

Г.В. Безпрозванних, О.А. Пушкар

## Забезпечення нормованих параметрів передачі цифрових сигналів витими парами на технологічній стадії виготовлення кабелів для промислових операційних технологій

Сучасні мережі промислового Ethernet засновані на витих парах неекранованих та екранованих кабелів категорії 5e. Впровадження однопарного Ethernet стикається з проблемою забезпечення передачі цифрових сигналів на відстань до 1000 м зі швидкістю до 1 Гбіт/с. Виконано експериментальні дослідження статистично усереднених електричних параметрів передачі витих пар для 10 і 85 вибірок бухт довжиною 305 м неекранованих та екранованих кабелів категорії 5e відповідно. Визначено, що у діапазоні частоти від 1 до 10 МГц неекрановані кабелі мають менші значення коефіцієнту згасання. У діапазоні більше 30 МГц екрановані кабелі мають менші значення коефіцієнту згасання, що обумовлено впливом алюмополімерного екрану. Встановлено, що коефіцієнт парної кореляції між омичною та ємнісною асиметріями витих пар дорівнює 0,9735 – для неекранованого та 0,9257 – для екранованого кабелів. Доведено вплив у більшій мірі омичної асиметрії витих пар на завадостійкість кабелів. Проаналізовано вплив адитивної та мультиплікативної завади на відхилення діаметру та ємності ізолюваного провідника від номінальних значень у стохастичному технологічному процесі. Обґрунтовано діапазони налаштувань технологічного процесу для забезпечення нормованих значень коефіцієнту згасання та завадостійкості витих пар у височастотному діапазоні. Бібл. 36, рис. 10.

**Ключові слова:** промисловий Ethernet, вита пара, коефіцієнт згасання, завадостійкість, омична та ємнісна асиметрії, стохастичний технологічний процес, адитивна та мультиплікативна завади, коефіцієнт варіації.

**Вступ.** У системах контролю та управління на виробництві, будівлями використовується безліч простих пристроїв – датчики для детектування світла, тепла, руху, задимлення, вологості та тиску, механізми для активації та контролю вимикачів, замикаючих пристроїв, сигналізації, тощо. Використовувані елементи керування, датчики, системи та пристрої називають «операційними технологіями» (Operational Technology – OT). Для їх підключення традиційно використовувалися та використовуються різні комунікаційні протоколи та технології польової шини, такі як, наприклад, Modbus для систем кондиціонування [1-3], BACnet для контролю доступу [1-3] та LonWorks для освітлення [1-3]. Фрагментація мережі призводить до необхідності використовувати шлюзи для перетворення протоколів при створенні єдиної системи автоматизації, що ускладнює реалізацію складних систем керування будь-якими об'єктами. В той же час, інформаційні мережі уніфіковані, але протокол Ethernet, що використовується в них, для операційних технологій з різних причин (технологічних, вартісних) широкого поширення не отримав. [4] Завдяки високій пропускну здатності у порівнянні з існуючими мережами польових шин Ethernet суттєво здатен підвищити гнучкість при реалізації додаткових функцій у OT. Рішенням впровадження інформаційного протоколу у OT стали стандарти однопарного Ethernet (Single-Pair Ethernet – SPE) [5-10].

Однопарний Ethernet – новітня технологія, що відповідає цим новим вимогам, оскільки дозволяє передавати дані через Ethernet за допомогою лише однієї витієї пари зі швидкістю передачі сигналів від 10 Мбіт/с до 1 Гбіт/с [10, 11]. Так, для порівняння: у Fast Ethernet зі швидкістю передачі сигналів 100 Мбіт/с потрібні дві, а у Gigabit Ethernet – чотири витієї пари [12]. Перевагою однопарного Ethernet є також можливість одночасно подавати електроживлення кінцевим пристроям за технологією Power over Data Line (PoDL). З дальністю передачі до 1000 м однопарний Ethernet стає особливо цікавим рішенням для застосування у сфері автоматизації будь-яких процесів, у тому числі і у електроенергетиці [5, 6].

Так, однопарний Ethernet вже впроваджують у нові покоління автомобілів замість CAN та інших

шин [7-9]. У майбутньому функції управління, зв'язку та безпеки єдиним чином працюватимуть за допомогою Ethernet. Це основна вимога для керування повним мережевим підключенням або автономного транспорту в перспективі.

Однопарний Ethernet також доцільно застосовувати у промисловій автоматизації. Однопарні кабельні з'єднання швидко встановлюються, економлять місце, дешево обходяться і прості в експлуатації. Оснащення простих датчиків, камер та аналогічних пристроїв інтерфейсами Ethernet робить SPE рушійною силою інтегрованої промисловості та промислового Інтернету речей (IIoT) (рис. 1) [5, 6]. В цілому до 2025 р. світовий ринок технологій Інтернету речей оцінюватиметься в 6,2 трильйона доларів, з яких 4,8 трлн. припадуть на сфери охорони здоров'я (2,5 трлн.) та виробництва (2,3 трлн.), як найбільші сегменти ринку [6]. В більшій мірі зростання припадає на з'єднання між машинами у виробництві, обробній промисловості, сфері охорони здоров'я. Польовий рівень стає інтелектуальним, що спрощує та прискорює конфігурування, ініціалізацію та програмування завдяки застосуванню кабелів на основі однієї витієї пари [6].

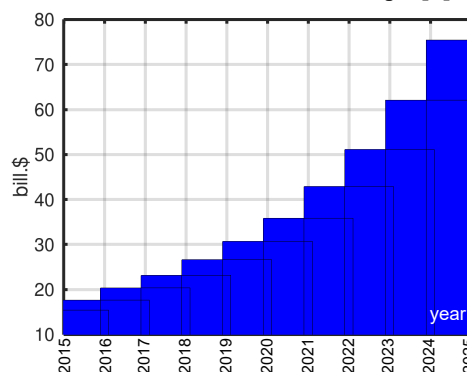


Рис. 1. Динаміка зростання світового ринку Інтернету речей [5]

Кабель, як інфраструктурний фундамент, є безпосередньою лінією передачі. Залежно від необхідної швидкості передачі та довжини лінії в даний час для SPE доступні два стандартні типи витієї пари.

© Г.В. Безпрозванних, О.А. Пушкар

Для мереж зі швидкістю передачі сигналів 10 Мбіт/с на відстань до 1000 м конструкцію кабелю регламентують такі стандарти: IEC 61156-13 – кабель передачі даних SPE із смугою пропускання до 20 МГц для стаціонарної установки [10] (кабель 10Base-T1L з дальністю передачі 1000 м у ряді випадків здатний замінити дорожчі оптичні кабелі [12-15]); IEC 61156-14 – кабель передачі даних SPE із смугою пропускання до 20 МГц для гнучкої установки [10].

