенню вантових мостів у вільних прольотах до 1000 м.

Мости піддаються набагато суворішим умовам, ніж будівлі, через прямий вплив несприятливих умов навколишнього середовища, таких як повені, негоди, урагани тощо, а також динамічних навантажень, таких як землетруси, транспортні навантаження та удари. Отже, мости, особливо мости з великим прольотом, як правило, більш вразливі до руйнування у випадку локалізованого розірвання тросів.

На сьогоднішній день відомі випадки, коли сильний вітер впливає на стан канатів і через обриви значної кількості тросів відбулися техногенні колапси руйнівального характеру. Такі як: автомобіст Генуї в Італії 2018, міст Чияяра в Колумбії у січні 2018 та обвал моста в Індії у жовтні 2022 року

Аналіз досліджень.

Дослідженням у галузі роботи вантових елементів присвячені роботи Л. Г. Дмитрієва [1], М. М. Корнєєва [2].

Застосування канату не круглого, наприклад, еліптичного або близького до нього перерізу 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. Конструкція канату з двошаровим розташуванням тросів обґрунтована в роботі [3].

В [4] запропоновано визначати напружено-деформований стан композита з паралельних тягових елементів методом електричного моделювання, а в [5–8] обґрунтовані доцільність та можливість контролю поривів тросів гумотросових канатів та стрічок на основі зміни електричного опору визначеного поміж кінцями пари тросів. У [9, 10] запропоновані технічні рішення з контролю поривів тросів гумотросових канатів та стрічок. В [11] розроблено алгоритм визначення впливу форми перерізу еластичного матеріалу поміж тросами на величину його електричного опору.

Шляхом теоретичних та математичних дій було розроблені математичні моделі розподілу потенціалів та струму для тросів вантового канату [12].

Встановлення невирішених проблем. Остаточного способу застосування методу не затверджено, через відсутність достовірних результатів щодо довжини на якій треба відстежувати розриви.

Постановка задачі. Розглядається можливість застосування способу підведення напружень до одного троса для діагностування стану вантового багатошарового канату через протилежні кінці.

Основний матеріал. Нехай, канат довжиною L складається з тросів розташованих в N рядах по 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. В роботі [3] розроблено алгоритм визначення електричного опору поміж довільними тросами.

Канат без ушкоджень. Будемо вважати, що до кінця тросу, позначеного як K_0, J_0 , в перерізі $x = 0$ підведено електричний сигнал в 1А. Відзначимо, значення індексів в номерах тросів для зручності відповідають координаті перерізу

для якого вони розглядаються. Сигнал з протилежного кінця може зніматися за різноманітними схемами. Крайніми схемами є схема зняття сигналу з одного троса та схема зняття сигналів з усіх тросів з'єднаних (електрично) в один вузол. Їх потенціал прийемо рівним нулю.

В обох випадках в перерізі $x = 0$ сигнал подано на один трос. Запишемо прийняте у формі граничних умов.

$$\text{Коли } x=0 \quad I_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & i = K_0 \wedge j = J_0 \\ 0 & i \neq K_0 \wedge j \neq J_0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Гранична умова становить собою розривну δ – функцію Дірака на дискретних осях номерів рідів та номерів тросів в рядах на інтервалах M та N . Задаємо δ – функцію Дірака добутком рядів Фур'є.

$$\begin{aligned} I_{i,j} = & \frac{4}{MN} \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_0 - 0,5)) \cos(\chi_n(j - 0,5)) \times \\ & \times \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_0 - 0,5)) \cos(\mu_m(i - 0,5)) + \\ & \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_0 - 0,5)) \cos(\chi_n(j - 0,5)) + \\ & + \frac{2}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_0 - 0,5)) \cos(\mu_m(i - 0,5)) + \frac{1}{MN}, \\ & (1 \leq i \leq M), (1 \leq j \leq N). \end{aligned} \quad (2)$$

Більш простою схемою можна вважати схему за якої кінці усіх тросів електрично з'єднані. Відповідно, потенціал точки з'єднання можна вважати рівним нулю.

$$\text{Коли } x=L \quad U_{i,j} = 0. \quad (3)$$

Відповідно до умови (3) прирівняємо нулю значення потенціалів в перерізі $x=L$.

$$A_{m,n} e^{\beta_{m,n}L} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n}L} = 0; \quad (4)$$

$$A_m^M e^{\beta_m^M L} + B_m^M e^{-\beta_m^M L} = 0; \quad (5)$$

$$A_n^N e^{\beta_n^N L} + B_n^N e^{-\beta_n^N L} = 0. \quad (6)$$

З виразів (5) – (6) маємо.

