

Г.В. Безпрозваних, І.О. Костюков, О.А. Пушкар

СИНТЕЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ РЕГУЛЮВАННЯ РОБОЧОЇ ЄМНОСТІ КАБЕЛІВ ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖ

Доведено більшу чутливість регулювання технологічного процесу виготовлення ізольованого провідника витой пари при охолодженні у воді в порівнянні з повітряним. При змінненні товщини ізоляції в 4 рази електрична ємність ізольованого провідника змінюється більше, ніж в 2 рази, та на 5 % при знаходженні у воді та повітрі відповідно. Ефективне регулювання забезпечується на підставі отриманих залежностей ефективної діелектричної проникності, тангенсу кута діелектричних втрат та ємності ізольованого провідника від ступеню спінення та товщини захисної плівки двошарової ізоляції. При ступені пористості 40 % діелектрична проникність зменшується на 25 %, тангенс кута діелектричних втрат – на 33 %, електрична ємність ізольованого провідника – на 20 %. Бібл. 18, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: промислові мережі, вита пара, ізольований провідник, спінення, товщина ізоляції, ефективна діелектрична проникність, електрична ємність.

Доказано большую чувствительность регулирования технологического процесса изготовления изолированного проводника витой пары при охлаждении в воде по сравнению с воздушным. При изменении толщины изоляции в 4 раза электрическая емкость изолированного проводника меняется более чем в 2 раза, и на 5 % при нахождении в воде и воздухе соответственно. Эффективное регулирование обеспечивается на основании полученных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и емкости изолированного проводника от степени вспенивания и толщины защитной пленки двухслойной изоляции. При степени пористости 40 % диэлектрическая проницаемость уменьшается на 25 %, тангенс угла диэлектрических потерь – на 33 %, электрическая емкость изолированного проводника – на 20 %. Библ. 18, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: промышленные сети, витая пара, изолированный проводник, вспенивание, толщина изоляции, эффективная диэлектрическая проницаемость, электрическая емкость.

Вступ. Стрімкий ріст цифрових технологій спонукав виробників кабельної продукції в Україні впровадити нові технології та види кабелів, зокрема, на основі витих пар різної категорії, з відповідним комплексом параметрів передачі, як для інформаційних структурованих кабельних систем, так і для систем безпеки – відеоспостереження, пожежної та охоронної сигналізації [1-6]. В той же час, кожне промислове підприємство для забезпечення конкурентоспроможності продукції, що виготовляється, сприяє автоматизації як окремих технологічних процесів, так і всього виробництва в цілому. Для цього необхідно ввести всі активні та пасивні пристрої в єдину інформаційну промислово-технологічну мережу, де взаємодія між пристроями відбувається за допомогою програмно-логічних протоколів зв'язку. Промислові мережі, зазвичай, не виходять за межі одного підприємства. Протягом останніх 10 років чисельність промислових мереж зросла більше, ніж в 2 рази [7]. До 2025 року очікується зростання на 280 % в порівнянні з 2010 роком [7]. На фізичному рівні всі промислово-технологічні мережі (FieldBus Profibus, LonWorks та інші) базуються на витой парі або оптичному волокні, причому в більшій мірі застосовуються рішення на основі електричних кабелів (табл. 1) [3, 4, 7].

Таблиця 1

Характеристики промислових мереж

Тип промислової мережі шинної топології	Швидкість передачі сигналів	Максимальна дальність передачі сигналів, м
Profibus DP	9,6 кБіт/с – 12 МБіт/с	100 – 1200
Profibus PA	31,25 кБіт/с	1900
Canopen	62,5 кБіт/с – 1 МБіт/с	30 – 1000
DEviceNet	125 – 500 кБіт/с	100 – 500

З появою Ethernet і Internet для промислових мереж стали застосовувати ту ж класифікацію, що і для інформаційних, структурованих, локальних мереж (табл. 2). Ринок промислового Ethernet зростає зі швидкістю 51 % на рік [7]. У міру модернізації мереж, яка передбачає перехід від застарілої польової шини до промислового (Industrial) Ethernet, комунікаційна кабельна інфраструктура стає основою підключення до комунікацій промислового підприємства.