Завдяки технології SPE, в якій застосовані нові технології кодування та скремблювання даних, промислові та технологічні мережі отримують кращі характеристики в частині синхронізації пристроїв, підключених до лінії зв'язку, зменшується рівень електромагнітних перешкод, випромінюваних на сусідні пари, а також забезпечується більш високий захист даних, що передаються (рис. 2).

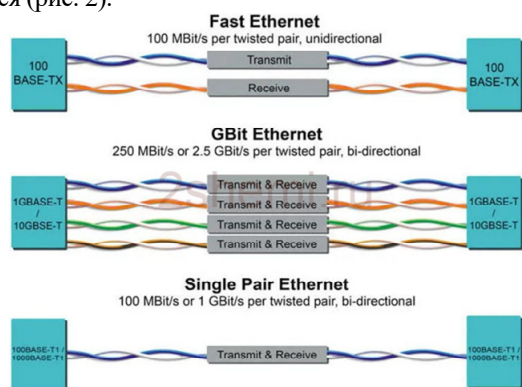


Рис. 2. Реалізація технології промислового Ethernet на основі кабелю з 4-х витих пар категорії 5е (верхні два рисунки) та SPE (нижній рисунок): при передачі сигналів зі швидкістю 100 Мбіт/с застосовується дві пари на прийом та передачу, дві – резервні; при передачі сигналів зі швидкістю 1 Гбіт/с та більше – чотири пари на прийом та передачу одночасно з ускладненим інтерфейсом [6]

Для мереж зі швидкістю передачі сигналів 1 Гбіт/с на відстань до 40 м конструкцію кабелю визначають такі стандарти: IEC 61156-11 – кабель передачі даних SPE із смугою пропускання до 600 МГц для стаціонарної установки [10]; IEC 61156-12 – кабель передачі даних SPE зі смугою пропускання до 600 МГц для гнучкої установки [10].

У порівнянні з традиційними промисловими кабелями категорії 5е з чотирма парами для передачі сигналів на відстань 100 м зі швидкістю до 1 Гбіт/с (рис. 2) при реалізації технології однопарного кабелю на основі виті пари спостерігається зменшення діаметра та ваги кабелю за умови забезпечення нормованих електричних параметрів передачі в діапазоні частоти до 600 МГц: коефіцієнту згасання, імпедансу, втрат на відбиття, та стійкості до зовнішніх електромагнітних перешкод, що обумовлює екрановану конструкцію виті пари [6, 13].

**Метою статті** є обґрунтування діапазону налаштувань технологічного обладнання для забезпечення нормованих значень коефіцієнту згасання та завадостійкості на підставі аналізу результатів вимірювань у широкому діапазоні частоти електричних параметрів екранованих та неекранованих кабелів для промислових операційних технологій.

**Огляд публікацій та постановка проблеми.** Наявність додаткових металевих екранів в конструкції

ції виті пари обумовлює зростання електричного опору провідників за рахунок ефекту близькості та, в більшій мірі, електричної робочої ємності, і, в цілому, коефіцієнту згасання, тобто дальності передачі широкомовних сигналів при підвищеному рівні завадостійкості кабелю [6, 16-24].

При числовому розрахунку двовірної моделі за умови незмінності по довжині часткової ємності кожного із ізольованих провідників та ємності екрану на землю виті пари показано, що в екранованому кабелі максимальна густина поверхневої енергії в 1,62 рази більша, ніж в неекранованому, та зосереджена, в основному, в ізоляції [25]. Результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними щодо ефективності екранованої фольгою та (або) облещенням виті пари в порівнянні з неекранованою у діапазоні частоти до 170 МГц [25, 26].

На підставі порівняння ємності неекранованих та екранованих витих пар категорії 5е доведено, що робоча ємність екранованих кабелів має підвищені значення [27, 28]. Авторами встановлено, що варіації товщини ізоляції, тобто робочої ємності, в більшій мірі впливають на коефіцієнт згасання в порівнянні з активним опором за умови однакових діаметрів провідників виті екранованої пари [27]. Дано рекомендації щодо збільшення товщини ізоляції провідників кабелів для забезпечення робочої ємності витих екранованих пар у діапазоні нормованих значень [25, 26].

У [29] показано, що збільшення товщини ізоляції на 50 % відносно радіуса провідника призводить до зменшення ємності ізольованого провідника на 20 %. Таке конструктивне рішення зумовлює зростання масогабаритних розмірів виті пари в цілому. Авторами обґрунтовано методологію синтезу конструкторсько-технологічних рішень, в тому числі ефективність застосування спіненої ізоляції, для регулювання ємності виті пари кабелів промислових мереж на технологічній стадії виготовлення ізольованого провідника.

Таким чином, впровадження сучасного промислового Ethernet стикається з проблемою досягнення компромісу між екрануванням та впливом екрану на робочу ємність для зменшення коефіцієнту згасання із забезпеченням передачі сигналів у широкій смузі частоти екранованими витими парами [30].

**Експериментальні дослідження впливу екрану на коефіцієнт згасання та завадостійкість витих пар.** Коефіцієнт згасання  $\alpha$  (дБ/м) – частотне-залежний параметр та залежить від активного опору  $R$  (сума опорів прямого та зворотного провідників) й індуктивності  $L$ , робочої ємності  $C$ , активної провідності ізоляції  $G$  (електрофізичних властивостей ізоляції – тангенсу кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ ) виті пари, скрученої з відповідним кроком  $h$  для підвищення завадостійкості [31]:

$$\alpha = 8,69 \cdot \left( \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = 8,69 \cdot \sqrt{C} \cdot \left( \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{L}} + \frac{\omega \cdot \text{tg}\delta}{2} \cdot \sqrt{L} \right). \quad (1)$$

Кабелі промислового Ethernet, зазвичай, виготовляються з мідного дроту діаметром 24 AWG (0,511 мм) [32] та ізоляції на основі кабельної композиції з високими діелектричними властивостями [33], у тому числі і поліетиленової [31].

Результати представлених електричних параметрів передачі витих пар усереднено для 10 і 85 вибірок бухт довжиною 305 м кожної неекранованих та екранованих (у загальному, алюмополіетиленовому фольгованому екрані) кабелів категорії 5е відповідно.