$$B_{m,n} = - \frac{4e^{\beta_{m,n}L} \cos(\chi_n(J - 0,5)) \cos(\mu_m(K - 0,5))}{M N (e^{\beta_{m,n}L} + e^{-\beta_{m,n}L}) \beta_{m,n}}; \quad (7)$$

$$B_m^M = -\frac{2e^{\beta_m^M L} \cos(\mu_m(K-0,5))}{M(e^{\beta_m^M L} + e^{-\beta_m^M L})\beta_m^M}; \quad (8)$$

$$B_n^N = -\frac{2e^{\beta_n^N L} \cos(\chi_n(J-0,5))}{N(e^{\beta_n^N L} + e^{-\beta_n^N L})\beta_n^N}; \quad (9)$$

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

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

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

Знайдені вектори сталих дозволяють визначати розподіли потенціалів, струмів в тросах вантового канату 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 канату, для створення рівного сигналу, треба підвести більшу різницю потенціалів. Відносна різниця значень підведених потенціалів залежить від кількості тросів гумотросового вантового канату. Вона збільшується зі зростанням кількості тросів, та зі зростанням довжини канату та залежить від розташування тросу в перерізі. Для кутового вона більша ніж для середнього.

Вантовий гумотросовий канат з ушкодженим тросом. Умовно в перерізі $x = \xi$ розділимо канат на дві частини. Частинам надаємо номери один та два. Номери частин введемо до складу нижніх індексів позначень електричних параметрів та коефіцієнтів у виразах для їх визначення. В перерізі $x = 0$ граничні умови (1) незмінні. Вказане дозволяє використати вирази для співвідношень невідомих сталих величин та записати їх як для першої частини канату в наступних формах.

$$A_{m,n,1} - B_{m,n,1} = \frac{4}{M N \beta_{m,n}} \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_0 - 0,5)) \times \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_0 - 0,5)); \quad (13)$$

$$A_{m,1}^M - B_{m,1}^M = \frac{2}{M \beta_m^M} \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_0 - 0,5)); \quad (14)$$

$$A_{n,1}^N - B_{n,1}^N = \frac{2}{N \beta_n^N} \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_0 - 0,5)). \quad (15)$$

В перерізі розриву троса за номером K_ξ , розташованому у ряді за номером J_ξ , мають виконуватися наступні умови:

$$\text{Коли} \quad x = \zeta \quad I_{i,j,1} = I_{i,j,2}, \quad (16)$$

$$I_{K_L, J_L} = 0, \quad (17)$$

$$U_{i,j,2} - U_{i,j,1} = u \begin{pmatrix} 1 & i = K_\xi \wedge j = J_\xi \\ 0 & i \neq K_\xi \vee j \neq J_\xi \end{pmatrix}, \quad (18)$$

де u – невідома величина різниці потенціалів поміж кінцями ушкодженого троса в перерізі його розриву.

З умови (18) знайдемо наступні співвідношення.

$$\begin{aligned} & A_{m,n,2} - A_{m,n,1} + (B_{m,n,2} - B_{m,n,1}) e^{-2\beta_{m,n}\xi} = \\ & = \frac{4u}{M N e^{\beta_{m,n}\xi}} \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_\xi - 0,5)) \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_\xi - 0,5)); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & A_{m,2}^M - A_{m,1}^M + (B_{m,2}^M - B_{m,1}^M) e^{-2\beta_m^M \xi} = \frac{2u}{M e^{\beta_m^M \xi}} \times \\ & \times \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m(K_\xi - 0,5)); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & A_{n,2}^N - A_{n,1}^N + (B_{n,2}^N - B_{n,1}^N) e^{-2\beta_n^N \xi} = \frac{2u}{N e^{\beta_n^N \xi}} \times \\ & \times \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\chi_n(J_\xi - 0,5)). \end{aligned} \quad (21)$$

Отримаємо наступні співвідношення.

$$A_{m,n,2} + A_{m,n,1} - (B_{m,n,2} - B_{m,n,1}) e^{-2\beta_{m,n}\xi} = 0; \quad (22)$$

$$A_{m,2}^M + A_{m,1}^M - (B_{m,2}^M - B_{m,1}^M) e^{-2\beta_m^M \xi} = 0; \quad (23)$$

$$A_{n,2}^N + A_{n,1}^N - (B_{n,2}^N - B_{n,1}^N) e^{-2\beta_n^N \xi} = 0. \quad (24)$$

Співвідношення (13) - (15), (19) – (20), (22) – (24) визначають взаємну залежність складових трьох груп векторів. До кожної з цих груп входять по чотири таких вектори. Сформулюємо ще три вирази взаємної залежності векторів сталих у виразах струмів та потенціалів. Їх побудуємо з умови характеру підведення струму до кінців канату в перерізі $x = L$.

