

О. А. ПУШКАР

ШЛЯХИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ЗГАСАННЯ У МЕЖАХ НОРМОВАНИХ ЗНАЧЕНЬ КАБЕЛІВ НА ОСНОВІ ОДИНОКОЇ ЕКРАНОВАНОЇ КРУЧЕНОЇ ПАРИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖ ETHERNET

В останні роки в концепції Industry 4.0 та ІоТ спостерігається інтенсивний перехід промислових мереж на провідну передачу даних на базі сімейства технологій Ethernet. Наведена хронологія розроблення міжнародних стандартів промислового Ethernet та відповідних кабелів на основі кручених пар доводить перспективність застосування одинокої крученої пари з можливістю передачі сигналу живлення, що значно знижує кількість, вагу та вартість кабелів у мережі. Відповідно до міжнародних стандартів на кабелі для промислового Ethernet екрановані рішення на основі одинокої екранованої крученої пари повинні забезпечувати передачу цифрових сигналів в діапазоні частоти до 20 МГц на відстань до 1 кілометра. Необхідність застосування екранованої крученої пари обумовлена умовами експлуатації при дії сильних електромагнітних завад. Виконаний аналітичний огляд наукових публікацій показує, що екрановані конструкції кабелів мають підвищені значення робочої ємності. На підставі чисельного моделювання електричного поля у крученій парі визначено значення робочої ємності залежно від конструктивного виконання екрану. Показано, що екранована кручена пара має значно більші (на 80 %) значення робочої ємності порівняно з неекранованою за умови однакової товщини ізоляції, екрану та захисної полімерної оболонки. Обґрунтовано ефективність застосування двошарового алюмополімерного екрану. Доведено, що варіювання товщини та діелектричної проникності матеріалу плівки екрану дозволяють оптимізувати конструкцію кабелю для забезпечення менших значень робочої ємності порівняно з неекранованою парою. На підставі чисельних розрахунків показано, що при розташуванні двошарового екрану плівкою назовні робоча ємність суттєво зростає та не відрізняється від ємності екранованої суцільним металевим екраном. Обґрунтовано ефективність виконаних чисельних розрахунків робочої ємності кручених пар підтверджено експериментальними результатами вимірювань коефіцієнту згасання в діапазоні частоти до 20 МГц неекранованої та екранованої двошаровим ламінованим екраном крученої пари.

Ключові слова: промисловий Ethernet, міжнародні стандарти, заводськість, одинока кручена пара, коефіцієнт згасання, робоча ємність, електричне поле, метод вторинних джерел, ефективність двошарового алюмополімерного екрану.

О. А. PUSHKAR

WAYS TO ENSURE THE ATTENUATION COEFFICIENT WITHIN THE LIMITS OF NORMAL VALUES OF SINGLE SHIELDED TWISTED PAIR CABLES FOR INDUSTRIAL ETHERNET NETWORKS

In recent years, the concept of Industry 4.0 and IIoT has seen an intensive transition of industrial networks to wired data transmission based on the Ethernet family of technologies. The given chronology of the development of international standards of industrial Ethernet and corresponding cables based on twisted pairs proves the perspective of using a single twisted pair with the possibility of transmitting a power signal, which significantly reduces the number, weight and cost of cables in the network. According to international standards on cables for industrial Ethernet, shielded solutions based on a single shielded twisted pair must ensure the transmission of digital signals in the frequency range of up to 20 MHz over a distance of up to 1 kilometre. The need to use a shielded twisted pair is due to operating conditions under the influence of strong electromagnetic interference. An analytical review of scientific publications shows that shielded cable designs have increased values of electrical capacity. On the basis of numerical modelling of the electric field in the twisted pair, the value of the electrical capacity is determined depending on the design of the screen. It is shown that the shielded twisted pair has significantly larger (by 80 %), electrical capacity values compared to the unshielded one, provided the insulation, screen and protective polymer shell are of the same thickness. The effectiveness of the use of a two-layer aluminium polymer screen is substantiated. It has been proven that varying the thickness and dielectric permeability of the screen film material allows optimizing the cable design to ensure lower values of the working capacity compared to an unshielded pair. On the basis of numerical calculations, it is shown that when the two-layer screen is placed with the film outwards, the working capacity increases significantly and does not differ from the capacity shielded with a solid metal screen. The validity and adequacy of the performed numerical calculations of the electrical capacity of twisted pairs is confirmed by experimental results of measurements of the attenuation coefficient in the frequency range up to 20 MHz of unshielded and shielded twisted pair with a two-layer laminated screen.

Keywords: industrial Ethernet, international standards, immunity, single twisted pair, attenuation coefficient, electric capacity, electric field, method of secondary sources, efficiency of two-layer aluminium polymer screen.