На рис. 3 наведено кореляційну залежність між робочою ємністю  $C$  витих пар неекранованих  $C_1$  та екранованих  $C_2$  зразків 4-х парних кабелів категорії 5е: екрановані кабелі мають більші значення робочої ємності за умови однакової товщини ізоляції. При цьому опори на постійному струмі прямого  $R_a$  та зворотного  $R_b$  провідників екранованих кабелів 2 (рис. 4) також мають більші значення у порівнянні з неекранованими 1 (рис. 4). І, як наслідок, у екранованих конструкціях спостерігаються більші значення коефіцієнту згасання  $\alpha$  (рис. 5).

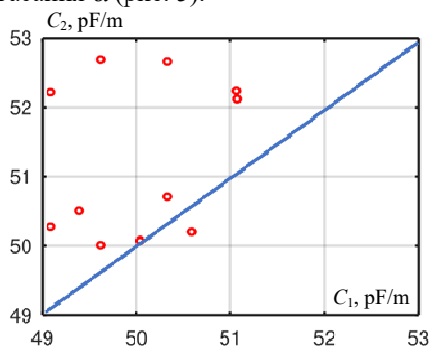


Рис. 3. Вплив екрану на робочу ємність кабелів категорії 5е неекранованого та екранованого виконання

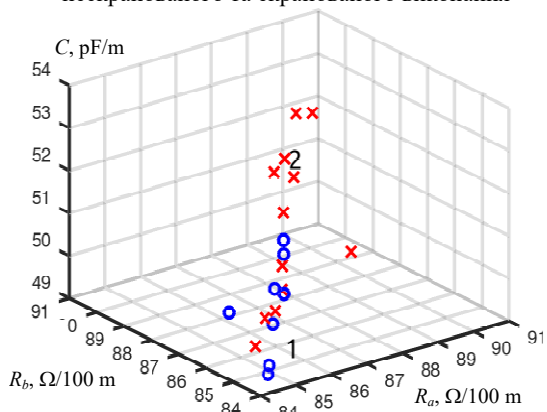


Рис. 4 Кореляційна залежність між опором провідників та робочою ємністю витих пар зразків неекранованих (1) та екранованих (2) кабелів

Виявляється (рис. 5), що коефіцієнт згасання неекранованих кабелів має менші значення тільки в діапазоні частоти від 1 МГц до 10 МГц (порівняйте рис. 5,а і рис. 5,б та рис. 6,а і рис. 6,б).

Провідники екранованих кабелів мають більші значення опорів при тих же діаметрах та допусках на діаметри. Це пов'язано з ефектом близькості екрана, що призводить до збільшення опору навіть постійному струмі.

Підвищені значення опору та ємності пар екранованого мережевого кабелю призводять до більших значень коефіцієнта згасання. Однак це справедливо тільки для області частоти, для яких глибина скін-шару ( $\Delta$ ) менше товщини ( $h$ ) екрана. В діапазоні частоти, для яких скін-шар і товщина екрана одного порядку, коефіцієнт згасання пар екранованого кабелю дорівнює  $\alpha$

неекранованим кабелів (рис. 4). Для наведених даних ефект впливу екрану на коефіцієнт згасання починає проявлятися для частоти більше 30 МГц: екранований кабель має менші значення коефіцієнту згасання (рис. 5,б). Для частоти від 10 МГц до 30 МГц значення коефіцієнтів згасання неекранованих та екранованих кабелів практично не відрізняються.

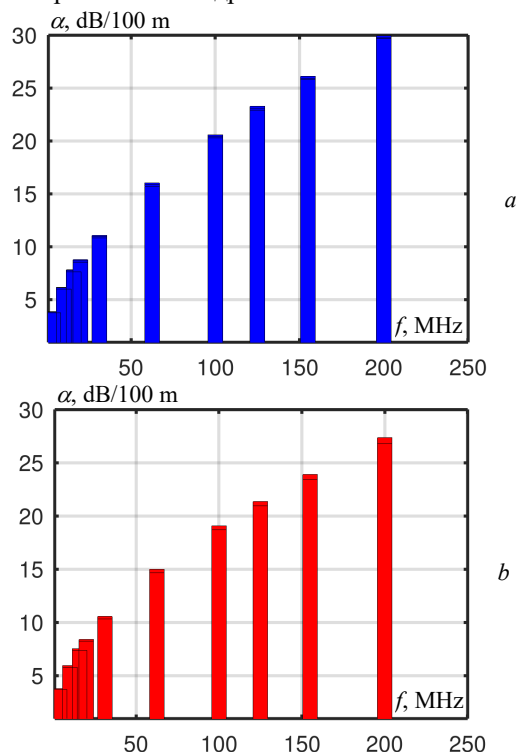


Рис. 5. Гістограми частотного розподілу коефіцієнту згасання неекранованого (а) та екранованого (б) кабелі з витими парами категорії 5е

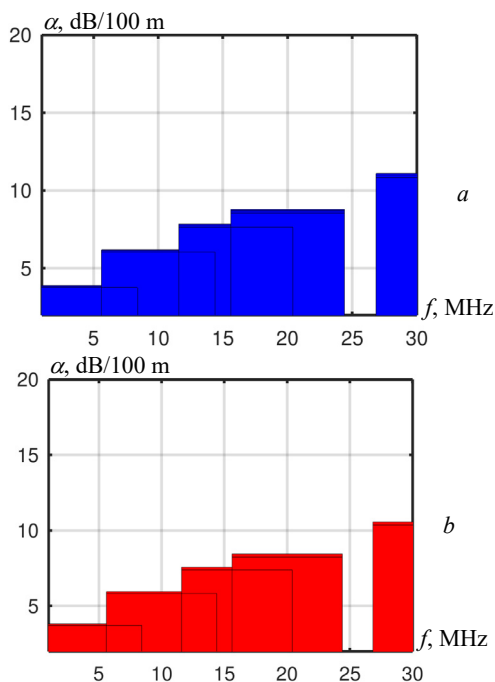


Рис. 6. Коефіцієнти згасання неекранованого (а) та екранованого (б) кабелів в спектрі частоти від 1 до 30 МГц

Зовнішні екрани, котрі накладають на осердя з 4-х пар впововж, виготовляються з металізованої алюмінієм тонкої полімерної плівки (алюмополіетиленової).



До складу плівкового екрану вводиться мідний дренажний провідник з полудою діаметром 0,5 мм. Він забезпечує електричну безперервність екрану при випадковому розриві металоплівкового екрану при прокладці, монтажі й експлуатації кабелю. Такий екран забезпечує надійне екранування від магнітної складової електромагнітної перешкоди. Ця перешкода проявляється в діапазоні високих частот. Можливе застосування додаткового екрану у вигляді обплетення. Він забезпечує захист пар кабелю від електричних перешкод, які проявляються в діапазоні низьких частот. Застосування двошарових екранів забезпечує надійне екранування у всьому діапазоні робочої частоти мережевого кабелю.

