

УДК 004.7

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-130-136

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ВІД ДОВЖИНИ СЕГМЕНТУ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ МЕРЕЖІ SAFETYBUS P

С. М. Бабчук, І. С. Бабчук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: serhii.babchuk@nung.edu.ua*

Доступність, надійність, гнучкість і широкі можливості діагностики є важливими властивостями, які користувачі очікують від сучасних систем автоматизації. В умовах стрімкого розвитку технологій та підвищених вимог до безпеки, автоматизовані системи повинні відповідати високим стандартам якості та надійності. Наразі багато систем автоматизації базуються на використанні спеціалізованих цифрових мереж, що забезпечують ефективний контроль та управління технологічними процесами. Однією з таких мереж є спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p, яка відповідає вимогам рівня SIL 3 згідно зі стандартом IEC 61508 та категорії 4 стандарту EN 954-1. Завдяки відповідності цим стандартам SafetyBUS p може застосовуватися у критично важливих сферах, пов'язаних із забезпеченням безпеки життя та здоров'я людей, зокрема у виробничих та транспортних технологіях. Використання цієї мережі дозволяє підвищити рівень безпеки та надійності автоматизованих систем керування, що є ключовим фактором для підприємств різних галузей, зокрема промислових і нафтогазових. В рамках дослідження було встановлено, що одним з ключових параметрів мережі SafetyBUS p є швидкість передавання даних, яка залежить від довжини сегмента мережі. Було проаналізовано різні математичні моделі для опису цієї залежності, серед яких лінійна, поліномна, експоненційна та логарифмічна. Однак жодна з них не відображає характер зміни швидкості передавання даних з достатньою точністю. На основі аналізу було визначено, що оптимальною моделлю є степенева функція, яка дозволяє описати залежність швидкості передавання даних від довжини сегмента мережі SafetyBUS p з похибкою від 1,05% до 3,21%. Розроблена математична модель дає можливість прогнозувати та оптимізувати параметри передавання даних у мережі SafetyBUS p, що сприяє ефективнішому проектуванню автоматизованих систем керування технологічними процесами. Застосування цієї моделі дозволяє значно покращити функціонування систем, мінімізувати затримки у передаванні даних та підвищити загальну продуктивність автоматизованих процесів. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення мережевих технологій та впровадження інноваційних підходів у сфері промислової автоматизації.

Ключові слова: SafetyBUS p, математична модель, спеціалізована цифрова мережа, fieldbus, автоматизована система керування технологічним процесом.

Accessibility, reliability, flexibility and extensive diagnostic capabilities are important features that users expect from modern automation systems. In the context of rapid technological development and increased safety requirements, automated systems must meet high standards of quality and reliability. Currently, many automation systems are based on the use of specialized digital networks that provide effective control and management of technological processes. One of such networks is the specialized digital network SafetyBUS p, which meets the requirements of SIL 3 according to the IEC 61508 standard and category 4 of the EN 954-1 standard. Due to compliance with these standards, SafetyBUS p can be used in critical areas related to ensuring the safety of life and health of people, in particular in production and transport technologies. The use of this network allows to increase the level of safety and reliability of automated control systems, which is a key factor for enterprises in various industries, in particular industrial and oil and gas. The study found that one of the key parameters of the SafetyBUS p network is the data transfer rate, which depends on the length of the network segment. Various mathematical models were analyzed to describe this dependence, including linear, polynomial, exponential, and logarithmic. However, none of them reflects the nature of the change in the data transfer rate with sufficient accuracy. Based on the analysis, it was determined that the optimal model is a power function, which allows describing the dependence of the data transfer rate on the length of the SafetyBUS p network segment with an error of 1.05% to 3.21%. The developed mathematical model makes it possible to predict and optimize data transfer parameters in the SafetyBUS p network, which contributes to a more effective design of automated process control systems. The use of this model allows significantly improving the functioning of systems, minimizing delays in data transfer, and increasing the overall productivity of automated processes. The results obtained can be used to further improve network technologies and implement innovative approaches in the field of industrial automation.

Keywords: SafetyBUS p, mathematical model, specialized digital network, fieldbus, automated technological process control system.