Існуючі технології фізичного рівня Industrial Ethernet мають обмеження відстані, на яку передається сигнал – не більше 100 м.

У зв'язку з тим, що для додатків автоматизації процесів потрібні відстані 1 км та навіть більше у поєднанні з надійними польовими пристроями, придатними для використання в додатках зони 0 (іскробезпечні), знадобився новий підхід до реалізації технології фізичного рівня Ethernet. Прийнятий новий стандарт 10BASE-T1L фізичного рівня промислового Ethernet (IEEE 802.3cg-2019 (табл. 2)) кардинально дозволить змінити галузь автоматизації процесів за рахунок значного підвищення операційної ефективності підприємства завдяки організації високонадійного безшовного (без використання шлюзів) підключення до Ethernet на польовому рівні, яке передбачає найрізноманітніші пристрої, в тому числі датчики і виконавчі механізми – актуатори, програмовані логічні контролери [7]. Стандарт 10BASE-T1L вирішує проблеми, які сьогодні обмежують використання Ethernet в польових умовах в області автоматизації процесів: недостатня пропускна здатність, відносна складність кабельної розводки, обмежена дальність передачі даних, що напряму пов'язана зі смугою пропускання кабелю (конструктивно-технологічними рішеннями).

Міжнародні стандарти та категорії кабелів на основі витих пар для промислових мереж Ethernet [7]

Рік прийняття стандарту	Стандарт IEEE 802.3		Максимальна відстань передачі сигналів, м	Швидкість передачі сигналів	Смуга пропускання кабелю на основі витой пари	Категорія кабелю відповідно до рекомендацій ISO/IEC	Кількість пар
1999	IEEE 802.3ab	1000BASE-T	100	1 ГБіт/с	125 МГц	Категорія 5e	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	55	10 ГБіт/с	250 МГц	Категорія 6	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	100	10 ГБіт/с	500 МГц	Категорія 6	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	100	10 ГБіт/с	600 МГц	Категорія 7	4
2006	IEEE 802.3an	10GBASE-T	100	10 ГБіт/с	1000 МГц	Категорія 7a	4
2015	IEEE 802.3 bw	100BASE-T1	15 м UTP	100 МБіт/с	66 МГц	SPE	1
2016	IEEE 802.3 bp	1000BASE-T1	40 15 м UTP	1000 МБіт/с	600 МГц	SPE	1
2019	IEEE 802.3 cg	10BASE-T1L 10BASE-T1S	1000 25 м UTP	10 МБіт/с	20 МГц	SPE	1
2020	IEEE 802.3 ch	Multi-Gig	(15 м)	(2,5/5//10 ГБіт/с)	-	SPE	1

Стандарт 10BASE-T1L підтримує два режими амплітуди сигналу: 2,4 В на довжині кабелю до 1000 м і 1 В на меншій відстані. Режим повної амплітуди 1 В означає, що цю нову технологію фізичного рівня можна використовувати і у вибухозахищених (Ex-proof) системах, дотримуючись строгих правил щодо обмеження максимальної енергії. Найголовнішим є те, що стандарт 10BASE-T1L забезпечує передачу на великі відстані завдяки двохпровідній технології з живленням і даними по одному кабелю у вигляді витой пари і належить до сімейства середовищ з однопарним Ethernet (single-pair Ethernet, SPE) (табл. 2).

Необхідно зазначити, що підприємства кабельної промисловості України не випускають кабелі для промислових мереж. Постачальниками таких кабелів в Україну для промислової автоматизації та управління є провідні світові фірми, зокрема, ABB, Siemens, Belden, Helucable [7].

Освоєння інноваційної кабельної продукції підприємствами України потребує вирішення проблеми синтезу конструктивно-технологічних рішень для налагодження випуску кабелів для промислових мереж з відповідним комплексом електричних параметрів.

Мета статті – синтез конструктивно-технологічних рішень регулювання електричної ємності ізолюваного провідника на стадії виготовлення витой пари кабелів промислових мереж.

Постановка проблеми. Дальність передачі та смуга пропускання сигналів в кабелі залежить від конструктивно-технологічних рішень, що визначають коефіцієнт загасання, котрий визначається активним опором провідників R , індуктивністю L , робочою ємністю C_p , активною провідністю ізоляції G (тангенсом кута діелектричних втрат $tg\delta$) [8].

