

Г.В. Безпрозванних, О.А. Пушкар

## ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ КАБЕЛІВ ДЛЯ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ

*Наведено частотні залежності перехідного загасання на ближньому кінці в 10, 30 та 4-х парних симетричних кабелях. Експериментально доведено, що скручування кожної пари з різними кроками забезпечує більш високий рівень завадостійкості кабелів на основі витих пар. Застосування загального екрану призводить до зменшення електромагнітних впливів між витими парами кабелю. Діапазон значень перехідного затухання на ближньому кінці на верхній робочій частоті 100 МГц становить 44 – 54 дБ та 46 – 58 дБ для неекранованого та екранованого кабелів з витими парами відповідно. Ефект зростання коефіцієнту загасання та більший розкид параметрів впливу обумовлює більш жорсткі вимоги до щільності конструкції та налаштувань технологічного процесу виготовлення екранованих кабелів. Бібл. 12, рис. 8.*

**Ключові слова:** системи протипожежного захисту, електромагнітний вплив, перехідне загасання на ближньому кінці, кручені пари, неекранований і екранований кабелі, коефіцієнт загасання.

*Приведены частотные зависимости переходного затухания на ближнем конце в 10, 30 и 4-х парных симметричных кабелях. Экспериментально показано, что скрутка каждой пары с разными шагами обеспечивает более высокий уровень помехоустойчивости кабелей на основе витых пар. Применение общего экрана приводит к уменьшению электромагнитных влияний между витыми парами кабеля. Диапазон значений переходного затухания на ближнем конце на верхней рабочей частоте 100 МГц составляет 44 – 54 дБ и 46 – 58 дБ для неэкранированного и экранированного кабелей с витыми парами соответственно. Эффект роста коэффициента затухания и больший разброс параметров влияния обуславливают более жесткие требования к плотности конструкции и настройкам технологического процесса изготовления экранированных кабелей. Библ. 12, рис. 8.*

**Ключевые слова:** системы противопожарной защиты, электромагнитное влияние, переходное затухание на ближнем конце, витые пары, неэкранированный и экранированный кабели, коэффициент затухания.

**Вступ.** Системи протипожежного захисту та пожежної сигналізації розширилися від досить простих електромеханічних пристроїв до сучасних мікропроцесорних технологій, які в значній мірі чутливі до електромагнітних завад. Незалежно від пристроїв, що застосовуються, системи протипожежного захисту використовують різні інтерфейси пристроїв зв'язку. Сучасні технічні засоби таких систем здатні працювати на швидкостях передачі даних від десятків до сотень кБіт/с зі складовими цифрового сигналу в спектрі частот до декількох десятків МГц. Для передачі широкополосних цифрових сигналів необхідна відповідна кабельна інфраструктура, що повинна забезпечити високі вимоги до завадостійкості при передачі сигналів по кабелях [1, 2]. Основу такої інфраструктури становлять сучасні симетричні кабелі на основі витих пар [1, 2]. Скручування провідників в пари проводиться з метою підвищення ступеня зв'язку між собою провідників однієї пари і подальшого зменшення електромагнітних перешкод від зовнішніх джерел, а також взаємних наведень при передачі диференціальних сигналів [3, 4].

Кабелі категорії 5e з мідними провідниками широко застосовуються в системах протипожежного захисту, структурованих кабельних системах [3, 4] і забезпечують передачу цифрових сигналів в спектрі частот до 100 МГц [5].

В міру зростання швидкості передачі разом з потребами в забезпеченні цифрових сигналів зростають завади, як всередині кабелю, так і ззовні [5, 6]. Зменшення рівня електромагнітних завад досягається завдяки принципу збалансованої передачі сигналів по парі витих проводів [5, 6].

Для симетричної (збалансованої) пари принципово важлива властивість симетричності, тобто одна-

кові фізичні та електричні властивості прямого та зворотного провідників. В іншому випадку значно зростають струми та напруги перешкод, що виникають в парі. Суть симетричності полягає в тому, що струми та напруги, які наводяться, мають практично однакові амплітуди та протилежні фази, тобто компенсують один одне. Ряд важливих параметрів кабелів пов'язано з механізмом взаємних впливів між парами. Перехідні перешкоди є основним джерелом шумів, які знижують якість передачі сигналів по кабелю. Актуальність цієї проблеми постійно зростає, адже перехідні перешкоди зростають зі збільшенням швидкості передачі сигналів, а значить, і частоти [5, 6].