Вступ. Перехід промислових мереж на Ethernet дав відчутне зростання продуктивності та гнучкості. При цьому підходи, які описуються в концепції Industry 4.0 та ІоТ [1, 2], припускають, що провідна передача даних заснована на базі сімейства технологій пакетної передачі даних Ethernet. Сучасні мережі застосовують 2- та 4-парні кабелі на основі витих пар відповідної категорії. Так, у версії Ethernet 10/100 Base-T використовуються дві пари кабелів, у Gigabit Ethernet – чотири пари [1, 2]. Ethernet є найпопулярнішим стандартом провідного зв'язку для промислового Інтернету речей (IIoT), що забезпечує

високу продуктивність та надійне з'єднання [1–8]. Цей стандарт також пропонує можливість передачі сигналу живлення (PoE – Power over Ethernet), що значно знижує кількість, вагу та вартість кабелів [2]. Ethernet набирає популярності і в автомобільній промисловості – у багатьох сучасних рішеннях замінює стандарт CAN, який довгий час був основним протоколом обміну даними між окремими компонентами автомобіля [8, 9]. Ethernet дозволяє передавати більше даних, необхідних для реалізації багатьох функцій зі збільшенням автономності транспортних засобів. Фактично там, де раніше

© О. А. Пушкар, 2022

потрібно було 4 витих пари, у наступний час – тільки одну пару [8, 9]. Стандарт 100 Base-T1 розроблено з урахуванням сумісності з існуючою автомобільною специфікацією OPEN Alliance BroadR-Reach, при цьому 100Base-T1 є першим у сімействі стандартів Ethernet, який описує передачу даних по одній парі [1]. У результаті 100 Base-T1 – це фізичний повнодуплексний інтерфейс, який означає, що дані відправляються та приймаються по одній і тій же парі. Фізична повнодуплексна передача досягається відповідно до принципу суперпозиції електромагнітних полів. Наприклад, лінії, що базуються на стандарті 10Base-T і 100Base-TX [1] (табл. 1), мають свою власну пару для кожного напрямку передачі, а лінія, побудована відповідно до 100Base-T1 [1], має вбудовані гібридні схеми, які використовують ехопридушення для поділу сигналу, що передається і отримується. Мережа автомобіля, побудована на базі 100Base-T1, забезпечує передачу аудіо- та відеоданих, а також службової та діагностичної інформації з використанням Ethernet-протоколів у реальному часі. За роботу відповідають механізми, описані в стандартах AVB (Audio Video Bridging: IEEE 802.1BA, IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qat, IEEE 802.1Qav) [8, 9]. Фактично в автомобілі функціонує Ethernet-мережа, здатна забезпечити високу швидкість передачі, прогнозовану затримку передачі, а також жорстку пріоритизацію даних (низька швидкість передачі даних з високим пріоритетом або, навпаки, висока швидкість передачі даних із низьким пріоритетом). Весь процес передачі сигналів відбувається завдяки одній крученій парі [8, 9].

Це дозволило, по-перше, підвищити функціональність, а по-друге, забезпечити зниження загальної ваги кабельної мережі, встановленої в автомобілі, зменшення матеріальних витрат, у тому

числі і витрат на паливо. Фахівці у сфері промислової автоматизації досить швидко взяли до уваги досягнення компаній автомобільної промисловості з технологією однопарного Ethernet (Single Pair Ethernet – SPE). Фактично експлуатаційна ефективність може бути досягнута за допомогою створення єдиної мережі з більш високою пропускну здатністю. Але питання полягає у технічній реалізації впровадження SPE. Стандарт IEEE 802.3bw встановлює максимальну довжину лінії 15 метрів (табл. 1) [2]. Цього достатньо для автомобіля, але недостатньо для промислової мережі. Для вирішення цього завдання у 2019 році розроблено та прийнято новий стандарт IEEE 802.3cg (10Base-T1L), який дозволяє передавати дані зі швидкістю 10 Мбіт/с на відстані до 1000 метрів (табл. 1) [2].

На даний час Ethernet має кілька різних версій. Найчастіше використовуються 10/100Base-T Ethernet та Gigabit Ethernet. Також широко використовується можливість живлення пристроїв ліній Ethernet, що забезпечується технологією PoE [2]. Комплект Gigabit Ethernet + PoE особливо підходить для побудови промислових мереж, що поєднують безліч різних типів датчиків. Провідники витих пар для Ethernet зазвичай виготовляються з мідного дроту діаметром 24 AWG або 22 AWG (0,511 мм та 0,64 мм відповідно; AWG – американський стандарт калібрів – позасистемне вимірювання діаметру провідників) [10]. Усі чотири кручені пари (у разі версії Gigabit Ethernet) розміщені всередині загального екрану кабелю. На потужних промислових об'єктах можна побачити кілометри такого типу кабелів, які розташовані практично повсюдно. Зазвичай вони проходять вздовж стін та стель, щоб якнайменше порушувати хід шляхів сполучення, і в той же час звести до мінімуму ризик їх обриву або пошкодження.