У височастотному діапазоні коефіцієнт загасання має дві складові: втрати в металі (провіднику) α_m та втрати в діелектрику (ізоляції) α_d

$$\begin{aligned} \alpha &= 8.69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C_p}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C_p}} \right) = \\ &= 8.69 \cdot \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C_p}{L}} + \frac{\omega C_p tg\delta}{2} \sqrt{\frac{L}{C_p}} \right) = \\ &= 8.69 \sqrt{C_p} \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{1}{L}} + \frac{\omega tg\delta}{2} \sqrt{L} \right) = \alpha_m + \alpha_d, \text{ dB/m}, \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$\alpha_m = 8.69 \sqrt{C_p} \frac{R}{2} \sqrt{\frac{1}{L}}, \quad \alpha_d = 8.69 \sqrt{C_p} \cdot \frac{\omega tg\delta}{2} \sqrt{L}. \quad (2)$$

Робоча ємність витой пари (рис. 1), провідники котрої скручені з відповідним кроком h , визначає втрати в провідниках та в ізоляції (див. (2))

$$C_p = \chi \cdot \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{a-r}{r} \cdot \psi\right)}, \quad F/m, \quad (3)$$

де χ – коефіцієнт скручування провідників пари для зменшення електромагнітних впливів, ψ – коефіцієнт, котрий враховує вплив на робочу ємність рядом розташованих пар та металевого екрану, a – відстань між провідниками, яка визначається радіусом r_1 провідника (1) та товщиною Δ_1 ізоляції (2), ϵ – діелектрична проникність ізоляції (рис. 1).

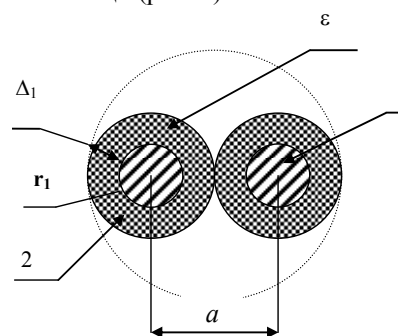


Рис. 1. Конструкція витой пари

Робоча ємність неекранованої та екранованої витих пар визначається на підставі розрахунку електричного поля [9-13]. Так, в [11] визначено робочу ємність неекранованої витой пари на підставі застосування методу конформних відображень та кінцевих елементів в середовищі ELCUT. В [12, 13] методом вторинних зарядів визначено робочу ємність та вплив товщини прошарків тришарової поліетиленової ізоляції на робочу ємність екранованої витой пари категорії 7.

На технологічній стадії виготовлення ізолюваного провідника, як основного конструктивного елементу витой пари, електрична ємність вимірюється. Провідник являє собою конденсатор, однією з обкладинок якого є металева жила проводу, а іншою – вода, що охолоджує після накладання ізоляції, котра знаходить-

ся в електричному контакті з трубчастим електродом, через який безперервно рухається контрольований ізолюваний провідник. Такий метод контролю реалізовано в розробках провідних фірм, що спеціалізуються у випуску приладів контролю для кабельної промисловості: Sikora, Zumbach (табл. 3) [14, 15]. Електронні блоки виміральної системи оснащені сучасними портами даних для підключення до процесорів відображення або до головного комп'ютеру (локальної комп'ютерної мережі) за допомогою промислових інтерфейсів (кабелів) Profibus DP, Rs-232, -432, -485 [1].

Таблиця 3

Технічні характеристики вимірвальних систем електричної ємності кабелів на технологічній стадії [14, 15]

Фірма	Тип приладу	Діапазон діаметрів, мм	Діапазон значень ємності, пФ/м	Точність, пФ/м
«Sikora»	Capacitance 2010	0,5-10	0-300	±0,45
	Capacitance 2025	1-25	0-300	±0,45
Zumbach	CAPAC®	–	0-300 0-600 0-1800	±0,1 ±0,3%

Безперервний контроль електричної ємності ізолюваного провідника по всій довжині дозволяє своєчасно приймати рішення щодо регулювання ємності на технологічній стадії виготовлення.

