БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.191 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).213-219

А.С. Лапченко, старш. наук. співр., канд. техн. наук
Національний транспортний університет, м. Київ, Україна
e-mail: las83@ukr.net

Підбір параметрів послідовно-паралельної електродетонаторної мережі при проходженні тунелів

У статті встановлені та побудовані залежності сили струму в магістральному провіднику та детонаторах електропровідної мережі від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 220 В та 380 В. Наведено залежності загального опору електропровідної мережі в залежності від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу жили магістрального провідника при застосуванні одного виду з'єднувальних дротів.

алюміній, детонатор, мідь, опір дротів, оцинкована сталь, послідовно-паралельна електродетонаторна мережа, сила струму, тунель

Постановка проблеми. В процесі трасування залізничних і автодорожніх шляхів можуть виникати різні перешкоди, які долаються за допомогою тунелів [1]. Незважаючи на розвиток механізованих методів виїмки, буровибуховий спосіб залишається найпоширенішим методом проходки тунелів у твердих породах завдяки своїй універсальності та економічній ефективності. Крім того, в залежності від міцності твердої породи може не знадобитись тунельна оправа або частина її елементів [1], які можуть виконуватись з специфічних видів цементобетону [2, 3], як результат значна економія. Водночас вибухові роботи супроводжуються такими проблемами, як [4-6]: надмірні коливання ґрунту, недобори і перебори гірської породи, розліт уламків та пошкодження навколишнього масиву порід. Ці явища значною мірою залежать від системи ініціювання. Тому вибір відповідної електричної мережі детонаторів є ключовим чинником досягнення ефективних і керованих тунельних вибухових робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У тунельних вибухових роботах електричні мережі детонаторів зазвичай виконуються за послідовною, паралельною або комбінованою схемою [5, 7-9]. Кожна схема має свої переваги і недоліки. Перевагами послідовного з'єднання слугують [5, 7]: можливість застосування підривних машинок, легкість діагностики його справності, простота приєднання і відносна легкість монтажу. Недолік – при виході з ладу бодай одного електродетонатору спостерігається відмова всього послідовного з'єднання [5, 7]. Недоліки всіх різновидів паралельних схем: складність, інколи неможливість діагностики цілісності електричної мережі спеціальним вимірювальним обладнанням; заплутаність приєднання і складність монтажу [5, 8]. При комбінованій схемі з'єднання недоліком слугує застосування лише при великій кількості електродетонаторів [5, 7, 8]. Крім переваг і недоліків кожної з схем електричної мережі детонаторів існують певні обмеження і рекомендації до застосування кожної з них: зазвичай, змішані схеми під'єднуються до освітлювальної або силової електричної мережі змінної напруги 220 В чи 380 В [5, 8, 9]; для всіх схем з метою проведення безвідмовного вибуху потрібно забезпечити силу струму рівною або

© А. С. Лапченко, 2026

більше ніж гарантійний, величина якого повинна становити не менше 2,5 А при підриванні змінним струмом [5, 9]. При електропідриванні для передачі струму від джерела до електродетонаторів застосовують різні види дротів з потрібними характеристиками: матеріалом жили дроту [9], певною площею поперечного перерізу [5, 9], видом ізоляції жили дроту [9] та призначенням дроту [5, 7-9].

Компанування магістральних, з'єднувальних та інших дротів з різним матеріалом жили та її площею поперечного перерізу за різної кількості детонаторів з одночасним застосуванням певної схеми може давати безліч різних варіантів. Для конкретного потрібного варіанту розраховуються опір дротів і електродетонаторів, а також визначають силу струму в магістральних дротах та детонаторах. Потім перевіряється забезпечення у відповідності до гарантійного струму. Перевірка кожного разу певного варіанту електричної мережі детонаторів з їх коригуванням може вимагати певного часу в розрахунках і може бути доволі громіздкою справою. Побудова типових залежностей розрахункового опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах та детонаторах від параметрів дротів і їх довжини при потрібній кількості детонаторів значно спростила б процес підбору параметрів дроту. Також навпаки, за відомими параметрами дротів електродетонаторної мережі можна швидко знайти опір електричної мережі та силу струму. На сьогоднішній момент відсутні побудовані типові залежності фізичних величин послідовно-паралельної електродетонаторної мережі від її параметрів при проходженні тунелів.