Таблиця 1 – Хронологія стандартів промислового Ethernet та відповідних кабелів на основі кручених пар [1, 2]

Рік прийняття	Стандарт IEEE 802.3		Довжина кабелю, м	Швидкість передачі цифрових сигналів	Смуга пропускання кабелю, МГц	Категорія відповідно до ISO/IEC TR 1180	К-сть пар
1990	IEEE 802.3i	10Base-T	100	10 Мбіт/с	10	Cat3	2
1995	IEEE 802.3u	100Base-TX	100	100 Мбіт/с	100	Cat5	2
1999	IEEE 802.3ab	1000Base-T	100	1 Гбіт/с	100	Cat5e	4
2006	IEEE 802.3an	10GBase-T	55	10 Гбіт/с	250	Cat6	4
			100		500	Cat6A	4
					600	Cat7	4
					1000	Cat7A	4
2015	IEEE 802.3bw	100Base-T1	15	100 Мбіт/с	66	SPE	1
2016	IEEE 802.3bp	1000Base-T1	40 15	1000 Мбіт/с	600	SPE	1
2019	IEEE 802.3cg	10Base-T1	1000	10 Мбіт/с	20	SPE	1
		10Base-T1S	25				
2020	IEEE 802.3ch	Multi-Gig	15	2,5/5/10 G (Гбіт/с)		SPE	1

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час розроблено два нові міжнародні стандарти для SPE-кабелів: IEC 61156-13 та IEC 61156-14 [2] (IEEE 802.3cg, 10Base-T1L) – екрановане рішення SPE з характеристиками передачі на частоті до 20 МГц та на відстані до 1 кілометра переважно для промислових застосувань. У стандарті IEC 61156-13 пропонується кабель, в якому провідник мідний однодротяний діаметром від 0,64 до 1,7 мм і призначений для застосування в задачах, де не передбачається згинання кабелю в процесі роботи. Кабель, що відповідає IEC 61156-14, виконаний з багатодротяної міді та призначений для використання в задачах, де можливі вигини кабелю в процесі роботи.

Екрановані рішення кабелів з підвищеним рівнем заводстійкості (рис. 1 та 2, UTP – unshielded twisted pair, неекранована кручена пара; FTP – foiled twisted pair, екранована фольгою кручена пара) [11, 12] обумовлюють зростання електричної робочої ємності [13–21] кручених пар.

Робоча електрична ємність C крученої пари залежить від матеріалу ізоляції (діелектричної проникності ϵ), відстані між центрами провідників (a) і коефіцієнту ψ , що характеризує вплив екрану (металевих оболонок) на зростання поверхневої густини зарядів на поверхні екран-ізоляція [12, 20]:

$$C = \chi\pi\epsilon_0 \epsilon / \ln\left(\frac{a-r}{r}\psi\right), \text{ Ф/м} \quad (1)$$

В екранованій крученій парі кабелі з'являються «паразитні» ємності провідників на металевий екран кабелю [17, 20], за рахунок котрих значення ємності зростає на 40–60 % [17]. Збільшення робочої ємності екранованої крученої пари призводить до зростання коефіцієнту згасання [12, 17, 20]:

$$\alpha = 8,69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \text{ дБ/м} \quad (2)$$

де R – активний опір провідників крученої пари (Ом/м), L – індуктивність (Гн/м), C – робоча ємність (Ф/м) та G – активна провідність (См/м) ізоляції крученої пари.

Зростання коефіцієнту згасання [12, 17, 10] зменшує дальність передачі широкопasmових сигналів, особливо у діапазоні частоти до 20 МГц [17, 20].

Мета статті. Визначення робочої ємності на підставі чисельного розрахунку електричного поля залежно від конструктивного виконання екрану для забезпечення коефіцієнту згасання у межах нормованих значень у робочому діапазоні частоти екранованої одинокої крученої пари (SPE).

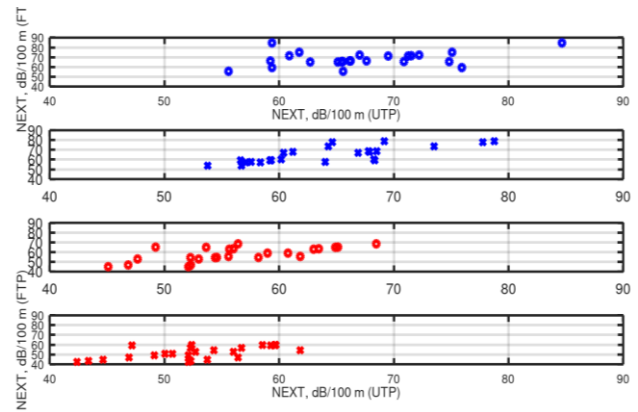


Рисунок 1 – Кореляційна залежність між перехідним згасанням на ближньому кінці (NEXT) для частоти 10 МГц, 20 МГц, 62,5 МГц та 100 МГц (зверху вниз відповідно) між крученими парами неекранованого (UTP) та екранованого (FTP) чотирьох парних кабелів категорії 5e