Вплив конструктивних рішень на електричну ємність ізолюваного провідника. На підставі застосування методу вторинних зарядів [12, 13] визначено електричну ємність ізолюваного провідника при варіюванні товщини суцільної та спіненої поліетиленової ізоляції, оточуючого середовища, в котрому знаходиться провідник на технологічній стадії виготовлення.

На рис. 2 наведено результати розрахунків електричної ємності ізолюваного провідника при незмінному діаметрі r_1 провідника та варіюванні товщини Δ_1 суцільної ізоляції для двох випадків: при знаходженні у повітрі (крива 1) та у воді (крива 2). Діелектрична проникність технічної води, що охолоджує, прийнята рівною 100 [13].

На рис. 2,а наведено абсолютні значення ємності, на рис. 2,б – відносні значення щодо розрахункової ємності у випадку $r_1 = \Delta_1$. В такому масштабі розрахунки ємності співпадають для трьох значень діаметрів провідника $2r_1 = 0,511$; $0,57$ та $0,64$ мм. Крива 1 відноситься для випадку охолодження ізолюваного провідника у повітрі, крива 2 – у воді.

При охолодженні у воді електрична ємність ізолюваного провідника змінюється більше, ніж в 2 рази, при повітряному охолодженні – не більше ніж на 5 % при варіюванні товщини суцільної ізоляції (порівняйте криві 1 та 2, рис. 2,а,б).

Збільшення товщини ізоляції на 50 % відносно радіусу провідника (крива 2, рис. 2,а,б) призводить до зменшення ємності ізолюваного провідника на 20 %. Таке конструктивне рішення зумовлює зростання масогабаритних розмірів витой пари в цілому. Більш ефективним конструкторсько-технологічним рішенням є застосування спіненої ізоляції [12].

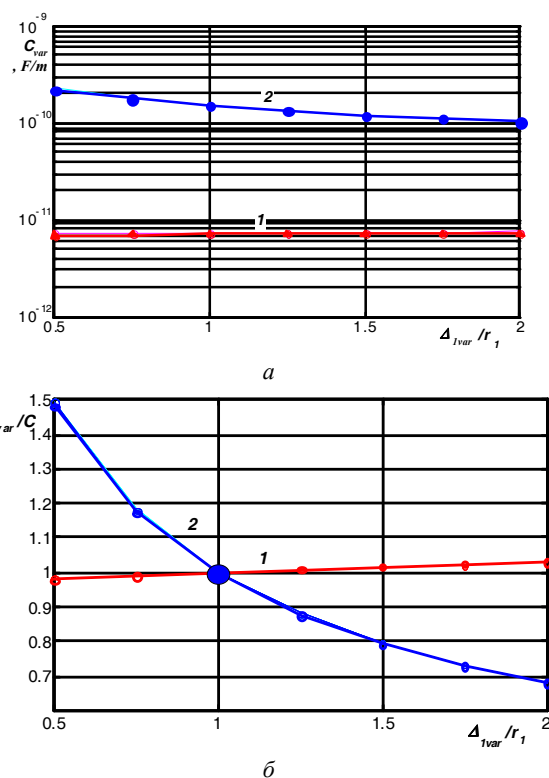


Рис. 2. Вплив товщини суцільної ізоляції на електричну ємність ізолюваного провідника у випадку знаходження у повітрі (крива 1) та у воді (крива 2)

Спінення ізоляції як ефективне рішення регулювання ємності. Технологія спінення ізоляції в останні часи набуває широкого застосування, в тому числі у витих парах [12, 16-17]. Найвідомішим хімічним піноутворювачем є азодикарбонамід – екзотермічний хімічний піноутворювач. Він виділяє у полімер велику кількість газу азоту разом із вуглекислим газом у меншій кількості.

Для розрахунку ефективної діелектричної проникності спіненої ізоляції, яка являє собою статистичну суміш (хаотичну, неупорядковану в просторі) застосовано формулу Ліхтенеккера [18] – логарифмічний закон змішування.