Постановка завдання. Отримання та побудова розрахункового опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах та детонаторах при послідовно-паралельному з'єднанні від параметрів дротів і їх довжини при проходженні тунелів.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв'язати такі завдання: огляд актуальних досліджень і наукової літератури; розрахунок та побудова залежностей фізичних величин послідовно-паралельної електродетонаторної мережі від її параметрів при проходженні тунелів; аналіз побудованих залежностей та встановлення можливості застосування певних видів дротів при проходженні тунелів потрібної довжини.

Виклад основного матеріалу. При розрахунках послідовно-паралельної електропровідної мережі для ведення вибухових робіт при розробці тунелю проведено аналіз на основі поєднання магістральних, з'єднувальних та детонаторних дротів, при цьому в тунелебудуванні під з'єднувальними треба розуміти об'єднання вивідних, дільничних, кінцевих і сполучних дротів. До того ж, більшість з цих перелічених з'єднувальних дротів в тунелебудуванні не застосовується при застосуванні інших схем підключення крім послідовно-паралельної електродетонаторної мережі. Вибір послідовно-паралельної схеми з'єднання обумовлено великою кількістю електродетонаторів та можливістю приєднатись до освітлювальної чи силової електромережі напругою 220 В чи 380 В, що зазначено в [5, 8, 9]. Для розрахунку електричної мережі було прийнято 140 детонаторів, як усереднене значення потрібної кількості при проходженні залізничних та автомобільно-дорожніх тунелів суцільних вибоєм за одну заходку. Для розрахунку використовували дроти з наступних матеріалів жили: мідь, алюміній, оцинкована сталь. Площі поперечних перерізів жил магістральних провідників становили: оцинкована сталь – 1,1 мм^2, мідь – 0,75-10 мм^2, алюміній – 2,5-10 мм^2. Вибір типорозміру магістрального провідника був обумовлений номенклатурою випуску вітчизняними та закордонними виробниками. Розрахунок опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах та

детонаторах проведено на основі відомих фізичних формул згідно з [10]. На рис. 1 наведено залежність загального опору електропровідної мережі в залежності від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу жили магістрального провідника при застосуванні одного виду мідних з'єднувальних дротів з площею поперечного перерізу жили 0,5 мм^2 та одного виду детонаторного мідного проводу з площею поперечного перерізу жили 0,2 мм^2. Застосування такого виду з'єднувальних і детонаторних дротів обумовлено найбільшою їх розповсюдженістю у вітчизняних і закордонних виробників з одночасно мінімально допустимою витратою матеріалу жили дроту.