З результатами частотної залежності коефіцієнту згасання узгоджуються частотні залежності перехідного згасання на ближньому кінці (NEXT) неекранованого та екранованого кабелів (рис. 7):

$$NEXT = 20 \lg \left| \pi (h_i/h_j + 1) / \gamma_i h_i [1 + k(h_i/h_j + 1)/(h_i/h_j - 1)] \right|, (2)$$

де  $h_i, h_j$  – кроки скручування;  $\gamma_i$  – коефіцієнт поширення електромагнітних хвиль у витій парі  $i$  з меншим кроком скручування  $h_i$ , який визначається ( $\gamma = \alpha + j\beta$ ) електричними параметрами на відповідній круговій частоті  $\omega$   $|\gamma| = \sqrt{(R^2 + \omega^2 \cdot L^2) \cdot (G^2 + \omega^2 \cdot C^2)}$  – модуль, 1/м;  $b$  – коефіцієнт фази, рад/м;  $k = 0,2 - 0,8$  – коефіцієнт, що залежить від конструкції кабелю і розташування кіл, що взаємовпливають.

Електромагнітний зв'язок і параметри впливу визначаються взаємним розташуванням провідників пар в кабелі, кроком скручування, ступенем конструктивної однорідності та якістю матеріалів ізоляції [34-36]. При цьому електрична складова електромагнітного впливу пов'язана зі зміною по довжині товщини і діелектричної проникності ізоляції, взаємного розташування пар в кабелі. Магнітна – зі зміною діаметра провідників пари по довжині кабелю, відхиленнями в діаметрах прямого та зворотного провідників (омічна асиметрія), флуктуаціями кроку скручування пар провідників по довжині, неоднаковою відстанню між парами.

Співвідношення між електричною та магнітною складовими електромагнітного зв'язку визначається робочим діапазоном частоти кабелю. У діапазоні низьких частот (до 10 кГц) переважає електрична складова електромагнітного впливу. Цей вплив суттєвий лише між рядом розташованими парами. Для частоти понад 100 кГц вплив зумовлюється як електричною, так і магнітною складовими, для зменшення якого застосовуються різні кроки скручування витих пар в кабелі. У скрученому кабелі перехідне згасання пар буде різне за рахунок омічної та ємнісної асиметрій. Скручування пар з різними узгодженими кроками призводить до того, що робочі ємності та опори шлейфів скручених пар відрізняються між собою. Виникає ємнісна асиметрія – різниця робочої ємності витих пар та омічна – різниця опорів шлейфів  $R_s$  витих пар з різними кроками скручування та різними діаметрами:

$$\Delta C = (C_i - C_j) / (C_i + C_j); (3)$$

$$\Delta R = (R_{si} - R_{sj}) \cdot (R_{si} + R_{sj}), (4)$$

де  $R_s = R_a + R_b$  – опір шлейфу пари, що дорівнює сумі опорів прямого  $R_a$  та зворотного  $R_b$  провідників.

Опори  $R_a$  і  $R_b$  також відрізняються одне від одного. Різниця між ними – омічна асиметрія всередині пари обумовлена тільки різними діаметрами провідників.

Встановлено (рис. 4), що для прямого та зворотного провідників витих пар неекранованих та екранованих мережевих кабелів характерна позитивна кореляція. Тільки в цьому випадку забезпечується нормоване значення омічної асиметрії не більше 1 % від опору шлейфу, що гарантує захищеність кабелю від зовнішніх та внутрішніх (між парами) перешкод.

На рис. 7 наведено лінії рівня перехідного згасання для частоти 10 МГц як функція омічної та ємнісної асиметрій витих пар неекранованого (рис. 7,а) та екранованого (рис. 7,б) кабелів відповідно. На рис. 8 – для частоти 20 (а), 62,5 (б) та 100 (с) МГц неекранованого (1) та екранованого (2) зразків відповідно.

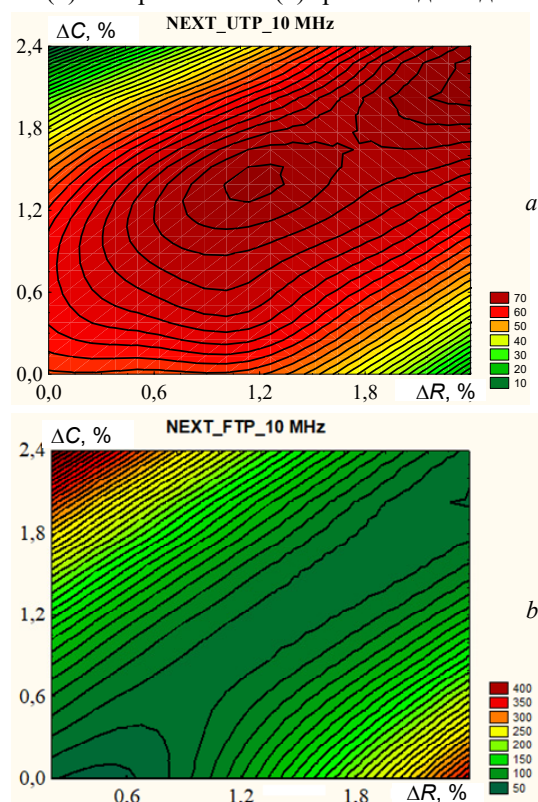


Рис. 7. Перехідне згасання на ближньому кінці для частоти 10 МГц в залежності від омічної та ємнісної асиметрій витих пар неекранованого (а) та екранованого (б) кабелів

Застосування екрану призводить до меншого розкиду та підвищення перехідного загасання у екранованих конструкціях кабелів (порівняйте криві 1 та 2 рис. 8).

Результати експериментальних досліджень доводять, що між омічною та ємнісною асиметріями існує значний позитивний кореляційний зв'язок. Так, коефіцієнт парної кореляції становить: **0,9735** – для неекранованого кабелю; **0,9257** – для екранованого кабелю. Значення коефіцієнту парної кореляції між асиметрією та перехідним згасанням на ближньому кінці варіюється для різних бухт (довжина кабелю в кожній бухті 305 м) (як приклад, вибірково, наведено нижче).

Для неекранованого кабелю:

- між омічною асиметрією та NEXT: **0,6683** – для першої; **0,9058** – для другої; **0,7871** – для третьої; **0,4990** – для четвертої;

- між емнісною асиметрією та NEXT: **0,6683** – для першої; **0,7256** – для другої; **0,5567** – для третьої; **0,2689** – для четвертої.