Для спіненої суміші двох компонентів з твердої ізоляції на основі поліетилену, що заповнена великою кількістю дрібних газових пір, діелектрична проникність котрих дорівнює $\epsilon = 1$, ефективна діелектрична проникність ϵ_{foam} визначається діелектричною проникністю суцільного поліетилену ϵ_{PE} та співвідношенням щільності спіненої ρ_{foam} та суцільної ρ_{PE} ізоляції відповідно

$$\lg \epsilon_{foam} = \frac{\rho_{foam}}{\rho_{PE}} \lg \epsilon_{PE} \quad (4)$$

На рис. 3 представлено залежність ефективної діелектричної проникності спіненої поліетиленової ізоляції, тангенсу кута діелектричних втрат та електричної ємності ізолюваного провідника від величини, зворотної ступеню пористості $\frac{1}{\rho_{foam}} = \frac{\rho_{PE}}{\rho_{foam}}$.

При ступені пористості 40 % (відносний вміст суцільного поліетилену дорівнює 60 % – рис. 3) діе-

лектрична проникність суміші зменшується в $2/1,6 = 1,25$ рази. Відповідно на 33 % зменшується тангенс кута діелектричних втрат й на 20 % – електрична ємність ізолюваного провідника, що доводить ефективність застосування спіненої ізоляції.

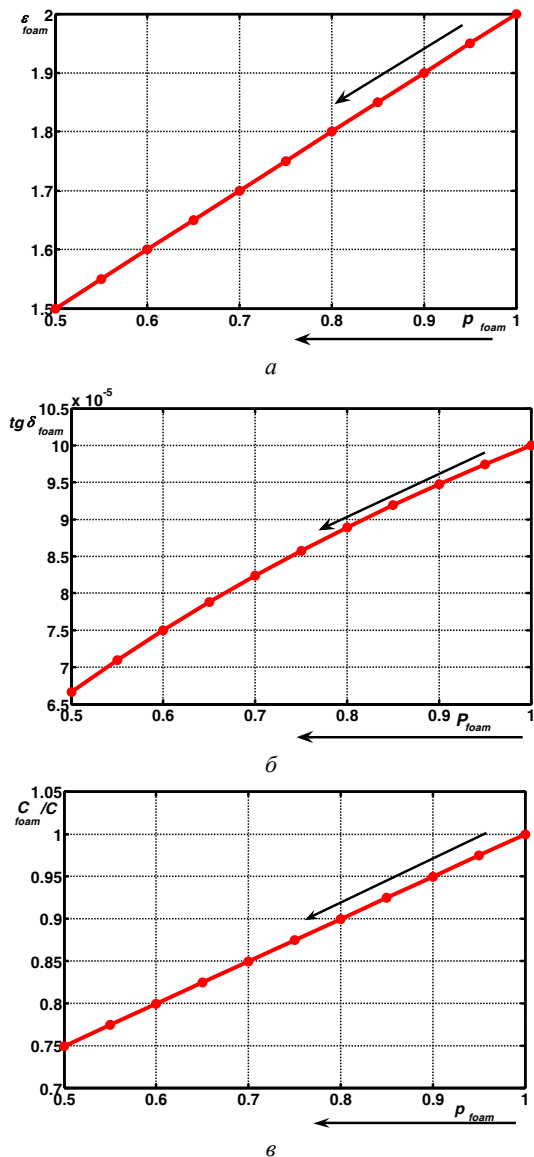


Рис. 3. Вплив ступеню пористості ρ_{foam} поліетилену на ефективну діелектричну проникність (а), ефективний тангенс кута діелектричних втрат (б) та електричну ємність (в) ізолюваного провідника

Наявність великої кількості пор в твердій поліетиленовій ізоляції потребує рішення щодо захисту пор від проникнення вологи в процесі експлуатації кабелю. Найбільш привабливим є застосування додаткової суцільної плівки на поверхні спіненої ізоляції, яка виступає в якості бар'єру для проникнення вологи всередину спіненої ізоляції [12] (рис. 4).

Вплив товщини плівки в залежності від ступеню пористості поліетиленової ізоляції на ефективну діелектричну проникність (а), ефективний тангенс кута діелектричних втрат (б) та електричну ємність (в) ізолюваного провідника представлено на рис. 5. Крива 1 на рис. 5 відповідає суцільній поліетиленовій ізоляції, товщина котрої дорівнює радіусу провідника та зали-

шається незмінною при спіненні Δ_{foam} . Крок ступеню спінення дорівнює 0,05 (крива 11 відповідає 50 % вмісту поліетилену та 50 % вмісту газових пор). При цьому товщина суцільної захисної плівки Δ_{solid} змінюється від 0,5 % до 60 % відносно основної ізоляції.