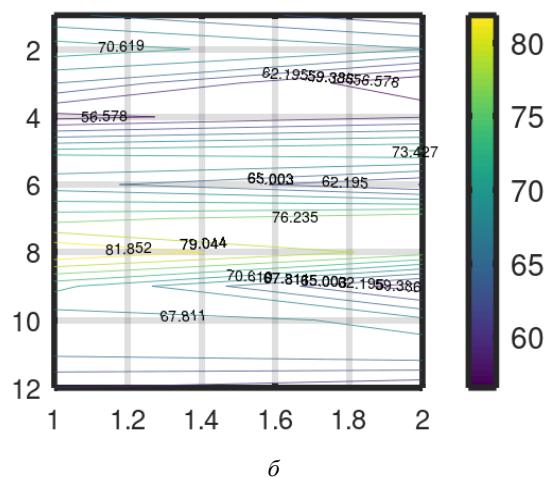
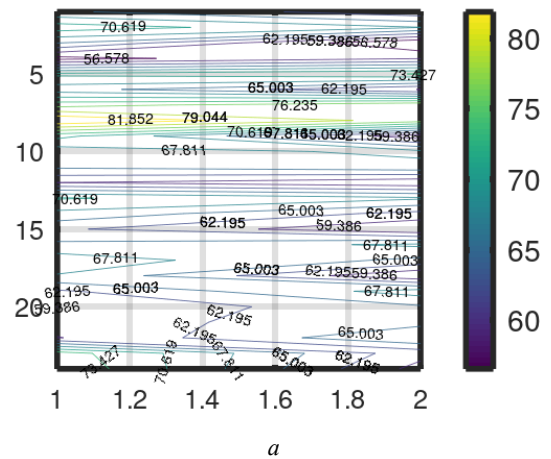


Рисунок 2 – Лінії рівня перехідного згасання на ближньому кінці (NEXT) для частоти 20 МГц кручених пар неекранованого (а) та екранованого (б) 4-парного кабелю категорії 5e

Методика чисельного розрахунку електричного поля. Розрахунок поля здійснено методом вторинних зарядів [17, 22] на підставі розв'язку складної системи алгебраїчних рівнянь, яка

базується на інтегральному рівнянні Фредгольма першого роду (для електродів) [22] та інтегральному рівнянні Фредгольма другого роду (для ізоляції) [22], для ряду розрахункових моделей, у яких прийнято припущення. Перше припущення стосується нехтування гвинтовою поверхнею екранованої крученої пари: крок скручування перевищує поперечні розміри пари. Відповідно до цього припущення електричне поле пари вважається однаковим у кожному поперечному перерізі, тобто є плоско-паралельним. Друге припущення стосується форми меж поділу середовищ. Поверхні провідників та ізоляції прийняті круговими циліндричними [17].

Чисельне моделювання проведено для трьох варіантів конструктивного виконання одинокої вити пари:

1. неекранована пара у захисній полімерній оболонці;

2. екранована суцільним металевим екраном;

3. екранована комбінованим двошаровим екраном, який складається з діелектрику та металевої фольги (так звана алюмополімерна).

Для геометрії екрана розглянута кругова циліндрична форма.

Так, модель із круговими межами розділу середовищ для розрахунку поля крученої пари з двошаровим екраном (рис. 3, позиції 3 та 6 відповідно) містить (рис. 3): 1, 2 – жили; 3 – екран; 4, 5 – поверхні ізоляції жил; 6 – поверхня полімерної плівки (діелектрику) комбінованого екрану. Точками позначено вузли, у котрих визначається розрахункова поверхнева густина σ , Кл/м² зарядів.

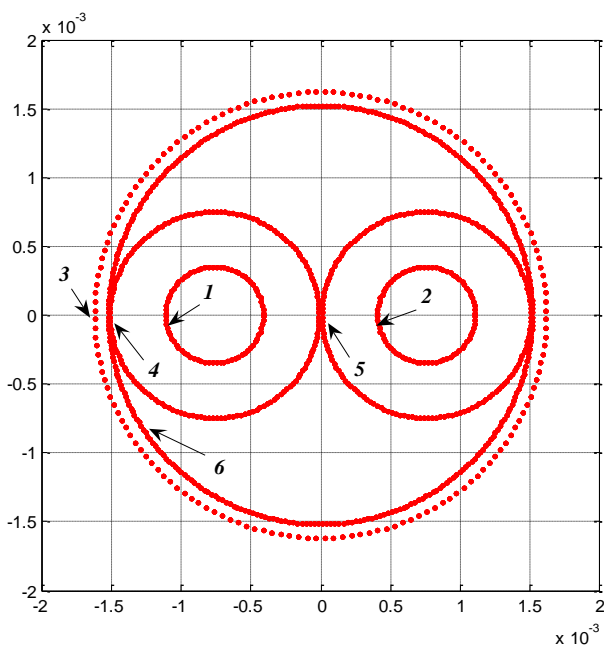


Рисунок 3 – Розрахункова модель для визначення робочої ємності одинокої крученої пари (SPE)

Візуальний контроль розташування вузлів необхідний для якісної перевірки правильності завдання геометрії моделі. На підставі визначення поверхневої густини зарядів з урахуванням впливу

конструктивних елементів при заданій напрузі знаходиться напруженість електричного поля та робоча ємність крученої пари [17].