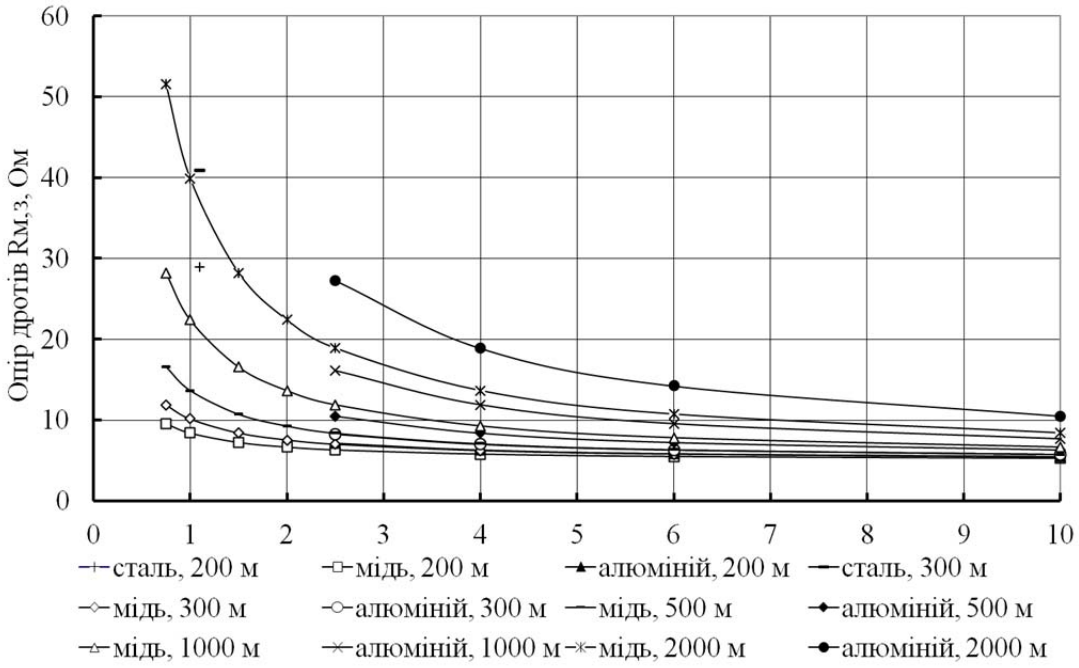


Рисунок 1 – Залежність загального опору електропровідної мережі в залежності від параметрів магістрального провідника

Джерело: розроблено автором

Отриманий загальний опір електропровідної мережі збільшується при переході матеріалу жили від міді до алюмінію і потім сталі, а також при збільшенні довжини дротів і зменшенні площі поперечного перерізу жили, що повністю узгоджується з закономірностями фізичних явищ.

На рис. 2 та рис. 3 наведено залежності величини сили струму в магістральному провіднику послідовно-паралельної електропровідної мережі детонаторів при проходженні тунелів від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу його жили за напруги 380 В та 220 В, відповідно. Характеристики з'єднувальних та детонаторних дротів в цьому випадку такі ж як і при визначенні опору дротів.

Величина сили струму в мережі зменшується при: переході жили проводу від міді до алюмінію і сталі або зменшенні її поперечного перерізу; збільшенні довжини дротів та збільшенні кількості детонаторів. Такі процеси повністю узгоджуються з загально-фізичними явищами.

Зменшення змінної напруги з 380 В до 220 В закономірно призводить до зменшення сили струму в магістральному провіднику. Мідна та алюмінієва жили повністю забезпечують гарантійний струм, величина якого повинна становити не менше 2,5 А, не залежно від величини змінної напруги, досліджуваної довжини магістрального провідника від 200 м до 2000 м та навіть при мінімально допустимій

площі поперечного перерізу: 0,75 мм^2 для міді та 2,5 мм^2 для алюмінію. Лише оцинкована сталь за поперечного перерізу в 1,1 мм^2 не здатна забезпечити гарантований струм при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 2000 м і більше та напрузі 380 В (ці дані не винесені на графічне зображення рис. 2 та рис. 3 через інше потрібне масштабування шкал).