Для екранованого кабелю:

- між омичною асиметрією та NEXT: **0,9257**;  
- між емнісною асиметрією та NEXT: **0,5868**.

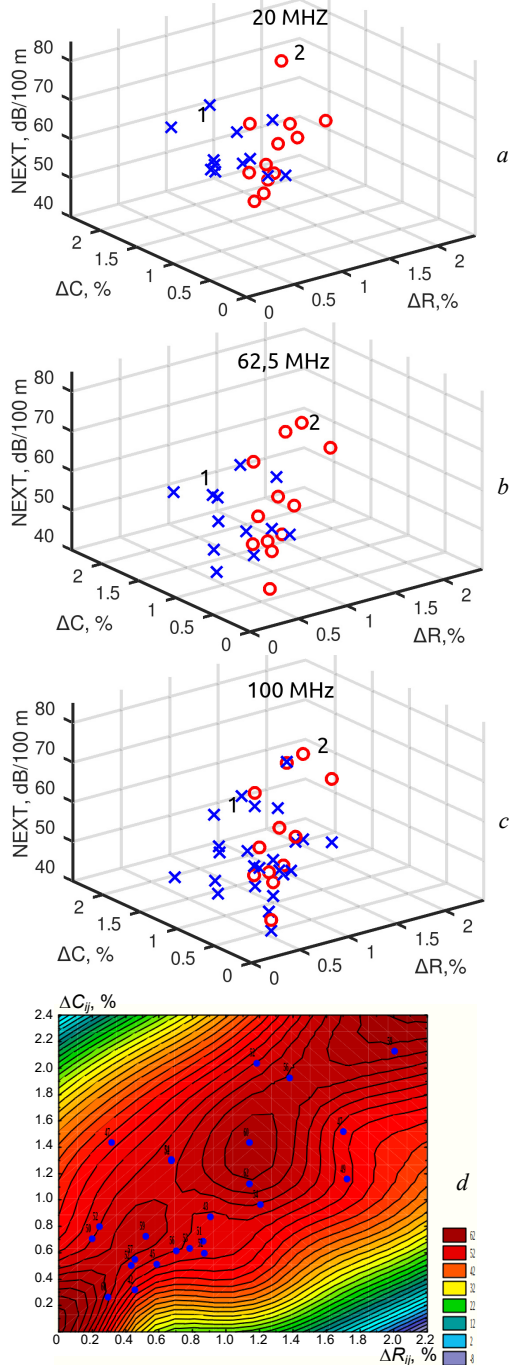


Рис. 8 Перехідне згасання витих пар неекранованих та екранованих кабелів (a-c) та неекранованого кабелю для частоти 100 МГц (d)

Таким чином, гарантування параметрів передачі (коефіцієнту згасання та завадостійкості) визначається налаштуваннями технологічного процесу для забезпечення геометричних параметрів та однорідності, перш за все, провідників витих пар.

Діапазони налаштувань технологічного обладнання при виготовленні витих пар з нормованими параметрами передачі. Кабелі виготовляються на

технологічному обладнанні, яке може зазнавати впливу випадкових збурюючих впливів. Кабель є довгомірним виробом, яке виготовляється «на прохід», в зв'язку з чим його геометричні параметри мають не постійні по довжині значення, тобто є нерегулярними.

Це призводить до зміння електричних параметрів передавання, що потребує введення системи автоматичного управління технологічним процесом виготовлення, перш за все, діаметром провідника для зменшення дисперсії даного параметра.

Стохастична модель технологічного процесу враховує адитивний (4) (рис. 9,a,b, криві 1 та 2) та мультиплікативний (5) (рис. 9,a,b, крива 3) характерні зміни діаметру  $d$  провідника від номінальних  $d_n$  (радіусу  $r_n$ ) значень в процесі накладання ізоляції

$$d = d_n \cdot \tilde{\epsilon}; \quad (4),$$

$$d = d_n \cdot (1 + \tilde{\epsilon}), \quad (5)$$

де  $\tilde{\epsilon}$  – випадкове число з нормальним законом розподілення.

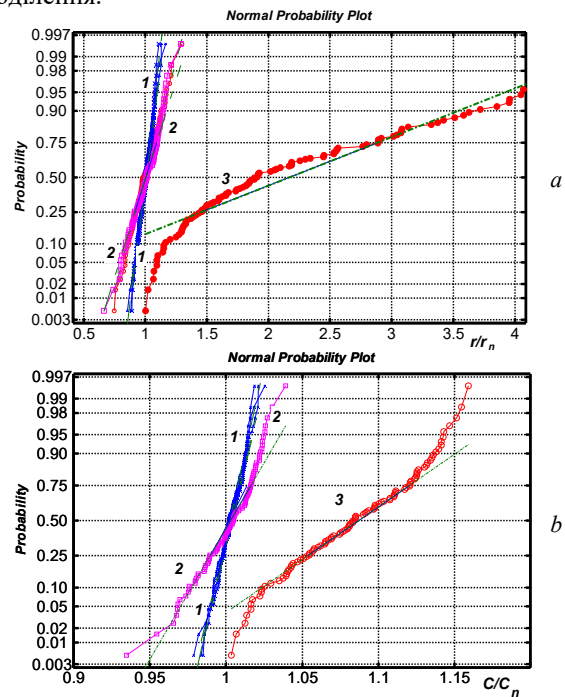


Рис. 9. Інтегральні функції розподілу відхилень від номінальних значень діаметру (радіусу) та електричної ємності ізольованого провідника у випадку мультиплікативного та адитивного характеру варіацій геометричних розмірів витой пари категорії 5е

Флуктуації діаметру  $d$  призводять також до зміни ємності  $C$  від номінальних значень  $C_n$  ізольованого провідника (рис. 9,b).

Адитивна завада (рис. 9,a,b, криві 1 та 2, рис. 10, криві 2 та 4) обумовлена зовнішніми чинниками, що впливають на технологічний процес, зокрема, нестаціонарним процесом в мережі живлення. Мультиплікативна (рис. 9,a,b, крива 3, рис. 10, криві 1 та 3) – випадковими змінюваннями у самому технологічному процесі.

На рис. 10 наведено вплив варіацій ємності ізольованого провідника на перехідне згасання на ближньому кінці між сусідніми парами. Криві відповідають: 1, 2 –  $\sigma/C = 0,1\%$  для мультиплікативного та адитивного характеру; 3, мультиплікативного –  $\sigma/C = 1\%$ ; 4, адитивного –  $\sigma/C = 1\%$  ( $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення).