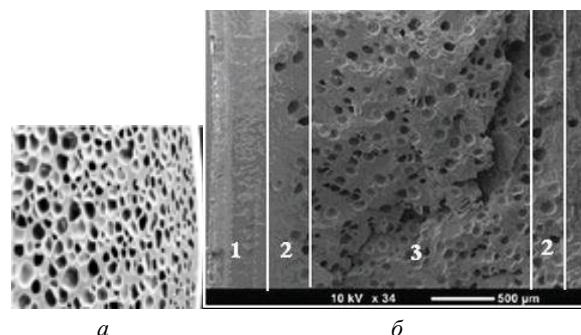


Рис. 4. Структура спіненої поліетиленової ізоляції без захисної плівки (а) та із захисної поліетиленової плівкою (б): 1 – плівка, 2 – перехідна зона, 3 – власно спінена ізоляція [16]

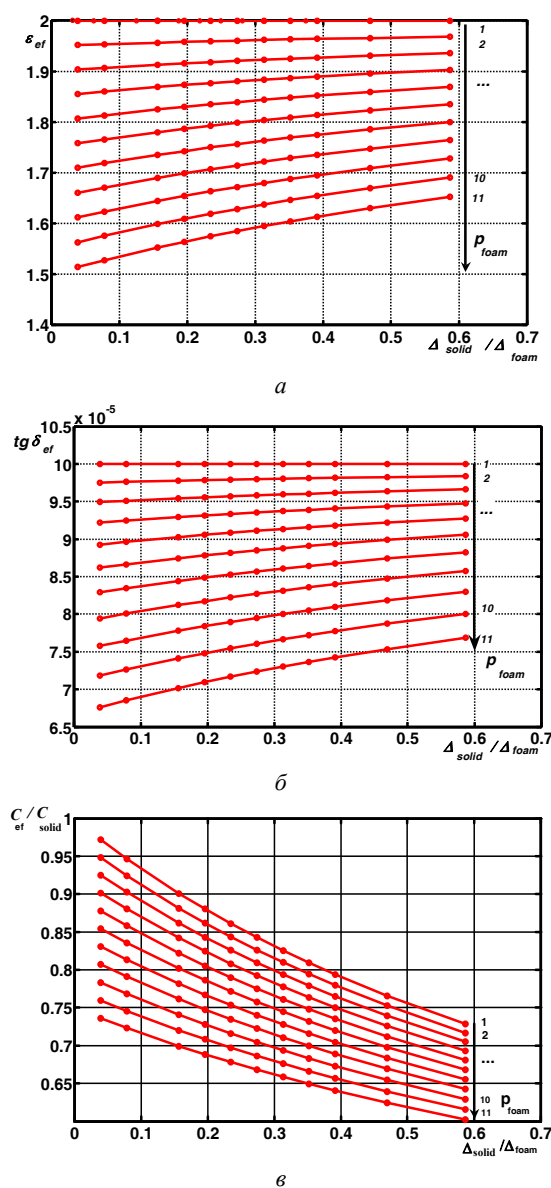


Рис. 5. 3D-діаграма впливу ступеню пористості поліетилену та товщини захисної суцільної поліетиленової плівки на електрофізичні характеристики та електричну ємність ізолюваного провідника

Застосування додаткового прошарку суцільної плівки по поверхні жили для забезпечення «жорсткості» конструкції при незмінній загальній товщині ізоляції призводить до зростання ємності тришарової ізоляції не більше, ніж на 5 %, в порівнянні із двошаровою ізоляцією.

Висновки.

Розташування ізолюваного провідника у воді, що охолоджує, забезпечує високу чутливість до налаштувань технологічного процесу щодо регулювання ємності при варіюванні товщини ізоляції. При зміні товщини ізоляції в 4 рази відносно діаметру провідника електрична ємність змінюється більше, ніж в 2 рази. При знаходженні у повітрі – на 5 %.