**Постановка проблеми.** Для характеристики завадостійкості кабелів застосовуються параметри взаємного впливу, зокрема, перехідне загасання на ближньому кінці (NEXT – Near End CrossTalk) [5, 6]. Параметри впливу характеризують частку електромагнітної енергії сигналу, яка переходить в електромагнітне випромінювання. Перехід електромагнітної енергії з однієї пари в іншу пов'язано з електромагнітною взаємодією між парами кабелю [5-8].

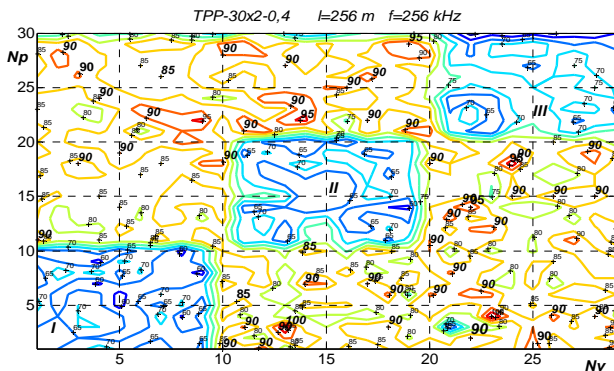
Параметр NEXT залежить від конструкції кабелю: кількості пар (рис. 1), кроків скрутки, флуктуацій геометричних розмірів струмопровідних жил та товщині ізоляції відносно нормованих значень в межах допусків [8-11].

На рис. 1 наведено перехідне загасання на ближньому кінці у вигляді ліній рівня в 30-и парному (рис. 1,а) та 10-и парному (рис. 1,б) екранованих симетричних кабелях однакової довжини на частоті 256 кГц:  $N_v$  – пара, що впливає (джерело завади);  $N_p$  – пара, на яку впливають (приймач завади).

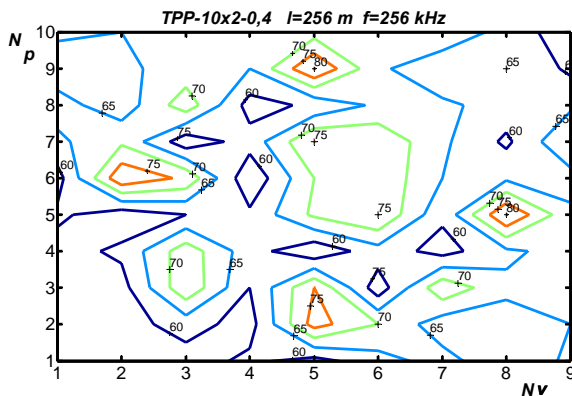
© Г.В. Безпрозванних, О.А. Пушкар

Для 30-и парного кабелю параметри впливу чітко розділяються на три групи (позначено цифрами *I*, *II*, *III*) (рис. 1,а), в межах яких перехідне загасання на ближньому кінці для рядом розташованих пар – найменше і становить 65 дБ, тобто взаємні впливи – найбільші. Для пар з різних груп (найбільш віддалених) – перехідне загасання досить високе: сягає 90 і навіть 100 дБ.

Для 10-ти парного кабелю (рис. 1,б) параметри впливу – більші. Найменше значення перехідного загасання становить 60 дБ (наприклад, між парами 5 – 1 та 8 – 7); найбільше – 80 дБ (між парами 5 – 9).



а



б

Рис. 1. Вплив конструктивного виконання симетричних кабелів на перехідне загасання на ближньому кінці

Причина цього полягає в тому, що в такому кабелі пари розташовані близько одна до одної. Крок скрутки в 5-ти парах – один, однаковий для цих пар, в інших 5-ти – інший (узгоджений), але також однаковий для цих 5-ти пар.

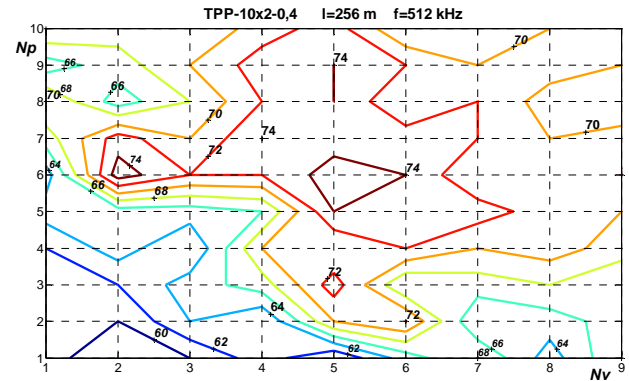
При зростанні частоти перехідне загасання на ближньому кінці зменшується (рис. 2), тобто рівень завад зростає.

