

УДК 004.896

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

С. Ю. ЛЕОНОВ*, О. Р. БОРОВИК

кафедра Обчислювальної техніки та програмування, факультет комп'ютерних та інформаційних технологій, Харків, УКРАЇНА
*e-mail: serleomail@gmail.com

АНОТАЦІЯ У даній статті були розглянуті методи і засоби забезпечення електромагнітної сумісності, які можуть застосовуватися для зменшення впливу перехресних перешкод між провідниками на платі пристрою. Було проаналізовано причини і механізм виникнення перехресних перешкод, які можуть порушити коректну роботу пристрою через зміну логічного рівня сигналу на провіднику-жертві внаслідок впливу на нього наведеної перехресної перешкоди. Було виконано моделювання впливу перешкод на сигнал в пасивній лінії в залежності від відстані між ними, довжини прилеглої ділянки провідників, матеріалів провідників. Для дослідження була побудована логічна схема електронного пристрою, зокрема шифратор, і його печатна плата. Були проведені експерименти при використанні таких даних: товщина провідників дорівнює 5, 6 і 1.2 мілідюймов, відстань між провідниками рівна 5 і 6 мілідюймов, довжина прилеглих ділянок провідників дорівнює 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320 і 300 мілідюймов. Також застосовувались матеріали провідників, які мають різні значення питомої електропровідності: срібло (62500000 См/м), мідь (5950000 См/м), платина (10000000 См/м), золото (43000000 См/м), нікель (15000000 См/м), алюміній ($35 \cdot 10^6$ См/м), сталь (1400000 См/м). Дослідження виконувались на спроектованій логічній схемі електронного пристрою і його печатній платі. Були отримані дані про величини наведених перехресних перешкод. В ході виконання досліджень були встановлені і підтверджені залежності збільшення величини значення перехресних перешкод від збільшення довжини прилеглих ділянок, зменшення відстані між провідниками.

Ключові слова: електромагнітна сумісність; перехресні перешкоди; печатна плата; моделювання; САПР; шифратор; електронний пристрій

RESEARCH OF ELECTRONIC DEVICES TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

S. LEONOV, O. BOROVYK

Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT In this article methods and means of ensuring electromagnetic compatibility were considered, which can be used to reduce the effect of crosstalk between conductors on the device board. We analyzed the causes and mechanism of crosstalk, which can disrupt the correct operation of the device due to a change in the logic level of the signal on the victim conductor due to the effect of crosstalk pickup on it. The simulation of the influence of interference on the signal in the passive line was automated depending with the distance between conductors, the length of the adjacent section of conductors, and conductor materials. For the study, a logical circuit of an electronic device, in particular encoder, and a printed circuit board were built. Experiments were carried out using the following data: conductor thickness of 5, 6 and 1.2 mils, conductor spacing of 5 and 6 mils, adjacent conductor lengths of 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320 and 300 mils, and materials conductors that have different values of specific electrical conductivity: silver (62,500,000 S/m), copper (5950,000 S/m), platinum (10,000,000 S/m), gold (43,000,000 S/m), nickel (15,000,000 S/m), aluminum ($35 \cdot 10^6$ S/m), steel (1400000 S/m). The data on the values of crosstalk were obtained. Research performed at the designed logic circuit electronic device and its circuit board. The data on the values of crosstalk were obtained according to the constructed reports. In the course of these studies, the dependences of an increase in the value of crosstalk on an increase in the length of adjacent sections, a decrease in the distance between conductors.

Keywords: electromagnetic compatibility; crosstalk; printed circuit board; modeling; CAD; encoder; electronic device

Вступ

Робота електронних пристроїв повинна гарантувати коректність вихідних даних. Логічний рівень сигналу в провідниках плати електронного пристрою може змінитися внаслідок впливу перешкод. Тому актуальним є питання забезпечення правильного функціонування пристрою з урахуванням можливого впливу факторів перешкод, зумовлених електромагнітною сумісністю окремих провідників на платі.