Постановка проблеми

Наразі на світовому ринку представлена велика кількість виробників у різних галузях. Наявність товарів однакового призначення від різних компаній породжує конкуренцію між ними, що дозволяє споживачам отримувати якісніші товари за нижчими цінами. Завдяки конкуренції виробники змушені постійно вдосконалювати свою продукцію та шукати шляхи створення товарів, які відповідають потребам споживачів і мають нижчу вартість у порівнянні з продукцією конкурентів [1].

Одним зі способів підвищення продуктивності виробничих процесів є впровадження систем автоматизації на фабриках та заводах.

Раніше автоматизовані системи базувались на централізованій моделі управління технологічними процесами. Нині у світі широко використовуються автоматизовані системи, що базуються на децентралізованій моделі управління. Застосування децентралізованого підходу дозволяє значно підвищити ефективність виробництва, включаючи покращення якості продукції і зменшення витрат. До того ж такі системи легше, швидше та економічніше розгортаються. Порівняно з централізованими рішеннями, децентралізовані системи є більш зручними та менш витратними в підтримці та обслуговуванні [1].

Зазвичай децентралізовані системи управління технологічними процесами створюються на основі спеціалізованих цифрових мереж, в яких надійна передача даних у цифровому форматі.

В теперішній час користувачам доступні понад сто різних спеціалізованих цифрових мереж, тому користувачів вибір тієї мережі, яка допоможе їхньому підприємству досягти вищого рівня ефективності та конкурентоспроможності, може бути досить складним завданням [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед більш як ста спеціалізованих цифрових мереж необхідно зазначити

спеціалізовану цифрову мережу SafetyBUS p.

Спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p є стандартом для безпечного зв'язку в системах автоматизації, оскільки відповідає рівню SIL 3 IEC_61508, а також категорії безпеки Cat 4 EN_954-1 [2,3].

Спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p була розроблена в період з 1995 до 1999 року компанією Pilz GmbH und Co. KG (Німеччина). Дана мережа з 1999 року підтримується організацією користувачів Safety Network International e.V.

Мережа SafetyBUS p призначена для передачі даних, що стосуються безпеки. Цю спеціалізовану цифрову мережу використовують там, де необхідний захист від ризиків, які можуть вплинути на життя або здоров'я людей, а також на цінності або обладнання [2,3].

Одними з основних сфер використання спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p є:

- автоматизація технологічних процесів та виробництва (наприклад, виробництво автомобілів);
- транспортні системи (наприклад, канатні дороги).

Спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p створена на базі спеціалізованої цифрової мережі CAN. Окрім рівнів 1 і 2 OSI-моделі, які визначені для спеціалізованої цифрової мережі CAN, SafetyBUS p додатково має механізми безпеки на рівнях 2 і 7 OSI-моделі.

Для виявлення помилок під час передавання даних та всередині пристроїв SafetyBUS p використовує такі механізми [2,3]:

- порядкова нумерація;
- відлуння;
- ідентифікатори в передавача та приймача;
- перевірка цілісності даних за допомогою CRC.

Основні характеристики спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p [2,3]:

- максимальна кількість вузлів в одній мережі - до 64;
- швидкість передавання даних від 20 до 500 кбіт/с залежно від фізичного розміру мережі;
- максимальна довжина сегмента мережі - до 3500 м;
- кілька сегментів мережі можуть бути об'єднані;
- можна досягнути гарантованого часу реакції на помилку до 20 мс;
- підходить для застосувань відповідно до SIL 3 IEC 61508 і Cat. 4 EN 954-1;
- живлення пристроїв через той самий кабель, яким передаються дані;
- сегменти мережі можуть бути реалізовані за допомогою оптоволоконного кабелю, радіозв'язку або інфрачервоного зв'язку.

Мережі SafetyBUS p містять тільки безпечні пристрої. Ці пристрої, як правило, мають внутрішнє резервування. Використання безпечних пристроїв для забезпечення безпеки зазвичай вимагає сертифікації пристроїв уповноваженими органами. Функціональна сертифікація пристроїв для мережі SafetyBUS p здійснюється організацією користувачів Safety Network International e.V.

Організація користувачів SafetyBUS p Club International e.V була заснована в 1999 році, як асоціація користувачів і виробників пристроїв SafetyBUS p. У 2000 році була заснована національна організація в Японії, а у 2001 році створена відповідна національна організація в США. У 2006 році організація Club International e.V змінила назву на Safety Network International e.V.