Отримані вирази дозволяють визначати розподіли струмів та потенціалів поміж тросами канату як функції невідомої величини різниці потенціалів поміж кінцями ушкодженого троса в перерізі його розриву. З умови рівності нулю струму поміж вказаними кінцями (17) знайдемо значення невідомої різниці потенціалів.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_{m,n,2} e^{\beta_{m,n} \xi} - B_{m,n,2} e^{-\beta_{m,n} \xi} \right) \beta_{m,n} \psi(m, K_{\xi}) \omega(n, J_{\xi}) + \\
 & \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_{m,2}^M e^{\beta_m^M \xi} - B_{m,2}^M e^{-\beta_m^M \xi} \right) \beta_m^M \psi(m, K_{\xi}) \\
 & + \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_{n,2}^N e^{\beta_n^N \xi} - B_{n,2}^N e^{-\beta_n^N \xi} \right) \beta_n^N \omega(n, J_{\xi}) + \frac{1}{M N} \\
 u = & - \frac{\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_{u,m,n,2} e^{\beta_{m,n} \xi} - B_{u,m,n,2} e^{-\beta_{m,n} \xi} \right) \beta_{m,n} \psi(m, K_{\xi}) \omega(n, J_{\xi}) +}{\sum_{m=1}^{M-1} \left(A_{u,m,2}^M e^{\beta_m^M \xi} - B_{u,m,2}^M e^{-\beta_m^M \xi} \right) \beta_m^M \psi(m, K_{\xi}) +} \\
 & + \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_{u,n,2}^N e^{\beta_n^N \xi} - B_{u,n,2}^N e^{-\beta_n^N \xi} \right) \beta_n^N \omega(n, J_{\xi})
 \end{aligned} \tag{25}$$

де $\psi(m, i) = \cos(\mu_m(i-0,5))$; $\omega(n, j) = \cos(\chi_n(j-0,5))$.

Знайдені величини різниці потенціалів дозволяють визначати шукані розподіли струмів та потенціалів.

Розрахунки розподілу струму та потенціалів для каната з характеристиками: $r = 0,1 \text{ Ом/м}$, $q = 0,01 \text{ м/Ом}$ здійснювали за наведеною методикою [12]. Приймали рядів у шарі $N = 7$ та позначили -1 , кількість тросів в шарі $M = 7 - 2$ шар.

Виконано аналіз розрахунків при зміні довжини прикладання сигналу до не ушкодженого та з ушкодженим тросом. Для випадка двошарового каната, коли підведено струми та потенціали до одного троса на протилежні кінці каната (рис. 1).

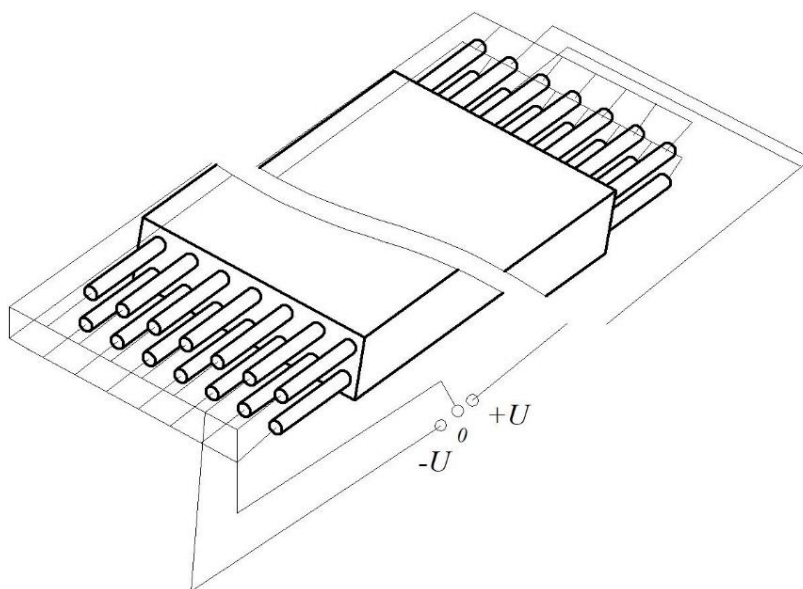


Рис. 1. Схема підведення напруги у двошаровому канаті

Результати при зміні довжини зняття потенціалів в не ушкодженому тросі (рис. 2–5).