Аналіз результатів чисельного розрахунку робочої ємності одинокої крученої пари. На рис. 4 представлено розрахунки електричного поля у випадку одного потенційного провідника (потенціал дорівнює 500 В). Показано розгортки напруженості поля по довжині твірних ліній SDL (осциляції) провідників ($g1, g2$), ізоляції ($ins1, ins2$) крученої пари залежно від конструктивного виконання:

1 – неекранована у захисній полімерній оболонці (область I для внутрішньої та зовнішньої поверхні оболонки);

2 – екранована суцільним металевим екраном (область II для внутрішньої та зовнішньої поверхні металевого суцільного екрану);

3 – екранована алюмополімерним двошаровим екраном (область III для внутрішньої поверхні плівки діелектрика та зовнішньої поверхні фольги).

Діаметр провідників дорівнює 0,64 мм; товщина поліетиленової ізоляції – 0,32 мм; діелектрична проникність неполярної поліетиленової ізоляції – $\epsilon = 2,1$ (не залежить від частоти у широкому діапазоні); діелектрична проникність захисної полімерної оболонки – $\epsilon = 4,5$ (полівінілхлоридний пластикат); товщина полімерної оболонки, суцільного екрану та ламінованого екрану однакова та дорівнює 0,25 мм.

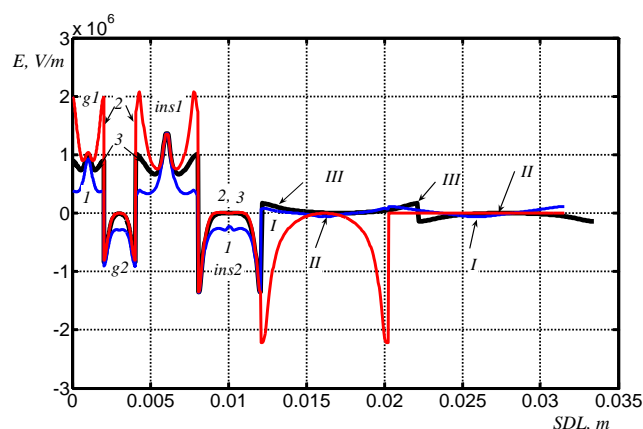


Рисунок 4 – Структура електричного поля залежно від конструктивного виконання крученої пари

Порівняльний аналіз розрахункових значень робочої ємності крученої пари залежно від конструктивного виконання доводить, що за умови однакової товщини ізоляції робоча ємність екранованої суцільним металевим екраном крученої пари на 78 % перевищує значення ємності неекранованої пари у захисній полівінілхлоридній оболонці (рис. 5, порівняйте UTP та STP (shielded twisted pair, екранована кручена пара) (1)). Збільшення товщини поліетиленової ізоляції у 2 рази (рис. 5, STP (2)) призвело до різниці на 17 %, у 2,5 рази – значення робочої ємності екранованої та неекранованої крученої пари однакові (рис. 5, порівняйте UTP та STP (3)).

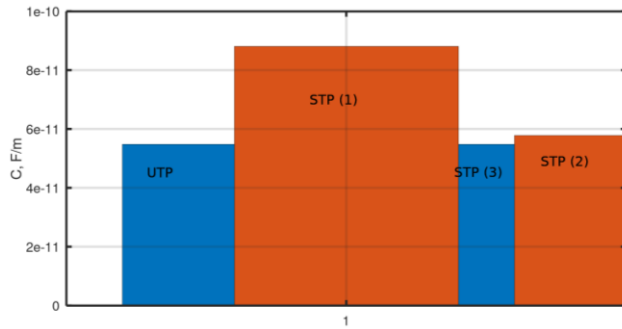


Рисунок 5 – Порівняння результатів чисельного розрахунку робочої ємності неекранованої (UTP) та екранованої крученої пари (STP)

У разі застосування комбінованого двошарового екрану на значення робочої ємності пари впливає матеріал плівки, товщина та розташування плівки відносно ізоляції крученої пари (за умови незмінності загальної товщини 0,25 мм двошарового екрану). Так, у разі застосування плівки на основі полярного матеріалу (діелектрична проникність $\epsilon = 4,5$), товщина котрої становить 0,15 мм, перевищення ємності у такому разі дорівнює 10% відносно неекранованої пари. При товщині плівки 0,1 мм різниця складає 8%. Застосування у якості матеріалу плівки неполярного діелектрику [23] (діелектрична проникність $\epsilon = 2,3$, товщина плівки 0,1 мм) призводить до різниці 5% у значеннях ємності порівняно з неекранованою парою. Варіювання товщини плівки та діелектричної проникності забезпечують отримання такого оптимального з точки зору значення ємності конструктивного виконання крученої пари, у котрій робоча ємність може бути навіть меншою порівняно з неекранованою (рис. 6, порівняйте UTP та FTP (tape+foil)).