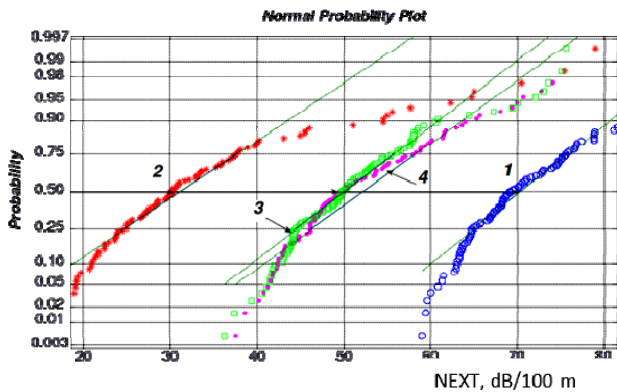


Рис. 10. Інтегральні функції розподілу перехідного згасання на ближньому кінці між сусідніми витими парами у випадку адитивного (криві 2, 4) та мультиплікативного (криві 1, 3) характеру варіацій ємності ізолюваного провідника

За однакових коефіцієнтів варіації  $\sigma/C = 0,1$  % розкид ємності становить 0,101 % та 10,1 % у випадку мультиплікативного (крива 1) та адитивного (крива 2) характеру її зміни (рис. 10) відповідно. В результаті перехідне згасання на рівні 50 % вірогідності в 2,33 рази менше, тобто рівень взаємних впливів між сусідніми парами більше (рис. 10, криві 1 та 2), при адитивному характері завади.

За однакових варіаціях ємності (криві 3 та 4, рис. 10) характер їх зміни практично не впливає на перехідне згасання.

Значення перехідного згасання для частоти 20 МГц – на рівні 70 дБ (рис. 8,а), в діапазоні частоти від 62,5 МГц до 100 МГц – на рівні 60 дБ (рис. 8,б,с).

#### Висновки.

Кореляційна залежність між опором провідників та робочою ємністю витих пар доводить більші значення електричних параметрів екранованих в порівнянні з неекранованими за умови однакової товщини ізоляції провідників 4-х парних кабелів категорії 5е.

Встановлено, що коефіцієнт згасання неекранованих кабелів має менші значення в діапазоні частоти від 1 МГц до 10 МГц. При більш високих значеннях частоти – навпаки: екрановані кабелі мають менші значення згасання. Для частоти 200 МГц – на 12 %, що може забезпечити передачу сигналів на більшу відстань.

На підставі визначеного сильного позитивного кореляційного зв'язку між омичною та ємнісною асиметріями доведено, що на перехідне згасання на ближньому кінці в найбільшій мірі впливає однорідність геометричних розмірів провідників витих пар. Більші значення коефіцієнту парної кореляції між омичною асиметрією та заводостійкістю для екранованого кабелю обумовлюють відповідні налаштування технологічного процесу при накладанні екрану.

Показано, що мультиплікативна завада, обумовлена випадковими змінами у стохастичному технологічному процесі, на рівні 50 % вірогідності може призводити до відхилення діаметру у 2 рази від номінального значення.

Для забезпечення нормованих значень заводостійкості витих пар у високочастотному діапазоні налаштування технологічного обладнання повинні гарантувати коефіцієнт варіації ємності ізолюваного провідника на рівні 0,3 %.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Siemens Simatic NET. PROFIBUS Network Manual. System Manual. Edition 04/2009, C79000-G8976-C124-03. 350 p.
2. 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, pp. 128-135. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7498099>.
3. Lawrenz W. (Ed.). *CAN System Engineering*. Springer London, 2013. 378 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5613-0>.
4. Thomas D.S. *The costs and benefits of advanced maintenance in manufacturing*. U.S. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology, 2018. 37 p. doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-18>.
5. 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>.
6. Fritsche M., Schmidt R., Engels Y. *Single pair Ethernet. The infrastructure for IIoT*. Harting Electronics GmbH, 2020, 10 p.
7. Manoj V., Nireesh J. Automotive Networks : A Review. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 2017, vol. 3, no. 5, pp. 504-509. doi: <https://doi.org/10.24001/ijaems.3.5.15>.
8. Matheus K., Königseder T. *Automotive Ethernet*. Cambridge University Press, 2014. 205 p. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107414884>.
9. Matheus K., Königseder T. *The physical transmission. In Automotive Ethernet*, Cambridge University Press, 2014, pp. 92-133. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107414884.006>.
10. 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*, 2016, 211 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7564011>.
11. Mortazavi S., Schleicher D., Schade F., Gremzow C., Grcfers F. Toward Investigation of the Multi-Gig Data Transmission up to 5 Gbps in Vehicle and Corresponding EMC Interferences. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 2018, pp. 60-65. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485142>.
12. Buntz S., Körber B., Bollati D. *IEEE 100BASE-T1 System Implementation Specification. Open Alliance. Version 1*. 2017, 28 p.
13. Oksman V., Strobel R., Starr T., Maes J., Coomans W., Kuipers M., Tovim E. Ben, Wei D. MGFAST: A New Generation of Copper Broadband Access. *IEEE Communications Magazine*, 2019, vol. 57, no. 8, pp. 14-21. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800844>.
14. Maes J., Nuzman C.J. The Past, Present, and Future of Copper Access. *Bell Labs Technical Journal*, 2015, vol. 20, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.15325/BLTJ.2015.2397851>.
15. Lamparter O., Fang L., Bischoff J.-C., Reitmann M., Schwendener R., Zasowski T., Zhang X. Multi-Gigabit over Copper Access Networks: Architectural Evolution and Techno-Economic Analysis. *IEEE Communications Magazine*, 2019, vol. 57, no. 8, pp. 22-27. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800847>.
16. *British Cables Company. Product range catalogue*. 2021, 136 p. Режим доступу: <https://britishcablescompany.com/Flip/PDF.pdf> (Дата звернення: 28.03.2022).
17. Knobloch A., Garbe H., Karst J.P. Shielded or unshielded twisted-pair for high speed data transmission? *1998 IEEE EMC Symposium. International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1998, vol. 1, pp. 112-117. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.1998.750069>.
18. Hejazi A.M., Stockman G.-J., Lefevre Y., Ginis V., Coomans W. Calculating Millimeter-Wave Modes of Copper Twisted-Pair Cables Using Transformation Optics. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 52079-52088. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070192>.
19. Беспрозванных А.В., Игнатенко А.Г. Влияние скрутки сердечника на параметры передачи сетевых кабелей. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2004, № 7, С. 82-87.
20. Schaich T., Subramaniam K., de Lera Acedo E., Al Rawi A. High Frequency Impedance Matching for Twisted Pair Cables. *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Con-*



ference, 2020, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322202>.