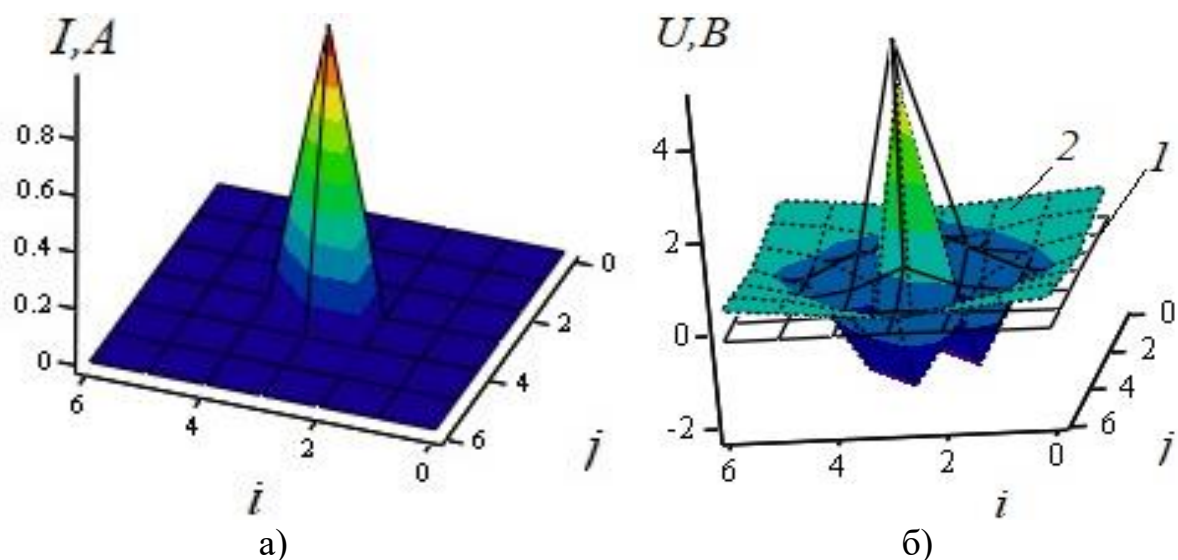


Рис. 2. Розподіл струму і потенціалів в тросах довжиною 10 м

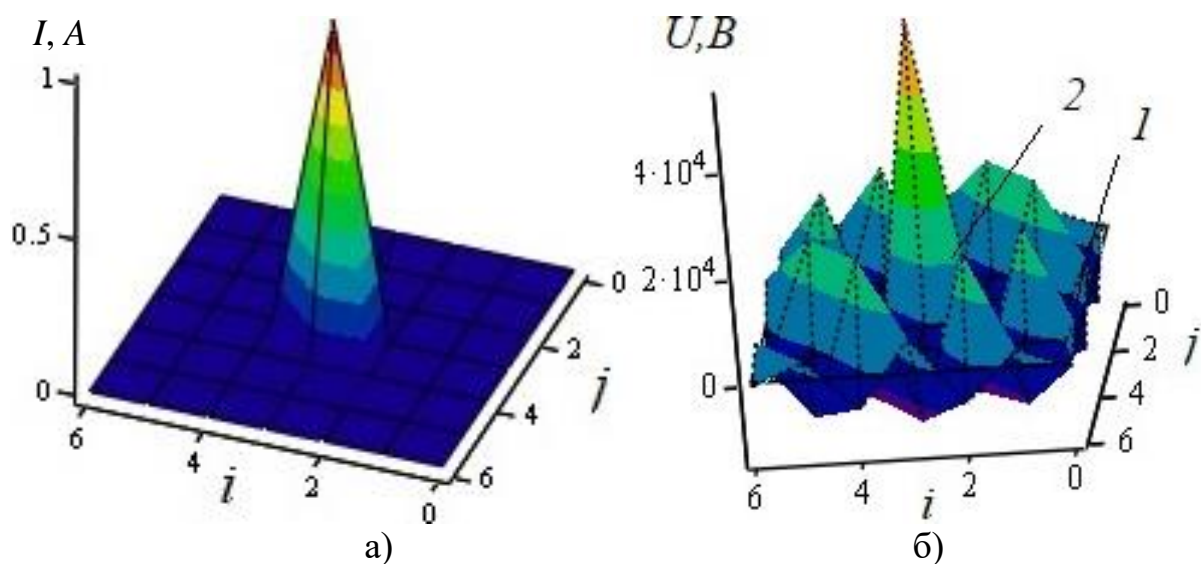


Рис. 3. Розподіл струму і потенціалів в тросах довжиною 100 м

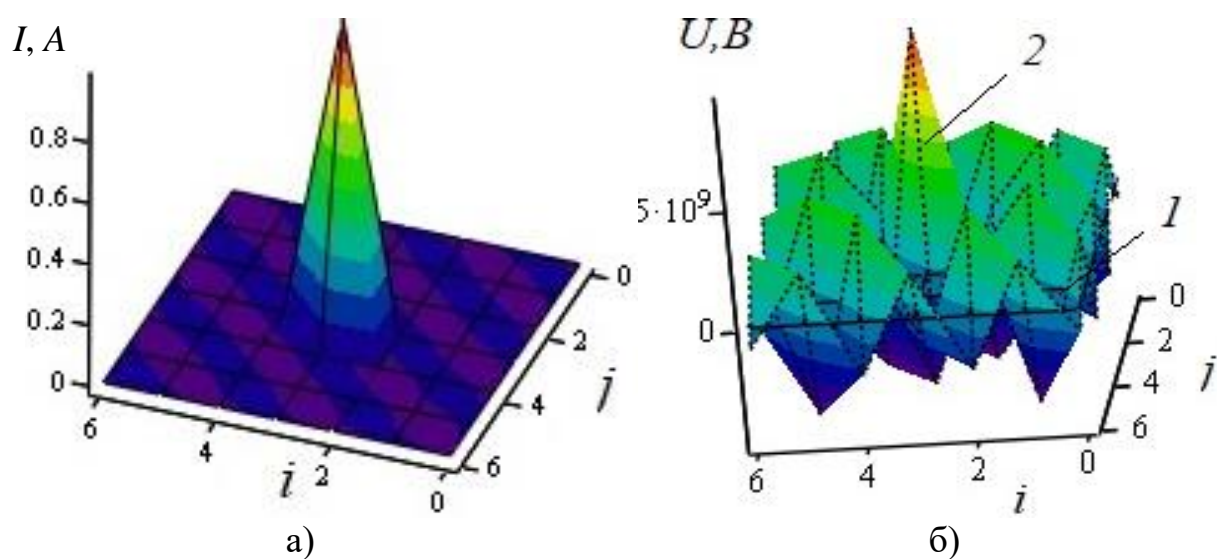


Рис. 4. Розподіл потенціалів в тросах довжиною 200 м