**Метою статті** є обґрунтування шляхів підвищення заводськості кабелів на основі витих пар для сучасних систем протипожежного захисту з можливістю передачі цифрових сигналів в спектрі частот до 100 МГц.

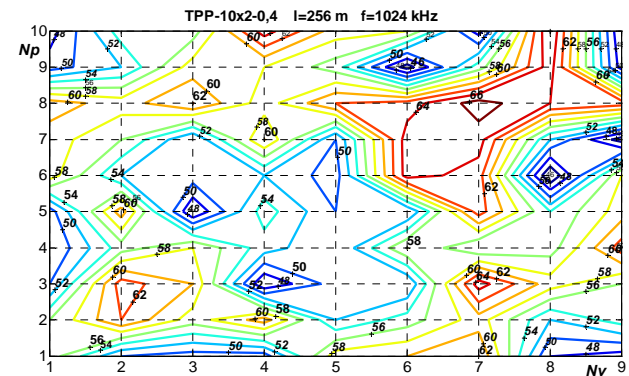
**Вплив кроку скручування пар кабелю на перехідне загасання на ближньому кінці.** Для зменшення електромагнітного впливу в високочастотному діапазоні між парами в кабелі обов'язково застосовується скручування пар провідників з різними узгодженими кроками [8]

$$\frac{h_i}{h_j} = \frac{2v \pm 1}{2w}, \quad (1)$$

$h_i, h_j$  – кроки скруток пар,  $v$  і  $w$  – цілі позитивні числа.



а) частота 512 кГц



б) частота 1024 кГц

Рис. 2. Динаміка зміни перехідного загасання на ближньому кінці від частоти в багатопарному симетричному кабелі

При скручуванні пар в кабелі ідеальної конструкції при забезпеченні стабільності кроку скручування на всій довжині електрична і магнітна складові впливу змінюють свій знак на протилежний при незмінно-му їх значенні по модулю.

Перехідне загасання на ближньому кінці в цьому випадку помітно підвищується (крива 3, рис. 3) і складається з перехідного загасання між не скрученими парами (крива 1) і додаткового перехідного загасання за рахунок скручування провідників пари (крива 2, рис. 3).

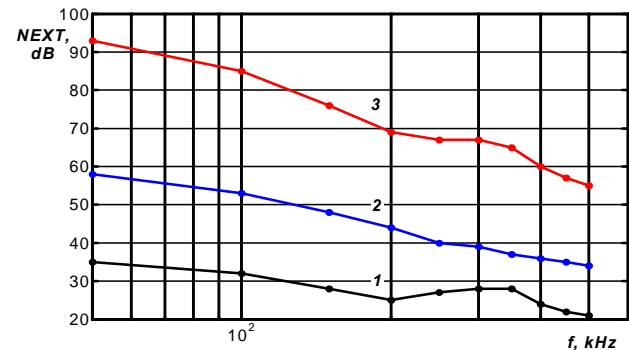


Рис. 3. Вплив скручування провідників на перехідне загасання на ближньому кінці в симетричній парі

Перехідне загасання для скручених пар тим більше, чим менше крок скрутки

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

де  $\gamma_j$  – коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі (сигналу) в парі з найменшим кроком, в якій визначається перехідне загасання,  $k = 0,2 \div 0,8$  – коефіцієнт, що залежить від конструкції кабелю і розташування пар.

У кабелі, що складається з  $N$  скручених пар, загальне число комбінацій ланцюгів  $N_v$ , що впливають один на одне, становить [8]

$$N_v = 2 \sum_{n=1}^{N-1} (N - n). \quad (2)$$

Так, в неекранованому кабелі з 4-ма неекранованими парами загальна кількість ланцюгів, що впливає, дорівнює 12, при цьому 6 з них – інверсні: їх вплив ідентичний прямому впливу. Кількість ланцюгів, що впливає, становитиме 6 (рис. 4). В такому випадку в кабелі спостерігається 6 значень перехідного загасання на ближньому кінці (рис. 5). В 30-и парному (рис. 1,а) – 435, в 10-и парному (рис. 1,б) – 45.