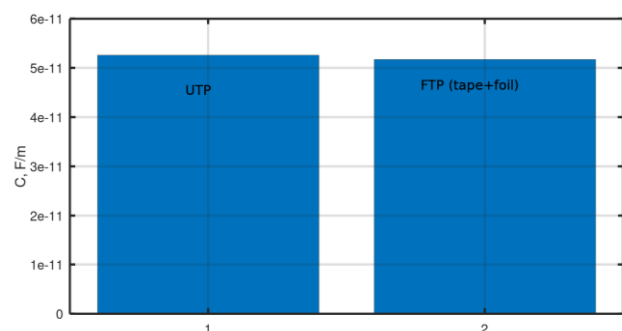


Рисунок 6 – Порівняння результатів чисельного розрахунку робочої ємності неекранованої (UTP) та екранованої двошаровим екраном (плівка+фольга) крученої пари (FTP)

При розташуванні двошарового екрану плівкою зовні відносно крученої пари робоча ємність мало відрізняється від ємності екранованої суцільним металевим екраном (рис. 5).

Результати вимірювань коефіцієнту згасання в діапазоні частоти 4–20 МГц неекранованої (рис. 7, крива 1) та екранованої двошаровим ламінованим екраном (рис. 7, крива 2) доводять обґрунтованість та адекватність виконаних чисельних розрахунків робочої ємності кручених пар.

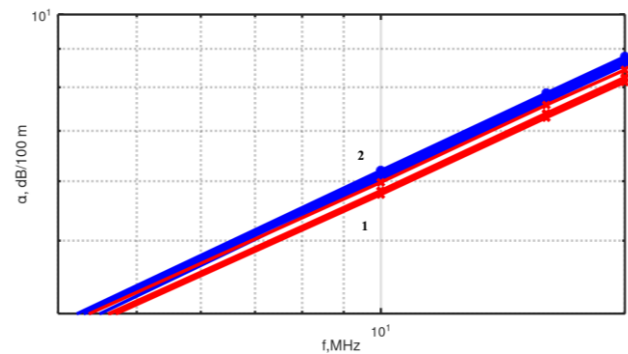


Рисунок 7 – Порівняльний аналіз коефіцієнту згасання неекранованої (крива 1) та екранованої двошаровим екраном (плівка+фольга) (крива 2) крученої пари

Висновки. Чисельні розрахунки робочої ємності одинокі крученої пари залежно від конструктивного виконання підтверджують суттєвий вплив екрану на робочу ємність екранованої пари порівняно з неекранованою.

Для забезпечення ємності та, відповідно, коефіцієнту згасання екранованої крученої пари суцільним екраном необхідно збільшити товщину ізоляції у 2,5 рази відносно товщини ізоляції неекранованої крученої пари.

Застосування ламінованого двошарового екрану з неполярною плівкою надає можливості варіювання значеннями робочої ємності для зменшення її впливу на коефіцієнт згасання крученої пари у робочому діапазоні частоти.

У подвійному логарифмічному масштабі експериментальні залежності коефіцієнту згасання спрямляються, що є свідченням того, що діелектричні втрати у діелектрику суттєво не впливають на коефіцієнт згасання. Для зменшення значень ємності крученої пари можливе застосування спіненої ізоляції [24]. Відповідно до (2) це забезпечить додаткове зменшення втрат у провідниках, тобто існує можливість підвищити дальність передавання сигналу, гнучкість кабелю та зменшити масо-габаритні розміри кабелю у цілому.

Список літератури

1. IEEE Std 802.3bp-2016. IEEE Standard for Ethernet Amendment 4: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 1 Gb/s Operation over a Single Twisted-Pair Copper Cable. Effective from 2016-09-20. Official edition. 2016. 211 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7564011>.
2. Fritsche M., Diekmann J., Schmidt R. Single-pair Ethernet: The infrastructure for IIoT. *Automation*. 2021. Vol. 3. P. 40–59.
3. Reynders D., Wright E. Practical TCP/IP and Ethernet networking for industry. Elsevier, 2003. 320 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-5806-5.x5000-5>.
4. 100base-T1 System Implementation Specification. Effective from 2017-12-08. Official edition. 2017. 28 p. URL: http://www.opensig.org/download/document/231/OA+100BA-SE-T1+system+implementation+specification_D1.0_final_18.pdf.
5. Lamparter O., Fang L., Bischoff J. et al. Multi-Gigabit over copper access networks: architectural evolution and techno-economic analysis. *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57, no. 8. P. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2019.1800847>.
6. Oksman V., Strobel R., Starr T. et al. MGFAS: a new generation of copper broadband access. *IEEE Communications Magazine*. 2019.