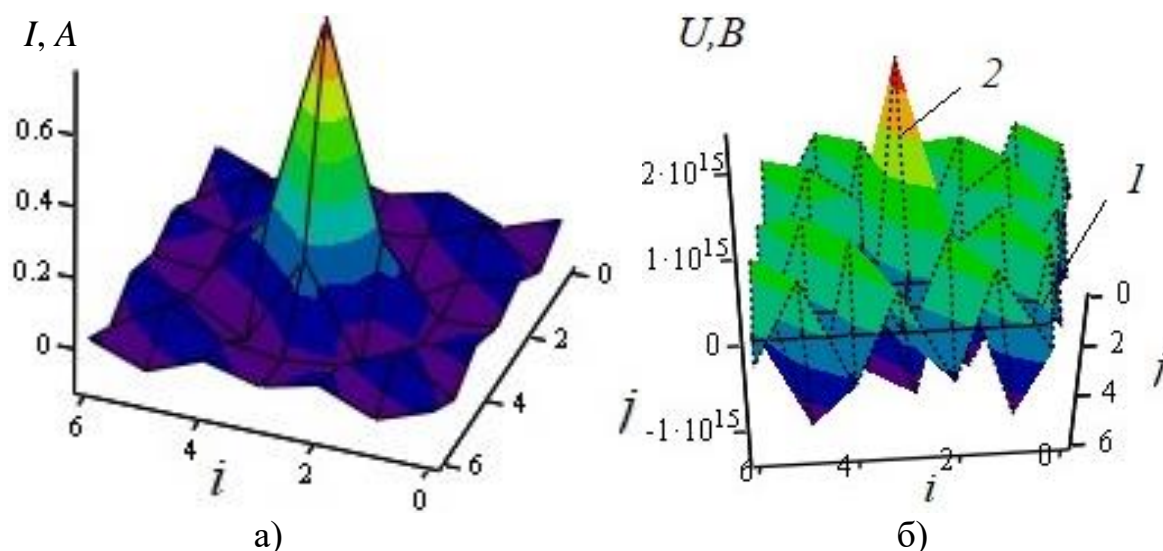


Рис. 5. Розподіл струму і потенціалів в тросах довжиною 300 м

На рис. 2 а), б) – рис. 5 а), б) помітно лінійну залежність від зміни довжини з 10 м до 300 м зняття сигналу. На графіку переміщень рис. 6 а) розподіл струму відображений зміною структури поверхні.