Нині користувачам пропонується великий вибір програмних і апаратних рішень для спеціалізованої мережі SafetyBUS p [4-11].

З огляду на вищевказане спеціалізовану цифрову мережу SafetyBUS p можна використовувати в системах автоматизації технологічних процесів та виробництв в різних промислових та нафтогазових підприємствах.

Максимальна довжина одного сегменту спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p – до 3500 м. Швидкість передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS p залежить від довжини сегмента мережі.

В джерелі [12] є інформація про швидкості передавання даних, які визначені виробником спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p для різних за довжиною сегментів даної мережі (табл. 1).

Таблиця 1 – Швидкості передавання даних, які визначені виробником мережі SafetyBUS p для різних за довжиною сегментів даної мережі

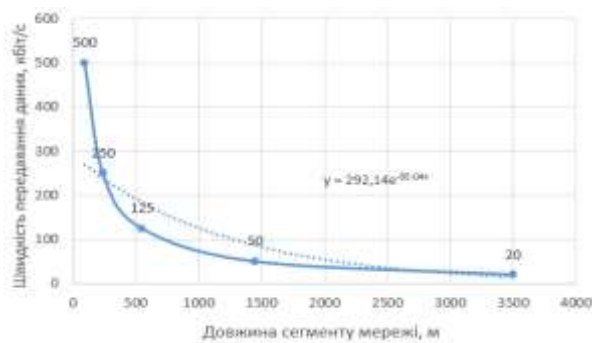
Довжина сегменту мережі SafetyBUS p, м	Швидкість передавання даних в мережі SafetyBUS p, кбіт/с
95	500
240	250
550	125
1450	50
3500	20

Невизначеність залежності швидкості передавання даних від довжини сегмента мережі SafetyBUS p створює додаткові труднощі при проектуванні систем автоматизації, які використовують дану спеціалізовану цифрову мережу.

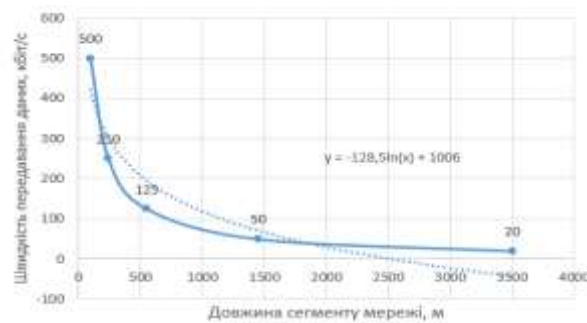
Мета досліджень. Метою виконаних досліджень було визначення математичної моделі зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p.

Визначення математичної моделі зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p

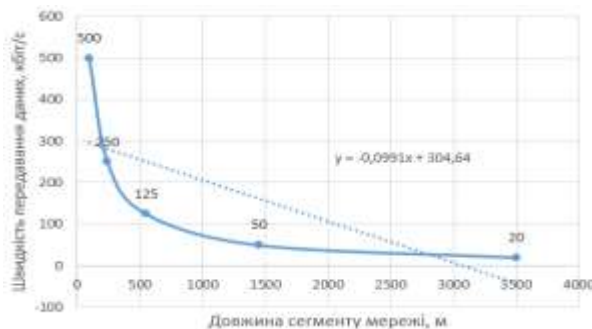
На першому етапі дослідження було прийнято рішення щодо необхідності виявлення характеру залежності зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p. Для досягнення поставленої мети було здійснено моделювання вищевказаної залежності за допомогою експоненціальної, логарифмічної, лінійної та поліноміальної функцій (рис. 1).