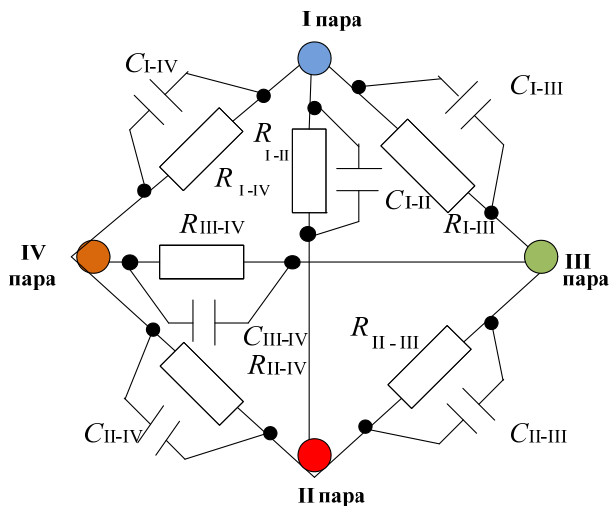


Рис. 4. Ємнісні ( $C_{I-II}$ ,  $C_{I-III}$ ,  $C_{I-IV}$ ,  $C_{II-III}$ ,  $C_{II-IV}$ ,  $C_{III-IV}$ ) та активні ( $R_{I-II}$ ,  $R_{I-III}$ ,  $R_{I-IV}$ ,  $R_{II-III}$ ,  $R_{II-IV}$ ,  $R_{III-IV}$ ) складові електромагнітних впливів в 4-х парному неекранованому кабелі

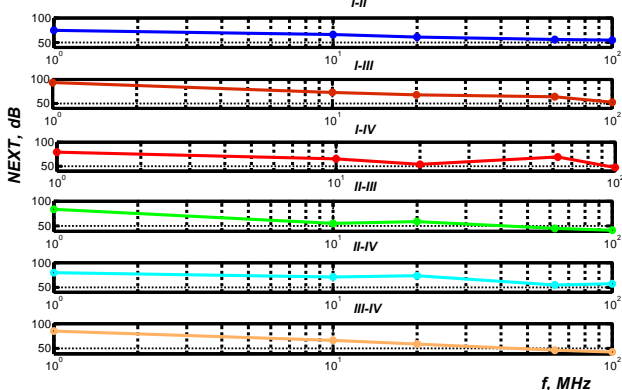


Рис. 5. Експериментальні частотні залежності перехідного загасання на ближньому кінці в 4-х парному неекранованому кабелі довжиною 100 м

Скручування кожної пари з різними узгодженими кроками забезпечує більш високий рівень перехідного загасання на ближньому кінці між парами в 4-х парному неекранованому кабелі в порівнянні з екра-

нованим симетричним 10-и парним кабелем (порівняйте значення NEXT для частоти 1 МГц на рис. 6 та рис. 2,б). Крок скрутки в кабелях на основі витих пар знаходиться в діапазоні від 10 до 25 мм, що, принаймні, в 10 разів менше, ніж в багатопарних симетричних кабелях [8].

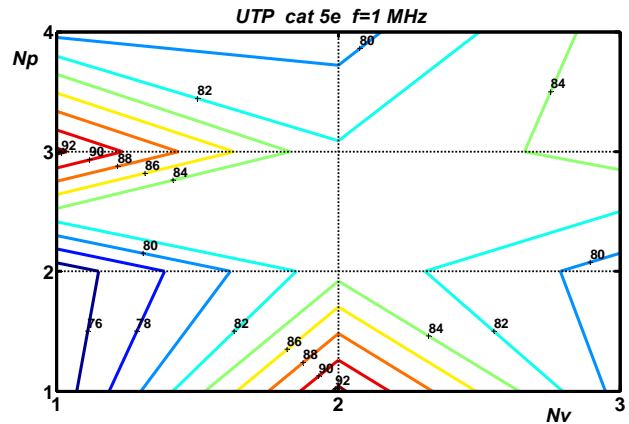


Рис. 6. Лінії рівня перехідного загасання на ближньому кінці в неекранованому 4-х парному кабелі на частоті 1 МГц