Вперше отримано номограми ефективної діелектричної проникності, тангенсу кута діелектричних втрат та відносних значень ємності в залежності від ступеню спінення суцільної поліетиленової ізоляції та товщини захисної плівки, які дозволяють ефективно регулювати електричну ємність двошарової ізоляції провідника вититої пари.

Обґрунтовано методологію синтезу конструкторсько-технологічних рішень регулювання ємності вититої пари кабелів промислових мереж на технологічній стадії виготовлення ізолюваного провідника.

Розроблена методика може бути застосована для налаштувань технологічного процесу виготовлення ізолюваних провідників кабелів різного призначення, в тому числі і силових.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pigan R., Metter M. *Automating with PROFINET: Industrial Communication Based on Industrial Ethernet*. John Wiley & Sons Publ., 2015. 462 p.
2. Безпрозваних Г.В., Пушкар О.А. Підвищення завадостійкості кабелів систем протипожежного захисту. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020, № 4, С. 54-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.4.07>.
3. Belous A., Saladukha V. *High-Speed Digital System Design: Art, Science and Experience*. Springer Nature Publ., 2019. 933 p.
4. *International Standard ISO/IEC 11801. Information Technology – Generic cabling for customer premises. Part 2: Office premises*. 2017. 24 p.
5. Semenov A. Advanced Twisted Pair Cables for Distributed Local Area Networks in Intelligent Structure Systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 317, p. 012053. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/317/1/012053>.
6. Penttinen Jyrki T.J. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. John Wiley & Sons Publ., 2015. 1008 p.
7. *Sending all the right signals. White paper. Single pair Ethernet in the Industrial Field*. Belden, 2020. 8 p.
8. Безпрозваних 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.
9. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
10. Levin B.M. Calculation of Electrical Parameters of Two-Wire Lines in Multiconductor Cables. *IEEE Transactions on*

Electromagnetic Compatibility, 2008, vol. 50, no. 3, pp. 697-703. doi: <https://doi.org/10.1109/temc.2008.927924>.

11. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Расчет межпроводной индуктивности и емкости симметричных прямых пар методами конформных отображений и конечных элементов. *Кабель-news*, 2007, №3 (13), С. 30-36.

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

13. Безпрозваних А.В. Сравнительный анализ поперечной структуры незаполненных и заполненных телефонных кабелей по результатам прямых измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. *Електротехніка і електромеханіка*, 2007, № 5, С. 61-65.

14. Sikora Technology to Perfection / Capacitance 2000. Режим доступу: <https://sikora.net/en/products/capacitance2000/> (Дата звернення: 14.09.2020).

15. Zumbach Electronics. CAPAC® / FFT / SRL – Overview. Режим доступу: <https://www.zumbach.com/ru/products/product-finder/capac-fft-srl/capac-overview.html> (Дата звернення: 14.09.2020).

16. Xu Z., Xue P., Zhu F., He J. Effects of formulations and processing parameters on foam morphologies in the direct extrusion foaming of polypropylene using a single-screw extruder. *Journal of Cellular Plastics*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 169-185. doi: <https://doi.org/10.1177/0021955x05051740>.

17. Pinto J., Notario B., Verdejo R., Dumon M., Costeux S., Rodriguez-Perez M.A. Molecular confinement of solid and gaseous phases of self-standing bulk nanoporous polymers inducing enhanced and unexpected physical properties. *Polymer*, 2017, vol. 113, pp. 27-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.02.046>.

18. Пальчиков О.О. Определение эффективной диэлектрической проницаемости гетерогенного материала. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020, № 2, С. 59-63. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.2.09>.

REFERENCES

1. Pigan R., Metter M. *Automating with PROFINET: Industrial Communication Based on Industrial Ethernet*. John Wiley & Sons Publ., 2015. 462 p.
2. 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>.
3. Belous A., Saladukha V. *High-Speed Digital System Design: Art, Science and Experience*. Springer Nature Publ., 2019. 933 p.
4. *International Standard ISO/IEC 11801. Information Technology – Generic cabling for customer premises. Part 2: Office premises*. 2017. 24 p.
5. Semenov A. Advanced Twisted Pair Cables for Distributed Local Area Networks in Intelligent Structure Systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 317, p. 012053. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/317/1/012053>.
6. Penttinen Jyrki T.J. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. John Wiley & Sons Publ., 2015. 1008 p.
7. *Sending all the right signals. White paper. Single pair Ethernet in the Industrial Field*. Belden, 2020. 8 p.
8. 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).