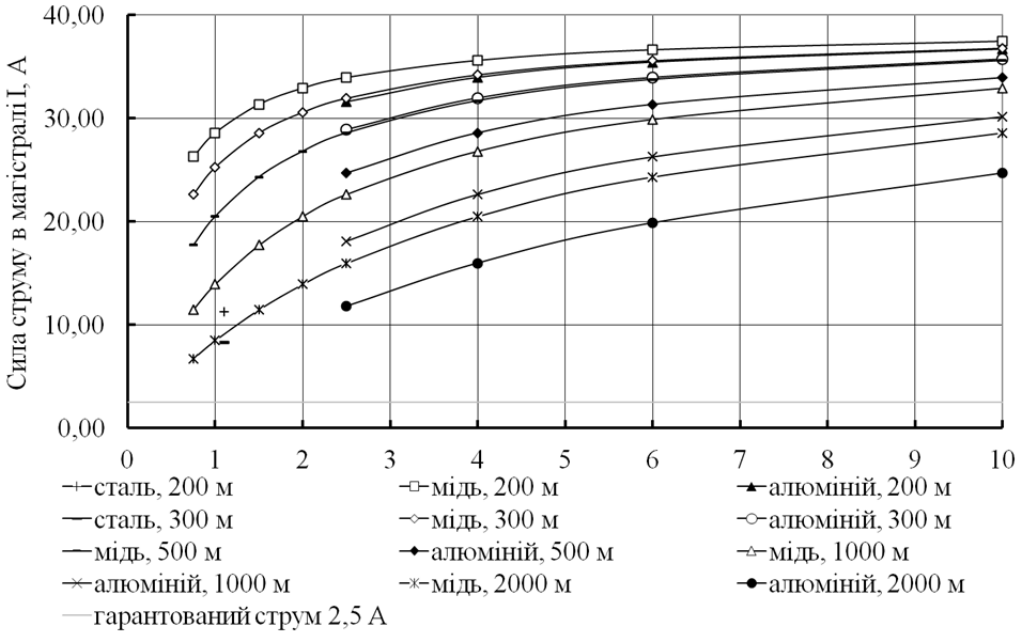


Рисунок 2 – Залежність сили струму в магістральному провіднику електропровідної мережі від його параметрів за змінної напруги 380 В

Джерело: розроблено автором

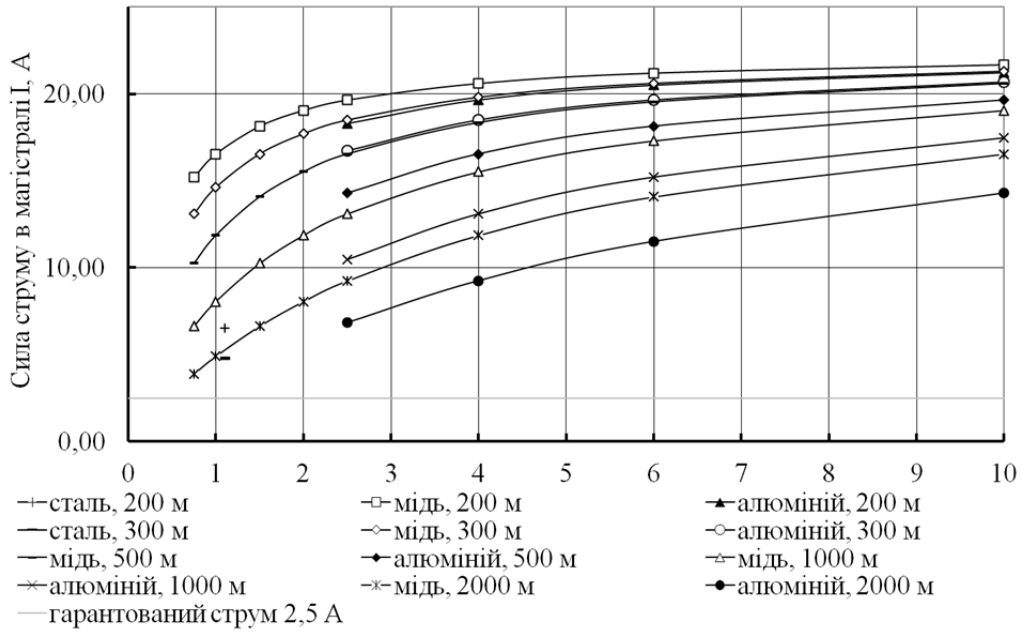


Рисунок 3 – Залежність сили струму в магістральному провіднику електропровідної мережі від його параметрів за змінної напруги 220 В

Джерело: розроблено автором

У відповідності до рис. 4 та рис. 5 сила струму в детонаторах прямо пропорційна до вище розглянутої сили струму в магістральному провіднику (рис. 2 та рис. 3) і є меншою за величиною значення. Зменшення змінної напруги з 380 В до 220 В призводить до зменшення сили струму в детонаторах, аналогічно магістральному провіднику.