Порівняння значень перехідного загасання на одній частоті двох кабелів різної довжини цілком коректно. Для довгої лінії в області високої частоти

$$\alpha \cdot l > 6,5 \text{ dB},$$

(де  $\alpha$  – коефіцієнт загасання сигналу при розповсюдженні в кабелі (дБ/м) довжиною  $l$  (м)), перехідне загасання на ближньому кінці практично не залежить від довжини лінії (кабелю), а залежить тільки від частоти [8]. Це пов'язано з тим, що струми завад з окремих ділянок приходять на ближній кінець приймача завади настільки слабкими, що практично не збільшують взаємного впливу між парами.

**Ефективність екранування та вплив екрана на коефіцієнт загасання кабелю.** Для підвищення перехідного загасання, зниження рівня власного електромагнітного випромінювання кожної скрученої пари та підвищення перешкодозахищеності кабелю в залежності від умов експлуатації застосовують екранування [5, 10, 12]:

- загальне екранування 4-х кручених пар;
- індивідуальне екранування кожної пари без загального екранування всіх 4-х пар;
- індивідуальне екранування кожної пари з загальним екрануванням всіх 4-х пар.

Найбільш розповсюджена конструкція кабелів – із загальним екраном для 4-х кручених пар [5, 10] для діапазону робочих частот 100 МГц. Зовнішні екрани, що накладають на сердечник з 4-х пар подовжньо, виготовляються з металізованої алюмінієм тонкої полімерної плівки (алюмополіетиленової). До складу плівкового екрану вводиться луджений мідний або оцинкований дренажний провідник діаметром 0,5 мм, що забезпечує електричну безперервність екрана 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 екрана у вигляді облещення, що забезпечує захист пар кабелю від електричних перешкод, які проявляються в діапазоні більш низьких частот. Застосування двошарових екранів забезпечує надійне екранування у всьому діапазоні робочих частот кабелю [5].

Екранування приводить до підвищення перешкодозахищеності кабелів, що підтверджується результатами вимірювань перехідного загасання на ближньому кінці неекранованого (рис. 7,а) та екранованого (рис. 7,б) кабелів однакової довжини 100 м для частоти 100 МГц.

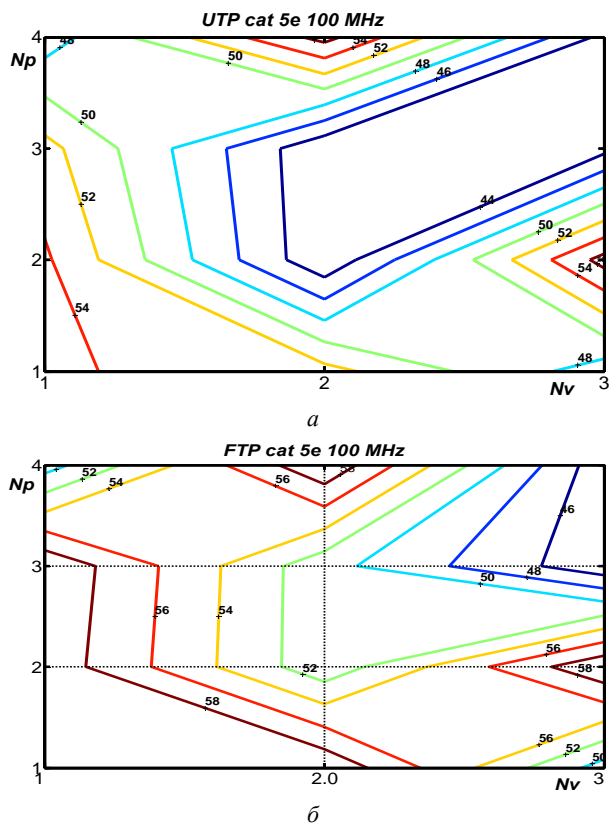


Рис. 7. Ефективність екранування кабелів на основі кручених пар в високочастотному діапазоні

Разом з тим, наявність екрану в конструкції кабелю впливає на первинні параметри передачі: активний опір  $R$  провідників пари, робочу ємність  $C$ , індуктивність  $L$ , активну провідність ізоляції  $G$  і, як наслідок, на вторинні параметри передачі: хвильовий опір  $Z$  й коефіцієнт загасання  $\alpha$  (див. формулу (3), (рис. 8)) при тих же діаметрах провідників, товщині ізоляції та допусках, що і в неекранованому кабелі [10, 11].