- Vol. 57, no. 8. P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2019.1800844>.
7. Maes J., Nuzman C. J. The past, present, and future of copper access. *Bell Labs Technical Journal*. 2015. Vol. 20. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.15325/bltj.2015.2397851>.
 8. Kang S., Han S., Cho S., Jang D., Choi H., Choi J.-W. High speed CAN transmission scheme supporting data rate of over 100 Mb/s. *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54, no. 6. P. 128–135. DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7498099>.
 9. Mathews K., Konigseder T. The physical transmission of automotive Ethernet. *Automotive Ethernet*. Cambridge, 2017. P. 102–188. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781316869543.006>.
 10. ASTM B258-18. Standard specification for standard nominal diameters and cross-sectional areas of AWG sizes of solid round wires used as electrical conductors. Official edition. 2018. 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/B0258-18>.
 11. UTP vs STP - Shielded data cables make the grade. *LEONI technical bulletin*. 2015. No. 12. P. 10. URL: https://publications.leoni.com/fileadmin/data_communications_networks/publications/articles/technical_bulletin_utp_vs_stp_en.pdf?1469702277.
 12. Безпрозваних Г. В., Пушкар О. А. Підвищення заводостійкості кабелів для систем протипожежного захисту. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. № 4. С. 54–58. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.07>.
 13. Baghdadi B., Abdelber B., Alain R., Omar D., Helima S. Experimental study of the behaviour of the crosstalk of shielded or untwisted-pair cables in high frequency. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2019. Vol. 16, no. 3. P. 311–324. DOI: <https://doi.org/10.2298/sjee1903311b>.
 14. Беспрозванных А. В., Игнатенко А. Г. Влияние скрутки сердечника на параметры передачи сетевых кабелей. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2004. № 7. С. 82–87.
 15. Ogundapo O., Duffy A., Nche C. Parameter for near end crosstalk prediction in twisted pair cables. *2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC 2016*, Ottawa, ON, Canada, 25–29 July 2016. P. 485–490. DOI: <https://doi.org/10.1109/isemc.2016.7571696>.
 16. Беспрозванных А. В., Игнатенко А. Г. Косвенные оценки допусков на диаметры токопроводящих жил проводников витых пар сетевых кабелей. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2005. № 42. С. 47–52.
 17. Бойко А. М., Безпрозваних Г. В. Обґрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2011. № 3. С. 21–35.
 18. Бойко А. М. Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2013. № 59 (1032). С. 20–29.
 19. Hassoun F., Tarafi R., Zeddani A. Calculation of per-unit-length parameters for shielded and unshielded twisted pair cables. *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 27 February – 3 March 2006. P. 250–253. DOI: <https://doi.org/10.1109/emczur.2006.214917>.
 20. Беспрозванных А. В., Игнатенко А. Г. Оптимизация конструкции сетевых кабелей по коэффициенту затухания в зоне допусков геометрических размеров параметров передачи. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2004. № 2. С. 8–10.
 21. Poltz J. Attenuation of screened twisted pairs. *66th International Cable and Connectivity Symposium (IWCS 2017)*, Orlando, Florida, USA, 8–11 October 2017. P. 219–226.
 22. Беспрозванных А. В., Золотарев В. М., Антонец Ю. А. Влияние толщины изоляции защищенных проводов высоковольтных ЛЭП на их пропускную способность по току. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 2. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2018.2.07>.
 23. Kennefick D. J. FEP as a dielectric material for multi-gigabit, single pair ethernet cable for automotive. *67th International Cable and Connectivity Symposium (IWCS 2018)*, Providence, Rhode Island, USA, 14–17 October 2018.
 24. Беспрозванных Г. В., Костюков І. О., Пушкар О. А. Синтез конструктивно-технологічних рішень регулювання робочої ємності кабелів промислових мереж. *Електротехніка і*

Електромеханіка. 2021. № 1. С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.1.07>.