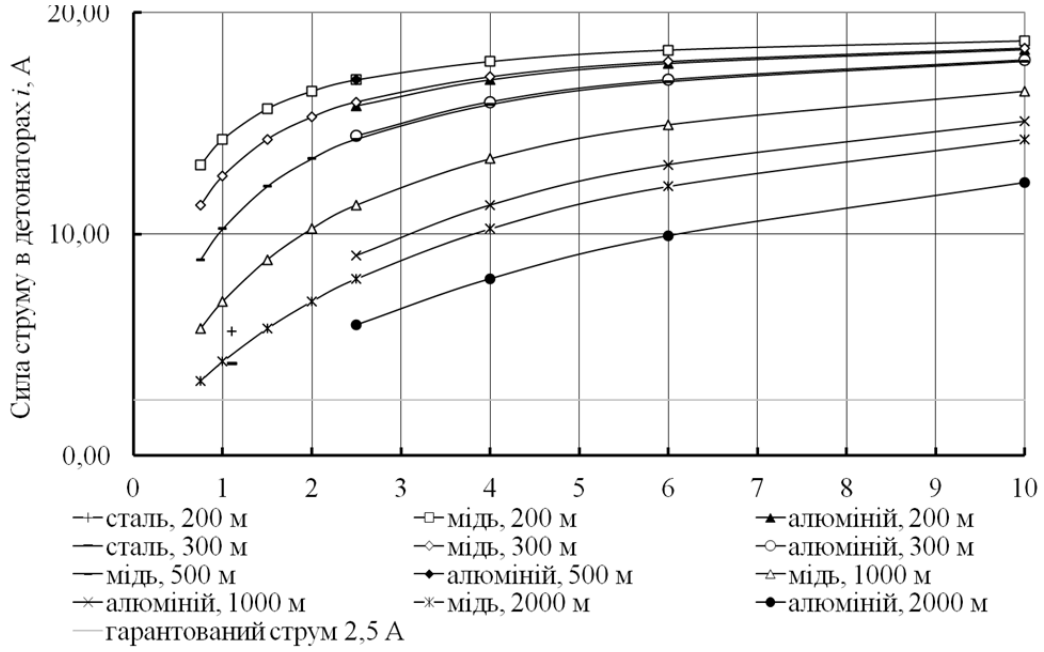


Рисунок 4 – Залежність сили струму в детонаторах від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 380 В

Джерело: розроблено автором

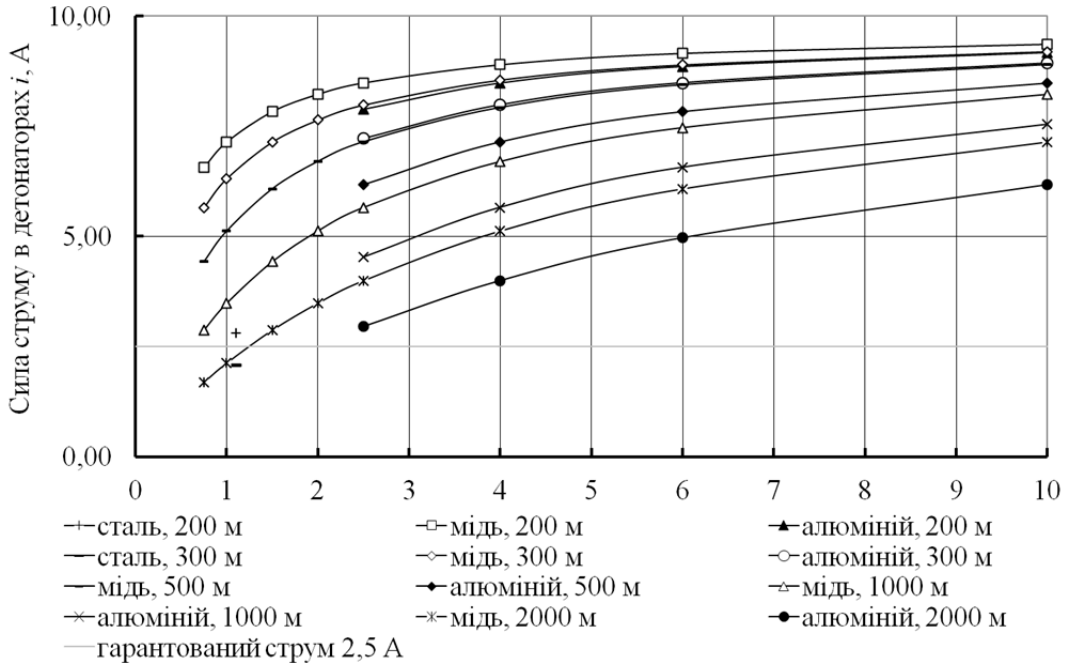


Рисунок 5 – Залежність сили струму в детонаторах від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 220 В