Результати при зміні довжини зняття струму та потенціалів для перерізу ушкодженого троса.

Зображені результати на рис. 6 – рис. 9 для ушкодженого троса відображаються на графіках суттєву зміну при збільшеній довжині з 10 м до 100 м. Графіки переміщень для довжини зняття 100 м – 300 м зміни на графіках не значні.

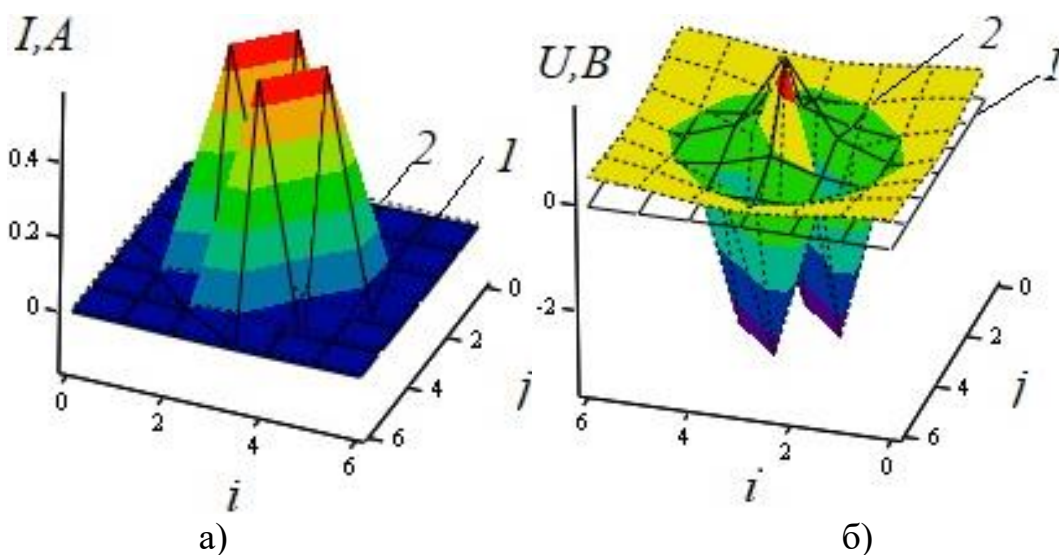


Рис. 6. Розподіл струму та потенціалів в тросах довжиною 10 м

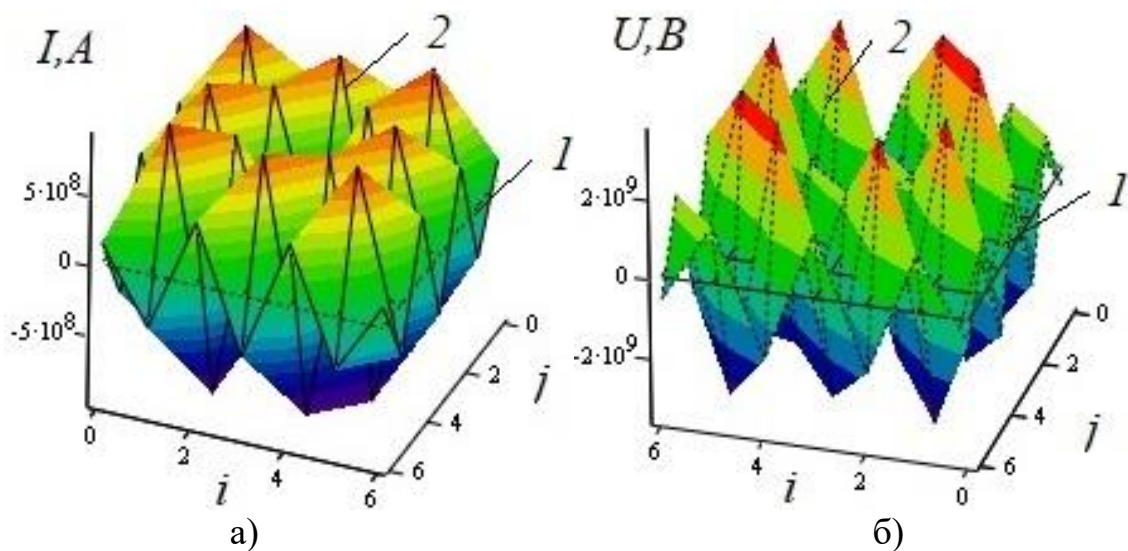


Рис. 7. Розподіл струму та потенціалів в тресах довжиною 100 м