$$\alpha = 8,69 \cdot \left( \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \text{ дБ/м.} \quad (3)$$

Зростання коефіцієнту загасання 4-х витих пар екранованого кабелю (рис. 8, крива 3) в порівнянні з неекранованим (рис. 8, крива 2) у всьому діапазоні робочих частот, що обумовлено більшими значеннями опору провідників пар та робочої ємності за рахунок прояву ефекту близькості екрана, зменшує запас відносно верхньої границі значень коефіцієнту загасання (рис. 8, крива 1) в експлуатації кабелів.

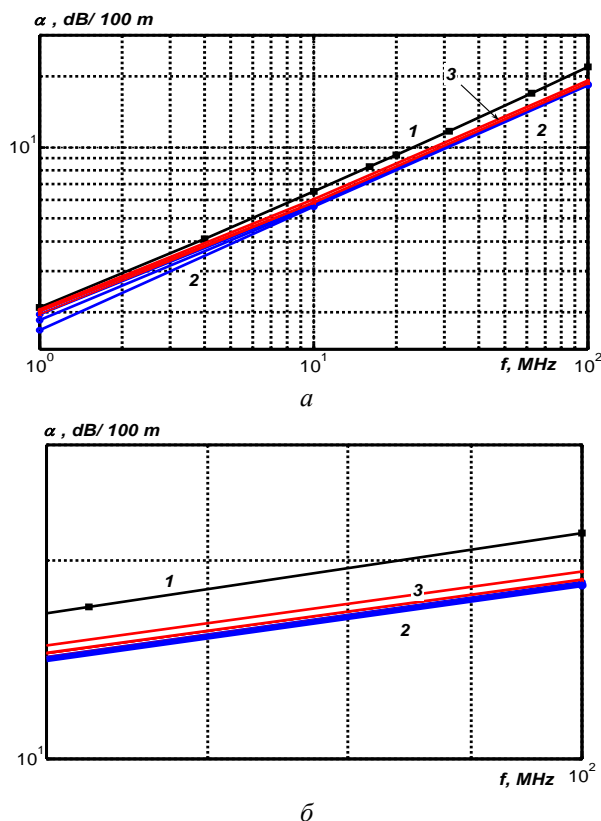


Рис. 8. До впливу екранування на коефіцієнт загасання в діапазоні робочих частот кабелів на основі витих пар

Застосування кабелів з екранами вимагає обов'язкового і якісного заземлення. При ненадійному заземленні струми завад будуть багаторазово протікати по екрану, частково відбиваючись на його кінцях і випромінюючи електромагнітні хвилі в простір. В такому випадку екран стає вторинним джерелом випромінювання – своєрідною антеною [5, 6, 12]. У такому випадку не тільки захист виті пари від впливу зовнішніх джерел буде неефективним, але і значно збільшиться електромагнітний вплив кабелю на інші, прокладені поруч, кабелі та різні електронні пристрої, що перебувають у тому ж приміщенні системи протипожежного захисту.

#### Висновки.

Експериментально доведено, що скручування кожної пари з різними узгодженими кроками забезпечує більш високий рівень завадостійкості в 4-х парному неекранованому кабелі в порівнянні з екранованим симетричним багатопарним кабелем за умови однакової частоти.

Застосування загального екрану призводить до зменшення електромагнітних впливів між витими парами кабелю. Діапазон значень перехідного загасання на ближньому кінці на верхній граничній робочій частоті 100 МГц становить 44 – 54 дБ та 46 – 58 дБ для неекранованого та екранованого кабелів з витими парами, кроки скручування у котрих однакові.