Джерело: розроблено автором

Мідна та алюмінієва жили забезпечують гарантійний струм в детонаторах, не залежно від величини змінної напруги, досліджуваної довжини магістрального провідника та його площі поперечного перерізу, крім мідної жили площею поперечного перерізу до 1,2 мм^2 та довжиною 2000 м і більше за змінної напруги 220 В. Оцинкована сталь за поперечного перерізу в 1,1 мм^2 не здатна забезпечити гарантований струм в детонаторах при довжині магістрального провідника 300 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 380 В (дані не винесені на зображення рис. 4 та рис. 5 через інше потрібне масштабування шкал).

Висновки. Проведено огляд актуальних досліджень і наукової літератури стосовно схем електричних мереж детонаторів, що використовуються в тунельних вибухових роботах. На основі проведеного огляду поставлена мета та задачі дослідження щодо побудови типових залежностей фізичних величин послідовно-паралельної електродетонаторної мережі від її параметрів при проходженні тунелів. Встановлені та побудовані залежності сили струму в магістральному провіднику та детонаторах електропровідної мережі від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 220 В та 380 В. Мідна та алюмінієва жили повністю забезпечують гарантійний струм в магістральному провіднику в усьому діапазоні досліджуваних його параметрів не залежно від величини змінної напруги при проходженні тунелів. Оцинкована сталь за поперечного перерізу в 1,1 мм^2 не здатна забезпечити гарантований струм при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 2000 м і більше та напрузі 380 В. Гарантійний струм в детонаторах не здатні забезпечити: мідні жили площею поперечного перерізу до 1,2 мм^2 та довжиною 2000 м і більше за змінної напруги 220 В; оцинкована сталь з вище розглянутими параметрами при довжині магістрального провідника 300 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 380 В.

Список літератури

1. Вишукування і проектування гірських транспортних тунелів. В 3 ч. Ч. 1 / Ю.М. Айвазов. Київ: НТУ, 2005. 187 с.
2. Лапченко А.С. Вплив меленого доменного шлаку та пластифікуючої добавки на міцністні властивості дорожнього бетону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2025. № 23. С. 143-154. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14
3. Лапченко А.С. Порівняння властивостей дорожнього цементобетону з додаванням поліпропіленових та базальтових фібр. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2025. № 12 (43). С. 358-365. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.358-365
4. Лапченко А.С. Оцінка недоліків проведення буровибухових робіт в різних гірських масивах. *Збірник наукових праць національного гірничого університету.* 2025. № 83 (4). С. 280-287. https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.280
5. Симанович Г.А., Хоменко О.Є., Кононенко М.М. Руйнування гірських порід вибухом: навч. посіб.. Дніпропетровськ: НГУ, 2014. 207 с.
6. Кравець В.Г., Зуєвська Н.В. Проектування вибухових робіт: навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 217 с.
7. Руйнування гірських порід вибухом / Шевцов М.Р., Таранов П.Я., Левіт В.В., Гудзь О.Г. Донецьк: ДонНТУ, 2003. 248 с.
8. Айвазов Ю.М., Підгорний О.В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Підземні транспортні споруди» для студентів спеціальності 2911 «Мости та транспортні тунелі». Київ: УТУ, 1998. 36 с.
9. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.): підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. Харків: Вид-во «Ранок», 2019. 272 с.
10. Shi J.-J., Guo S.-C., Zhang W. Expansion of Blast Vibration Attenuation Equations for Deeply Buried Small Clearance Tunnels Based on Dimensional Analysis. *Frontiers in Earth Science*. 2022. № 10. 889504. https://doi.org/10.3389/feart.2022.889504