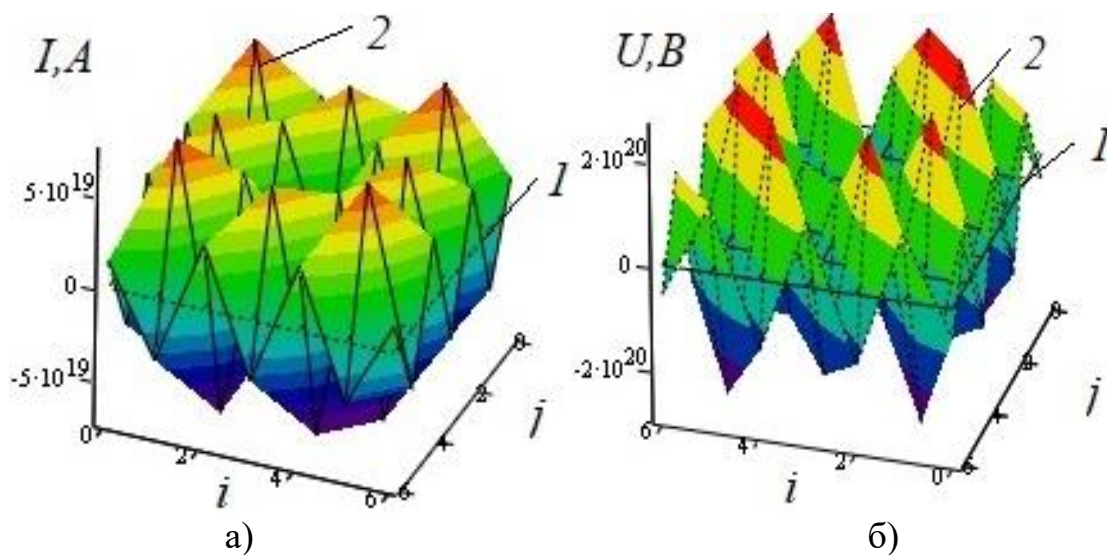


Рис. 8. Розподіл струму та потенціалів в тресах довжиною 200 м

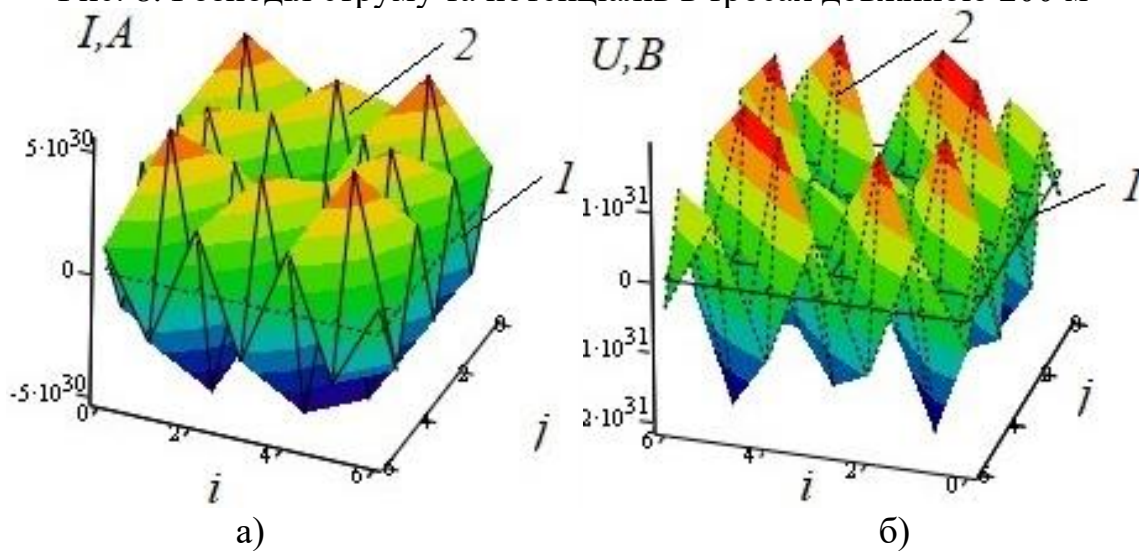


Рис. 9. Розподіл струму та потенціалів в тресах довжиною 300 м

Висновки. Проаналізовано спосіб підведення струму та потенціалів до протилежних кінців троса не ушкодженого троса. Для проектування системи контролю вантових багатошарових канатів необхідно враховувати випадки при знятті сигналів з місць підведення електричного струму до тросів.