21. Беспрозванных А.В., Игнатенко А.Г. Косвенные оценки допусков на диаметры токопроводящих жил проводников витых пар сетевых кабелей. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2005, № 42, С. 47-52.

22. Yoho J.J., Riad S.M., Muqabel A.H. Measurement and causal modelling of twisted pair copper cables. *IET Science, Measurement & Technology*, 2021, vol. 15, no. 8, pp. 645-652. doi: <https://doi.org/10.1049/smt2.12065>.

23. Data communication technology. UTP vs STP. Shielded data cables make the grade. Unshielded data cables reach the limits of their performance. *LEONI Technical Bulletin*, 2015, 5 p.

24. Baghdadi B., Abdelber B., Alain R., Omar D., Helima S. Experimental study of the behaviour of the crosstalk of shielded or unshielded-pair cables in high frequency. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 311-324. doi: <https://doi.org/10.2298/SJEE1903311B>.

25. Hassoun F., Tarafi R., Zeddani, A. Calculation of per-unit-length parameters for shielded and unshielded twisted pair cables. *2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2006, pp. 250-253. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCZUR.2006.214917>.

26. Poltz J. Attenuation of screened twisted pairs. *Proceedings 66th International Cable and Connectivity Symposium (IWCS 2017)*, 2017, pp. 219-226.

27. Бойко А.М., Безпрозванных Г.В. Обґрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2011, № 3, С. 21-35.

28. Бойко А.Н. Дрейф во времени емкости и тангенса угла диэлектрических потерь неэкранированных и экранированных сетевых кабелей. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2013, № 42(948), С. 65-68.

29. Bezprozvannykh G.V., Kostiuikov I.A., Pushkar O.A. Synthesis of constructive-technological decisions of regulation of working capacitance of cables of industrial networks. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 1, pp. 44-49. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.1.07>.

30. Al-Asadi M., Duffy A.P., Hodge K.J., Willis A.J. Twisted Pair Cable Design Analysis and Simulation. *Proceedings of the 49th International Wire & Cable Symposium*, 2000, pp. 111-119.

31. Bezprozvannykh G.V., Ignatenko A.G. Optimization of the design of network cables by the attenuation coefficient in the tolerance zone of the geometric dimensions of the transmission parameters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2004, no. 2, pp. 8-10. (Rus).

32. *ASTM B258-18. Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors*. ASTM International, 2018, 5 p.

33. Kennefick D.J. FEP as a dielectric material for multi-gigabit, single pair Ethernet cable for automotive. *Proceedings of the 67th International Wire & Cable Symposium (IWCS)*, 2018.

34. Bezprozvannykh G.V., Pushkar O.A. Increasing noise immunity of cables for fire protection systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 54-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.07>.

35. 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, pp. 485-490. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2016.751696>.

36. Cai R., Yang S. Analysis and Calculation of Crosstalk for Twisted Communication Cables in Umbilical Cable. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 10, art. no. 3501. doi: <https://doi.org/10.3390/en15103501>.

#### REFERENCES

1. *Siemens Simatic NET. PROFIBUS Network Manual. System Manual. Edition 04/2009, C79000-G8976-C124-03*. 350 p.

2. 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, pp. 128-135. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7498099>.

3. Lawrenz W. (Ed.). *CAN System Engineering*. Springer London, 2013. 378 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5613-0>.

4. Thomas D.S. *The costs and benefits of advanced maintenance in manufacturing*. U.S. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology, 2018. 37 p. doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-18>.

5. 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>.

6. Fritsche M., Schmidt R., Engels Y. *Single pair Ethernet. The infrastructure for IIoT*. Harting Electronics GmbH, 2020, 10 p.

7. Manoj V., Nireesh J. Automotive Networks : A Review. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 2017, vol. 3, no. 5, pp. 504-509. doi: <https://doi.org/10.24001/ijaems.3.5.15>.

8. Matheus K., Königseder T. *Automotive Ethernet*. Cambridge University Press, 2014. 205 p. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107414884>.

9. Matheus K., Königseder T. *The physical transmission. In Automotive Ethernet*, Cambridge University Press, 2014, pp. 92-133. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107414884.006>.

10. 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*, 2016, 211 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7564011>.

11. Mortazavi S., Schleicher D., Schade F., Gremzow C., Gerfers F. Toward Investigation of the Multi-Gig Data Transmission up to 5 Gbps in Vehicle and Corresponding EMC Interferences. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 2018, pp. 60-65. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485142>.

12. Buntz S., Körber B., Bollati D. *IEEE 100BASE-T1 System Implementation Specification. Open Alliance. Version 1*. 2017, 28 p.

13. Oksman V., Strobel R., Starr T., Maes J., Coomans W., Kuipers M., Tovim E. Ben, Wei D. MGFAS: A New Generation of Copper Broadband Access. *IEEE Communications Magazine*, 2019, vol. 57, no. 8, pp. 14-21. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800844>.

14. Maes J., Nuzman C.J. The Past, Present, and Future of Copper Access. *Bell Labs Technical Journal*, 2015, vol. 20, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.15325/BLTJ.2015.2397851>.

15. Lamparter O., Fang L., Bischoff J.-C., Reitmann M., Schwendener R., Zasowski T., Zhang X. Multi-Gigabit over Copper Access Networks: Architectural Evolution and Techno-Economic Analysis. *IEEE Communications Magazine*, 2019, vol. 57, no. 8, pp. 22-27. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800847>.

16. *British Cables Company. Product range catalogue*. 2021, 136 p. Available at: <https://britishcablescompany.com/Flip/PDF.pdf> (accessed 28 March 2022).

17. Knobloch A., Garbe H., Karst J.P. Shielded or unshielded twisted-pair for high speed data transmission? *1998 IEEE EMC Symposium. International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1998, vol. 1, pp. 112-117. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.1998.750069>.

18. Hejazi A.M., Stockman G.-J., Lefevre Y., Ginis V., Coomans W. Calculating Millimeter-Wave Modes of Copper Twisted-Pair Cables Using Transformation Optics. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 52079-52088. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070192>.

19. Bezprozvannykh G.V., Ignatenko A.G. The influence of core twisting on the transmission parameters of network cables. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2004, no. 7, pp. 82-87. (Rus).

20. Schaich T., Subramaniam K., de Lera Acedo E., Al Rawi A. High Frequency Impedance Matching for Twisted Pair Cables. *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, 2020, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322202>.

21. Bezprozvannykh G.V., Ignatenko A.G. Indirect estimates of tolerances on the diameters of conductive conductors of twisted pair conductors of network cables. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2005, no. 42, pp. 47-52. (Rus).