References

1. Aivazov, Yu.M. (2005). Survey and design of mountain transport tunnels. (Vol. 1). Kyiv: NTU [in Ukrainian].
2. Lapchenko, A.S. (2025). The influence of ground blast furnace slag and plasticizing additive on the strength properties of road concrete. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 143-154. https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14 [in Ukrainian].
3. Lapchenko, A.S. (2025). Comparison of Road Cement Concrete Properties with Polypropylene and Basalt Fibers Addition. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 12 (43), 358-365. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.358-365 [in Ukrainian].
4. Lapchenko, A.S. (2025). Disadvantages's evaluation of drilling and blasting works in various rock. *Collection of research papers of the National mining university*, 83 (4), 280-287. https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.280 [in Ukrainian].
5. Symanovich, G.A., Khomenko, O.E., Kononenko, M.M. (2014). Destruction of rocks by explosion. Dnipropetrovsk: NGU [in Ukrainian].
6. Kravets, V.G., Zuevska, N.V. (2020). Design of blasting works. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute [in Ukrainian].
7. Shevtsov, M.R., Taranov, P.Ya., Levit, V.V., Gudz, O.G. (2003). Destruction of rocks by explosion. Donetsk: DonNTU [in Ukrainian].
8. Aivazov, Yu.M., Pidgorny, O.V. (1998). Methodological guidelines for the implementation of a course project in the discipline "Underground transport structures". Kyiv: UTU [in Ukrainian].
9. Baryakhtar, V. G., Dovgy, S. O., Bozynova, F. Ya., Kiryukhina, O. O. (2019). Physics (standard level, according to the curriculum of the author's team under the leadership of Loktyev V. M.). Kharkiv: Publishing house "Ranok" [in Ukrainian].
10. Shi, J.-J., Guo, S.-C., Zhang W. (2022). Expansion of Blast Vibration Attenuation Equations for Deeply Buried Small Clearance Tunnels Based on Dimensional Analysis. *Frontiers in Earth Science*, 10, 889504. https://doi.org/10.3389/feart.2022.889504 [in Ukrainian].

Artem Lapchenko, Senior Researcher, Ph.D tech. sci
National Transport University, Kyiv, Ukraine

Parameters of a Series-Parallel Electrodetonator Network When Passing Tunnels

The review of current research and scientific literature on the schemes of detonators's electrical networks used in tunnel blasting operations was conducted. Based on the review, the goal and objectives of the study were set to construct typical dependences of physical quantities of a series-parallel electric detonator network on its parameters when passing through tunnels. The dependences of the current strength in the main wire and detonators of the electrical network from the parameters of the main wire at alternating voltages of 220 V and 380 V were established and constructed. Copper and aluminium cores fully provide the guarantee current in the main wire in the entire range of its parameters under study, regardless of the magnitude of the alternating voltage when passing through tunnels. Galvanized steel with a cross section of 1.1 mm^2 is not able to provide a guaranteed current with a main wire length of 1000 m and more and a voltage of 220 V, as well as with a main conductor length of 2000 m and more and a voltage of 380 V. The current strength in detonators is directly proportional to the current strength in the main wire and is smaller in magnitude. Reducing the alternating voltage from 380 V to 220 V leads to a decrease in the current strength in detonators, similarly to the main wire. Copper and aluminium wires provide a guaranteed current in detonators, regardless from the magnitude of the alternating voltage, the investigated length of the main wire and its cross-sectional area, except for a copper wire with a cross-sectional area of up to 1.2 mm^2 and a length of 2000 m or more at an alternating voltage of 220 V. Galvanized steel with a cross-section of 1.1 mm2 is not able to provide a guaranteed current in detonators with a main wire length of 300 m or more and a voltage of 220 V, as well as with a main wire length of 1000 m or more and a voltage of 380 V.

aluminum, copper, current strength, detonator, galvanized steel, series-parallel electrodetonator network, tunnel, wire resistance

Одержано (Received) 01.04.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 13.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 17.04.2026