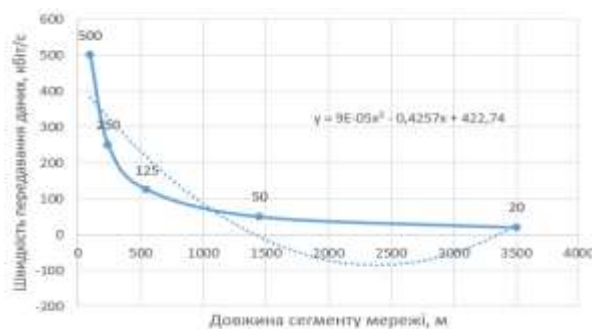
а)



б)



в)



г)

- а) експоненціальна модель;
б) логарифмічна модель в) лінійна модель;
г) поліномінальна модель

Рисунок 1 – Графіки математичних моделей зміни швидкості передавання даних в залежності від довжини сегменту мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p для довжин сегментів цієї мережі

З рисунка 1 видно, що експоненціальна, логарифмічна, лінійна та поліномінальна математичні моделі погано відтворюють зміну швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p.

Встановлено, що найкраще відтворює зміну швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p степенева функція (рис. 2):

$$y(x) = 31972 x^{-0.893} \quad (1)$$

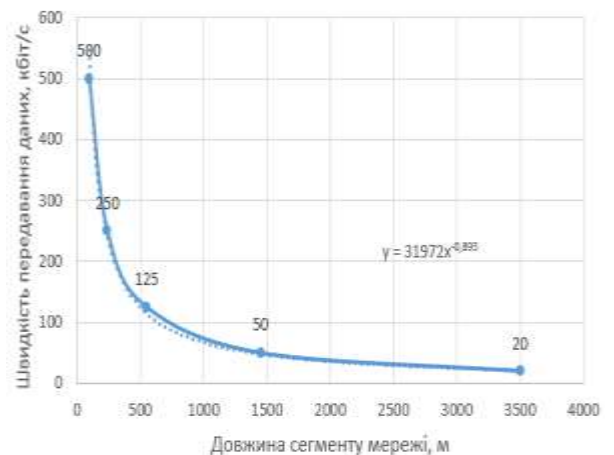


Рисунок 2 – Графік визначеної математичної моделі (1) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних визначених виробником мережі SafetyBUS p для довжин сегментів цієї мережі

В таблиці 2 відображено результати дослідження значень швидкостей передавання даних, встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p, для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (1).

Як видно з таблиці 2, визначена математична модель (1) відтворює зміну швидкості передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS p від довжини сегмента з похибкою від 9,57% до 3,91%.

За результатами проведених досліджень було встановлено, що швидкість передавання даних в мережі SafetyBUS p можна встановити за довжиною сегмента даної мережі за

Таблиця 2 – Аналіз значень швидкостей передавання даних встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p, для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (1)

Довжина сегменту мережі SafetyBUS p, м	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p, кбіт/с	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена за допомогою математичної моделі (1), кбіт/с	Похибка, кбіт/с	Похибка, %
95	500	547,85	47,85	9,57
240	250	239,46	10,54	4,21
550	125	114,19	10,81	8,65
1450	50	48,05	1,95	3,91
3500	20	21,87	1,87	9,37

допомогою математичної моделі на базі степеневої функції:

$$y(x) = \begin{cases} 183622x^{-0.789}, & 95 \leq x < 550 \\ 65246x^{-0.99}, & 550 \leq x \leq 3500 \end{cases} \quad (2)$$

Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 95 м до 550 м зображено на рисунку 3.

Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 550 м до 3500 м зображено на рисунку 4.

В таблиці 3 відображено результати дослідження значень швидкостей передавання даних встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (2).

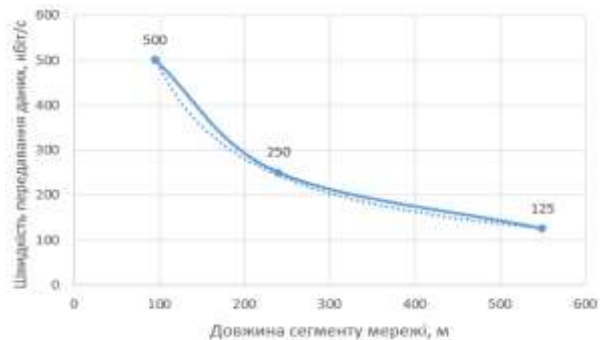


Рисунок 3 – Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних в залежності від довжини сегменту мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 95 м до 550 м