22. Yoho J.J., Riad S.M., Muqabel A.H. Measurement and causal modelling of twisted pair copper cables. *IET Science, Measurement & Technology*, 2021, vol. 15, no. 8, pp. 645-652. doi: <https://doi.org/10.1049/smt2.12065>.

23. Data communication technology. UTP vs STP. Shielded data cables make the grade. Unshielded data cables reach the limits of their performance. *LEONI Technical Bulletin*, 2015, 5 p.
24. 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, pp. 311-324. doi: <https://doi.org/10.2298/SJEE1903311B>.
25. Hassoun F., Tarafi R., Zeddami, A. Calculation of per-unit-length parameters for shielded and unshielded twisted pair cables. *2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2006, pp. 250-253. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCZUR.2006.214917>.
26. Poltz J. Attenuation of screened twisted pairs. *Proceedings 66th International Cable and Connectivity Symposium (IWCS 2017)*, 2017, pp. 219-226.
27. Boyko A.M., Bezprozvannykh G.V. Justification of insulation thickness of twisted shielded pairs of structured cable systems. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no. 3, pp. 21-35. (Ukr).
28. Boyko A.N. Draff in the time of the capacity and tangent of the angle of dielectric losses of unexplored and shielded network cables. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no. 42(948), pp. 65-68. (Ukr).
29. Bezprozvannykh G.V., Kostiuikov I.A., Pushkar O.A. Synthesis of constructive-technological decisions of regulation of working capacitance of cables of industrial networks. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 1, pp. 44-49. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.1.07>.
30. Al-Asadi M., Duffy A.P., Hodge K.J., Willis A.J. Twisted Pair Cable Design Analysis and Simulation. *Proceedings of the 49th International Wire & Cable Symposium*, 2000, pp. 111-119.
31. Bezprozvannykh G.V., Ignatenko A.G. Optimization of the design of network cables by the attenuation coefficient in the tolerance zone of the geometric dimensions of the transmission parameters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2004, no. 2, pp. 8-10. (Rus).
32. *ASTM B258-18. Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors*. ASTM International, 2018, 5 p.
33. Kennefick D.J. FEP as a dielectric material for multi-gigabit, single pair Ethernet cable for automotive. *Proceedings of the 67th International Wire & Cable Symposium (IWCS)*, 2018.
34. Bezprozvannykh G.V., Pushkar O.A. Increasing noise immunity of cables for fire protection systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 54-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.07>.
35. 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, pp. 485-490. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2016.7571696>.
36. Cai R., Yang S. Analysis and Calculation of Crosstalk for Twisted Communication Cables in Umbilical Cable. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 10, art. no. 3501. doi: <https://doi.org/10.3390/en15103501>.

Надійшла (Received) 30.08.2022  
 Прийнята (Accepted) 09.10.2022  
 Опублікована (Published) 01.07.2023

Безпрозванных Ганна Вікторівна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Пушкар Олег Анатолійович<sup>2</sup>, ген. директор, аспірант,

<sup>1</sup> Національний технічний університет  
 «Харківський політехнічний інститут»  
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,  
 e-mail: Hanna.Bezprozvannukh@kphi.edu.ua (Corresponding author)  
<sup>2</sup> ТОВ «НВП «Алай»,  
 03182, Київ, вул. Миру, 19-У,  
 e-mail: adm@alay.com.ua

#### How to cite this article:

Bezprozvannykh G.V., Pushkar O.A. Ensuring standardized parameters for the transmission of digital signals by twisted pairs at the technological stage of manufacturing cables for industrial operating technologies. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 4, pp. 57-64. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.4.09>

G.V. Bezprozvannykh<sup>1</sup>, O.A. Pushkar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> LLC SPE ALAY,

19-U, Miru Str., Kyiv, 03182, Ukraine.

#### Ensuring standardized parameters for the transmission of digital signals by twisted pairs at the technological stage of manufacturing cables for industrial operating technologies.

**Introduction.** In production control and control systems, buildings use many simple devices - sensors to detect light, heat, movement, smoke, humidity and pressure, mechanisms for activation and control of switches, closing devices, alarm, etc. - «operating technologies» (OT). Different communication protocols and field tire technologies, such as Modbus for conditioning systems, Bacnet for access control and Lonworks for lighting, have been traditionally used and used for their connection. Network fragmentation leads to the need to use gateways to transform protocols when creating a single automation system, which complicates the implementation of complex control systems for any object. At the same time, information networks are unified, but the Ethernet protocol used in them for operating technologies for various reasons (technological, cost) has not been widespread. Due to its high bandwidth compared to existing field tire networks, industrial Ethernet is significantly capable of increasing flexibility in the implementation of additional functions in OT. Modern industrial Ethernet networks are based on non-shielded and shielded twisted pair category 5e cables. The presence of additional metal screens in the structure of twisted pair causes the increase in electrical resistance of conductors due to the effect of closeness, the electrical capacity, and the ratio of attenuation in the range of transmission of broadband signals. **Purpose.** Substantiation of the range of settings of technological equipment to ensure standardized values of the extinction coefficient and immunity based on the analysis of the results of measurements in a wide frequency range of electrical parameters of shielded and unshielded cables for industrial operating technologies. **Methodology.** Experimental studies have been performed for statistically averaged electrical parameters of the transmission of pairs for 10 and 85 samples of 305 meters long and shielded cables of category 5e, respectively. It is determined that in the frequency range from 1 to 10 MHz, unshielded cables have less values of the attenuation coefficient. In the range of more than 30 MHz, the shielded cables have smaller values of the attenuation due to the influence of the alumopolymer tape screen. It is established that the coefficient of paired correlation between asymmetries of resistance and capacity of twisted pairs is 0,9735 - for unshielded and 0,9257 - for shielded cables. The impact has been proven to a greater extent asymmetry of resistance the pairs on the increasing noise immunity of cables. The influence noise interference on the deviation of the diameter and electrical capacity of the isolated conductor from the nominal values in the stochastic technological process is analyzed. The strategy of technological process settings to ensure the attenuation and the noise immunity in the high-frequency range is substantiated. **Practical value.** Multiplicative interference, caused by random changes in the stochastic technological process, can lead to a deviation of diameter 2 times from the nominal value at level of probability at 50 %. The equipment settings of the technological equipment must guarantee the coefficient of variation capacity of the insulated conductor at 0.3 % for high level of noise immunity. References 36, figures 10.

**Key words:** industrial Ethernet, twisted pair, ratio of attenuation, noise immunity, ohmic and capacitive asymmetry, stochastic technological process, additive and multiplicative interference, coefficient of variation.