References

1. *IEEE Standard for Ethernet Amendment 4: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 1 Gb/s Operation Over a Single Twisted-Pair Copper Cable*, IEEE Std 802.3bp-2016, Sept. 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2016.7564011>.
2. M. Fritsche, J. Diekmann, and R. Schmidt, “Single-pair Ethernet: The infrastructure for IOT,” *Automation*, vol. 3, pp. 40–59, 2021.
3. D. Reynders and E. Wright, *Practical TCP/IP and Ethernet Networking for Industry*. Elsevier, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-5806-5.x5000-5>.
4. *100base-T1 System Implementation Specification*, Open Alliance, 2017. [Online]. Available: http://www.opensig.org/download/document/231/OA+100BASE-T1+system+implementation+specification_D1.0_final_18.pdf.
5. O. Lamparter et al., “Multi-Gigabit over copper access networks: Architectural evolution and techno-economic analysis,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 22–27, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/mcom.2019.1800847>.
6. V. Oksman et al., “MGFAST: A new generation of copper broadband access,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 14–21, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/mcom.2019.1800844>.
7. J. Maes and C. J. Nuzman, “The past, present, and future of copper access,” *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 1–10, 2015, doi: <https://doi.org/10.15325/bltj.2015.2397851>.
8. S. Kang, S. Han, S. Cho, D. Jang, H. Choi, and J.-W. Choi, “High speed CAN transmission scheme supporting data rate of over 100 Mb/s,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 6, pp. 128–135, Jun. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7498099>.
9. K. Mathews and T. Konigseder, “The physical transmission of automotive Ethernet,” in *Automotive Ethernet*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017, pp. 102–188, doi: <https://doi.org/10.1017/9781316869543.006>.
10. *Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors*, ASTM B258-18, ASTM, 2018, doi: <https://doi.org/10.1520/B0258-18>.
11. “UTP vs STP - Shielded data cables make the grade,” *LEONI Technical Bulletin*, no. 12, p. 10, 2015. [Online]. Available: https://publications.leoni.com/fileadmin/data_communications_networks/publications/articles/technical_bulletin_utp_vs_stp_en.pdf?1469702277.
12. G. V. Bezprozvannykh and O. A. Pushkar, “Increasing noise immunity of cables for fire protection systems,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 4, pp. 54–58, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.4.07>.
13. B. Baghdadi, B. Abdelber, R. Alain, D. Omar, and S. Helima, “Experimental study of the behaviour of the crosstalk of shielded or untwisted-pair cables in high frequency,” *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 311–324, 2019, doi: <https://doi.org/10.2298/sjee1903311b>.
14. H. V. Bezprozvannykh and A. G. Ignatenko, “Vliianie skrutki serdchnika na parametry peredachi setevykh kabelei [Influence of core twist on transmission parameters of network cables],” *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*, no. 7, pp. 82–87, 2004. (in Russian)
15. O. Ogundapo, A. Duffy, and C. Nche, “Parameter for near end crosstalk prediction in twisted pair cables,” in *2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC 2016*, Ottawa, ON, Canada, Jul. 25–29, 2016. pp. 485–490, doi: <https://doi.org/10.1109/isemc.2016.7571696>.
16. H. V. Bezprozvannykh and A. G. Ignatenko, “Kosvennye otcenki dopuskov na diametry tokoprovodiashchikh zhil provodnikov vitykh par setevykh kabelei [Indirect estimates of tolerances for conductor diameters of twisted pair conductors of network cables],” *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*, no. 42, pp. 47–52, 2005. (in Russian)
17. A. M. Boiko and H. V. Bezprozvannykh, “Obgruntuvannia tovshchyny izoliatsii vytykh ekranovanykh par strukturovanykh kabelnykh system [Justification of insulation thickness of twisted shielded pairs of structured cable systems],” *Bulletin of the National*

- Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 3, pp. 20–35, 2011. (in Ukrainian)
18. A. M. Boiko, "Dreif vo vremeni emkosti i tangensa ugla dielektricheskikh poter neekranirovannykh i ekranirovannykh setevykh kabelei [Time drift of capacitance and dissipation factor of unshielded and shielded network cables]," *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 59 (1032), pp. 20–29, 2013. (in Russian)
 19. F. Hassoun, R. Tarafi, and A. Zeddou, "Calculation of per-unit-length parameters for shielded and unshielded twisted pair cables," in *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, Feb. 27–Mar. 3, 2006, pp. 250–253, doi: <https://doi.org/10.1109/emczur.2006.214917>
 20. G. V. Bezprozvannykh and A. G. Ignatenko, "Optimizatsiia konstruktsii setevykh kabelei po koeffitsientu zatukhaniia v zone dopuskov geometricheskikh razmerov parametrov peredachi [Optimization of a construction of network cables on a attenuation coefficient in zone of tolerances of geometric sizes of parameters of transmission]," *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 2, pp. 8–10, 2004. (in Russian)
 21. J. Poltz, "Attenuation of screened twisted pairs," in *66th International Cable and Connectivity Symposium (IWCS 2017)*, Orlando, Florida, USA, Oct. 8–11, 2017, pp. 219–226.
 22. G. V. Bezprozvannykh, V. M. Zolotaryov, and Y. A. Antonets, "Effect of the thickness of insulation of protected wires of high-voltage overhead transmission lines to their current carrying capacity," *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 2, pp. 41–46, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2018.2.07>.
 23. D. J. Kenefick, "FEP as a dielectric material for multi-gigabit, single pair ethernet cable for automotive," in *67th International Cable and Connectivity Symposium (IWCS 2018)*, Providence, Rhode Island, USA, Oct. 14–17, 2018.
 24. G. V. Bezprozvannykh, I. A. Kostiuikov, and O. A. Pushkar, "Synthesis of constructive-technological decisions of regulation of working capacitance of cables of industrial networks," *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 44–49, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.1.07>.

Надійшло (received) 24.10.2022

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Пушкар Олег Анатолійович (Oleg Anatoliiovych Pushkar) – генеральний директор Науково-виробничого підприємства «Алай» (ТОВ «НВП «Алай»»), аспірант кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: adm@alay.com.ua.