За отриманими результатами видно, що довжина ушкодження, має вплив на розподіли від місця підведення. Зняття опору з протилежних кінців характеризують графіки розподілу потенціалів та струму в тросах для різної довжини.

Даний спосіб діагностування є ефективним для зняття з одного кінця троса у багатошаровому канаті. Спосіб забезпечує більшу інформативність та це показано візуалізацією змін на поверхнях існуючих графіках, що свідчать про точність отриманих значень.

Перелік посилань

1. Дмитрієв, Л. Г. (1974). *Вантові покриття*. Буревістник.
2. Корнеев, М. М. (2003). *Стальні мости: теоретичні та практичне посібник по проектуванню*. Київ.
3. Колосов, Д.Л. (2002). *Обґрунтування параметрів та конструкцій двошарових гумотросових конвеєрних стрічок для гірничих підприємств*. Дніпропетровськ.
4. Колосов, Л.В., & Бельмас, И.В. (1981). Применение электрических моделей для исследования композитных материалов. *Механика композитных материалов*, 1, 115-119.
5. Бельмас, И.В. (1991). *Контроль прочности РТК*. Наука – производству.
6. Бельмас, И.В., (1990). Контроль потери тяговой способности резиновтросовой ленты конвейерного транспортера». *Горная электромеханика и автоматика*, 57.
7. Бельмас, И.В., Данияров, Н. А., & Танцура, Г.И. (2016). Контроль состояния тросов резиновтросового тягового органа. *Университет еңбектері. Карагандинск. техн. ун.*, 2, 76-78.
8. Бельмас, И.В., Білоус, О.І., Нельга, А.Т., & Бельмас, О.Л. (2008). Контроль тросів гумотросового канату. *Наукові дослідження – теорія та експеримент: Матеріали четвертої міжн. наук.-практ. конф. Полтава*, 8, 8-12.
9. Колосов, Л.В. Шидо, Н.Г. Ропай, В.А., Бельмас, И.В., & Сергієнко, О.В. (1996). *Пристрій автома-тичного контролю цілісності зрівноважувального канату*. (Патент України 9515А .Б.В. №3. 30.09.96).
10. Конох. Ю.М., & Бельмас И.В., (2007). *Пристрій для контролю за станом гумотросового канату* (Патент України на корисну модель № 27372).
11. Бельмас, И.В. (2007). Электрический опір гумової оболонки гумотросового канату. *Сб. науч. тр. Керченского морского технологического университета. Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий*, 8, 89-62.
12. Belmas, I.V., Bilous, O., Tantsura, H., & Shvachka, A. (2022). Development of a System for Continuous Automatic Monitoring of the Cable Rope Condition. *Strength of Materials*, 5(54), 825-840.

<https://doi.org/10.1007/s11223-022-00459-3>

ABSTRACT

Purpose. Regular inspection of cables on cable-stayed bridges is key to ensuring the safety of people's lives. However, the detection signals are usually complicated by the interwoven structures of the ropes, which cause the rope defect signal and the strand signal to be mixed. To ensure the working capacity of the wire rope, it is necessary to regularly check the integrity of the cables.

Research methodology. Analytical methods of observations and mathematical and statistical data processing are used in the work; system analysis when developing criteria for assessing the actual

technical condition of wire ropes; the method of mathematical modeling in the development of prognostic models of cable breaks.

Research results. The paper analyzes the cable rope control system when changing the parameters of the lengths of the electric current applied to two cables, and shows the nature of the distribution when the number of the damaged cable is changed to another. The obtained results demonstrate the necessity of using this method of input, because the system clearly works in different cases.

Scientific novelty. 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.

The change in the electric voltage between the ends of the twisted cable depends on the length of the rope as follows: with a rope length of 10 m - the potential difference does not exceed 7V, and at 100 m - 10^6 , at 300 m - 10^{15} proportionally depends on the square root and the product of the electrical resistance of the cable and the specific conductivity of rubber layers of rope.

Practical value. The introduction of an automatic control system will make it possible to quickly make decisions aimed at eliminating damage to flat single-layer and cable-stayed multi-layer ropes, stop the "development" of damage, reduce time spent on restoring the working condition of the lifting machine, and most importantly - increase its reliability and safety of operation.

Keywords: *wire rope, precipice, diagnostics, ropes, electrical resistance.*