Ефект зростання коефіцієнту загасання та більший розкид параметрів впливу обумовлюють більш жорсткі вимоги до щільності конструкції та налаштувань технологічного процесу виготовлення екранованих кабелів з витими парами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pigan R., Metter M. *Automating with PROFINET: Industrial Communication Based on Industrial Ethernet*. – John Wiley & Sons Publ., 2015. – 462 p.
2. Belous A., Saladukha V. *High-Speed Digital System Design: Art, Science and Experience*. – Springer Nature Publ., 2019. – 933 p.
3. Catalog Nexans. *Cables for alarm and safety systems*. – 2018. – 16 p.
4. International Standard ISO/IEC 11801. *Information Technology – Generic cabling for customer premises. Part 2: Office premises*. – 2017. – 24 p.
5. Penttinen Jyrki T.J. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. – John Wiley & Sons Publ., 2015. – 1008 p.
6. Weston David A. *Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement*. – CRC Press, 3rd Edition, 2016. – 1160 p.
7. Solak V., Efendioglu H.S., Colak B., Garip M. Analysis and simulation of cable crosstalk. *IEEE IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkey)*, 24-27 Sept. 2017, Ankara, Turkey, pp 1-4. doi: **10.1109/EMCT.2017.8090354**.
8. Беспрозванных А.В., Игнатенко А.Г. Влияние скрутки сердечника на параметры передачи сетевых кабелей. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 2004, № 7, С. 82-87.
9. 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.
10. Бойко А.М., Беспрозванных Г.В. Обгрунтування товщини ізоляції витих екранованих пар структурованих кабельних систем. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 2011, № 3, С. 21-35.
11. Беспрозванных А.В., Игнатенко А.Г. Косвенные оценки допусков на диаметры токопроводящих жил проводников витых пар сетевых кабелей. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 2005, № 42, С. 47-52.
12. Baltag O., Rosu G., Rau M.C. Magnetic field of parallel and twisted wire pairs. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017, pp. 324-329. doi: **10.1109/atec.2017.7905020**.

## REFERENCES

1. Pigan R., Metter M. *Automating with PROFINET: Industrial Communication Based on Industrial Ethernet*. John Wiley & Sons Publ., 2015. 462 p.
2. Belous A., Saladukha V. *High-Speed Digital System Design: Art, Science and Experience*. Springer Nature Publ., 2019. 933 p.
3. Catalog Nexans. *Cables for alarm and safety systems*. 2018. 16 p.
4. International Standard ISO/IEC 11801. *Information Technology – Generic cabling for customer premises. Part 2: Office premises*. 2017. 24 p.
5. Penttinen Jyrki T.J. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. John Wiley & Sons Publ., 2015. 1008 p.
6. Weston David A. *Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement*. CRC Press, 3rd Edition, 2016. 1160 p.
7. Solak V., Efendioglu H.S., Colak B., Garip M. Analysis and simulation of cable crosstalk. *IEEE IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkey)*, 24-27 Sept. 2017, Ankara, Turkey, pp 1-4. doi: **10.1109/EMCT.2017.8090354**.

8. Bezprozvannyh 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).
9. Bezprozvannyh 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).
10. Boyko AM, Bezprozvannyh 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).
11. Bezprozvannyh 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).
12. Baltag O., Rosu G., Rau M.C. Magnetic field of parallel and twisted wire pairs. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017, pp. 324-329. doi: **10.1109/atec.2017.7905020**.

Надійшла (received) 22.05.2020

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

<sup>1</sup> Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,  
тел/phone +380 57 707 60 10,  
e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> ТОВ «Алай»,  
03061, Київ, пр. Відрадиний, 95 А2, офіс 202

G.V. Bezprozvannyh<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> Company «Alay»,  
95 A2, office 202, Otradny Ave., Kyiv, 03061, Ukraine.

#### Increasing noise immunity of cables for fire protection systems.

**Introduction.** Technical means of fire protection systems are capable of operating at data rates from tens to hundreds of Kbit/s with components of a digital signal in the frequency spectrum up to several tens of MHz. Appropriate cable infrastructure with a high level of noise immunity is required to transmit broadband digital signals. **Purpose.** Substantiation of ways to increase noise immunity of cables based on twisted pairs for modern fire protection systems with the ability to transmit digital signals in the frequency spectrum up to 100 MHz. **Methodology.** A comparison is made of the influence of the twisting step of pairs in unshielded 4-pair and multi-pair shielded balanced cables on the parameters of electromagnetic effects. It has been experimentally shown that twisting each pair with different steps provides a higher level of noise immunity of cables based on twisted pairs. **Practical value.** The frequency dependencies of the near end crosstalk in 10-, 30- and 4-pair balanced cables are shown. The influence of the common shield on the attenuation coefficient of the shielded 4-pair cable is established. References 12, figures 8.

**Key words:** fire protection systems, electromagnetic influence, near end crosstalk, twisted pairs, unshielded and shielded cables, attenuation coefficient.