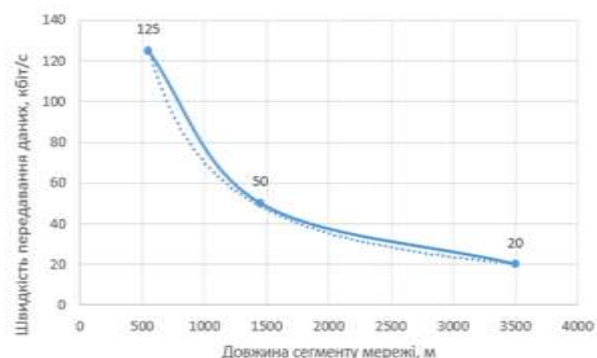


Рисунок 4 – Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 550 м до 3500 м

Таблиця 3 – Аналіз значень швидкостей передавання даних встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (2)

Довжина сегменту мережі SafetyBUS p, м	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p, кбіт/с	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена за допомогою математичної моделі (1), кбіт/с	Похибка, кбіт/с	Похибка, %
95	500	505,24	5,24	1,05
240	250	243,18	6,82	2,73
550	125	126,36	1,36	1,08
1450	50	48,39	1,61	3,21
3500	20	20,23	0,23	1,13

Як видно з таблиці 2, визначена математична модель (1) відтворює зміну швидкості передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS p від довжини сегмента з похибкою від 1,05% до 3,21%.

Висновки

Визначено математичну модель зміни швидкості передавання даних від довжини сегмента спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p, яка відтворює зміну швидкості передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS p від довжини сегменту з похибкою від 1,05% до 3,21%. Визначена математична модель зміни швидкості передавання даних в мережі SafetyBUS залежно від довжини сегмента даної спеціалізованої цифрової мережі сприятиме ефективнішому проектуванню автоматизованих систем керування технологічними процесами на базі мережі SafetyBUS p.

Список використаних джерел / References

1. Babchuk S.M., Babchuk I.S. Matematychna model zminy shvydkosti peredachi danykh v zalezhnosti vid zminy dovzhyny sehmentu spetsializovanoi tsyfrovoi merezhi DeviceNet na bazi tovtstoho kruhloho

kabelia. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. 2023. №3. P. 115-119. [in Ukrainian]

2. SafetyBUS p. URL: <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/5121287>

3. SafetyBUS p. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/SafetyBUS_p

4. Programmable Safety Systems. PSS-Range. URL: http://t-life.com.ua/img/files/Pilz/PSS_SB_ACTIVE_JUNC_BAS_Op_Man_20748-EN-03.pdf

5. SafetyBus P Head Module. URL: <https://www.classicautomation.com/Part/312010?srsId=AfmBOoo9eEFaWyBN1XOyJ2Y6q5lgi5zqUFbGbJ8KTsKDy78ef5ALXLkD>

6. Bridge for SafetyBUS p. URL: https://docs.galco.com/techdoc/pilz/pss_sb_bridge_dat.pdf

7. SafetyBUS p Digital Input Module. URL: https://www.classicautomation.com/Part/311300?srsId=AfmBOooHFLmtBcf102mps83wFDWBHXpDBJlosnXDPeqEefF6UM_YqpO1

8. SEMI E54.15 - Specification for Sensor/Actuator Network Communications for SafetyBUS p. URL: <https://store-us.semi.org/products/e05415-semi-e54-15-sensor-actuator-network-communication-specification-for-safetybus-p>

9. We provide the right products for your SafetyBUS p diagnosis. URL: <https://www.indu-sol.com/en/diagnosis/safetybus-p/products/>

10. SafetyBUS p cable for flexible applications. URL: <https://www.sab-cable.com/products/bus-cables-and-wires/s-sbp-684-move.html>

11. SafetyBUS p FRNC STATIC yellow 3 x 0,75 mm². URL: <https://shop.helukabel.com/sg-en/safetybus-p-frnc-static-m800651/800651>

12. Programmable Safety Systems PSS®-Range: SafetyBUS p. Pilz GmbH & Co. KG. 93 p.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE
DEPENDENCE OF DATA TRANSMISSION
RATE ON THE LENGTH OF THE
SEGMENT OF THE SPECIALIZED
NETWORK SAFETYBUS P**

S. M. Babchuk, I. S. Babchuk

Ivano-Frankivsk National Technical University
of Oil and Gas,
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine;
e-mail: serhii.babchuk@nung.edu.ua