9. Iossel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunsky M.G. *Raschet elektricheskoi emkosti* [Calculation of electrical capacity]. Leninograd, Energoizdat Publ., 1981. 288 p. (Rus).
10. Levin B.M. Calculation of Electrical Parameters of Two-Wire Lines in Multiconductor Cables. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, vol. 50, no. 3, pp. 697-703. doi: <https://doi.org/10.1109/temc.2008.927924>.
11. Vishnyakov E.M., Khvostov D.V. Calculation of inter-wire inductance and capacitance of symmetric straight pairs by methods of conformal mappings and finite elements. *Cable-news*, 2007, no. 3 (13), pp. 30-36. (Rus).
12. Boyko AM, 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).
13. Bezprozvannykh G.V. Comparative analysis of the transverse structure of unfilled and filled telephone cables based on capacity and dielectric dissipation measurement results. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2007, no. 5, pp. 61-66. (Rus).
14. Sikora Technology to Perfection / Capacitance 2000. Available at: <https://sikora.net/en/products/capacitance2000/> (Accessed 14.09.2020).
15. Zumbach Electronics. CAPAC® / FFT / SRL – Overview. Available at: <https://www.zumbach.com/ru/products/product-finder/capac-fft-srl/capac-overview.html> (Accessed 14.09.2020).
16. Xu Z., Xue P., Zhu F., He J. Effects of formulations and processing parameters on foam morphologies in the direct extrusion foaming of polypropylene using a single-screw extruder. *Journal of Cellular Plastics*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 169-185. doi: <https://doi.org/10.1177/0021955x05051740>.
17. Pinto J., Notario B., Verdejo R., Dumon M., Costeux S., Rodriguez-Perez M.A. Molecular confinement of solid and gaseous phases of self-standing bulk nanoporous polymers inducing enhanced and unexpected physical properties. *Polymer*, 2017, vol. 113, pp. 27-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.02.046>.
18. Palchykov O.O. Determination of the effective permittivity of a heterogeneous material. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 2, pp. 59-63. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.2.09>.

Надійшла (Received) 10.11.2020
 Прийнята (Accepted) 06.12.2020
 Опублікована (Published) 25.02.2021

Безпрозваних Ганна Вікторівна¹, д.т.н., проф.,
 Костюков Іван Олександрович¹, к.т.н., докторант,
 Пушкар Олег Анатолійович², ген. директор, аспірант,
¹ Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
 e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua,
 iakostiukow@gmail.com
² ТОВ «Алай»,
 03061, Київ, пр. Відрадиний, 95 А2, офіс 202
 e-mail: adm@alay.com.ua

G.V. Bezprozvannykh¹, I.A. Kostukov¹, O.A. Pushkar²
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² Company «Alay»,
 95 A2, office 202, Otradny Ave., Kyiv, 03061, Ukraine.

Synthesis of constructive-technological decisions of regulation of working capacitance of cables of industrial networks.

Introduction. Over the past 10 years, the number of industrial networks has more than doubled. At the physical level, all industrial technology networks are based on twisted pair. **Purpose.** Synthesis of constructive-technological decisions of regulation of electric capacitance of the insulated conductor at a stage of manufacturing of twisted pair of cables of industrial networks. **Methodology.** The method of secondary charges to determine the capacitance of the insulated conductor by varying the thickness of the solid and foamed polyethylene insulation. **Practical value.** Effective regulation is provided on the basis of the obtained dependencies of the effective dielectric constant, the tangent of the dielectric loss angle and the capacitance of the insulated conductor on the degree of foaming and the thickness of the protective film of two-layer insulation. At a degree of porosity of 40 %, the dielectric constant decreases by 25 %, the tangent of the dielectric loss angle – by 33 %, the electrical capacitance of the insulated conductor – by 20 %. References 18, tables 3, figures 5.

Key words: industrial networks, twisted pair, insulated conductor, foaming, insulation thickness, effective dielectric constant, electrical capacitance.