Дослідження причин виникнення перешкод між провідниками на платі електронного пристрою дозволяє знайти помилки при забезпеченні електромагнітної сумісності пристрою на стадії його проектування і побудови [1,2]. Якщо напруга наводки достатня, це може привести до зміни логічного рівня з нуля на одиницю і навпаки. Згідно диференціальних рівнянь, що описують перехідні процеси в активній і пасивній лініях (1),

$$\begin{cases} \frac{\partial i^a}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial U^a}{\partial t} + C_{\epsilon 0} \frac{\partial U^n}{\partial t} \\ \frac{\partial i^n}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial U^n}{\partial t} + C_{\epsilon 0} \frac{\partial U^a}{\partial t} \\ \frac{\partial U^a}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial i^a}{\partial t} - L_{\epsilon 0} \frac{\partial i^n}{\partial t} \\ \frac{\partial U^n}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial i^n}{\partial t} - L_{\epsilon 0} \frac{\partial i^a}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

де U^a, U^n – напруги відповідно в активній та пасивній лініях, i^a, i^n – струми відповідно в активній та пасивній лініях, C_0 – взаємна ємність аналізованих провідників, L – їх взаємна індуктивність.

а також формули оцінки можливого впливу напруги перехресної завади на зміну сигналу в пасивній лінії (2)

$$U_{\Sigma}^n = \left[\frac{U^a R C_{B0}}{t_U} + \frac{I^a R_B L_{B0}}{t_I (R_{Bx} + R_{aux})} \right] l_{\epsilon 3} \quad (2),$$

де $l_{\epsilon 3}$ – довжина прилеглої ділянки провідників, U^a, U^n – напруги відповідно в активній та пасивній лініях, R – опір в лініях,

було встановлено залежність напруги перехресної перешкоди від довжини прилеглих ділянок провідників, що є важливим при виконанні трасування [1,3,4]. У разі, якщо значення опору, ємності й індукції є незмінними, то досить велике значення довжини може викликати спотворення сигналу на провіднику-жертві. Перехресні перешкоди від провідника-джерела можуть впливати і спотворювати сигнал на зворотному або ближньому кінці провідника-жертви (NEXT) [2,3,5] а також на кінцях провідника-жертви (FEXT) [2,6,7]. Коефіцієнт перехресної перешкоди розраховується за формулами:

$$\begin{aligned} NEXT &= -20 \log \left(\frac{V_n}{V_i} \right) \\ FEXT &= -20 \log \left(\frac{V_f}{V_i} \right), \end{aligned}$$

де V_f і V_n – напруга перехресної перешкоди, що впливає відповідно на дальній і ближній кінець провідника-жертви [8-10].

Значення напруги перехресної перешкоди в залежності від напрямку розраховується наступним чином (3):

$$V_{\text{бл}} = \frac{V_{\text{вх}}}{4} \left[\frac{L_{12}}{L_{11}} + \frac{C_{12}}{C_{11}} \right], V_{\text{дал}} = \frac{V_{\text{вх}} * X * \sqrt{LC}}{2 * T} \left[\frac{L_{12}}{L_{11}} + \frac{C_{12}}{C_{11}} \right], \quad (3)$$

де $V_{\text{вх}}$ – вхідна напруга на провіднику агресорі, L – індуктивність, C – ємність, X – довжина загальної ділянки, T – тривалість наростання сигналу на провіднику-агресорі [3,11-16].

Загальне рівняння результуючої напруги для перехресної перешкоди таке (4):

$$V_{\text{Хталк}} = \frac{1}{2} * l * t^{-1} * \left(C * Z - \frac{L}{Z} \right) * V(t), \quad (4)$$

згідно з яким l – це загальна взаємна довжина досліджуваних провідників, t – тривалість наростання сигналу на провіднику-агресорі, C – взаємна ємність, L – взаємна індуктивність, Z – імпеданс, V – рівень зміни сигналу на провіднику-агресорі [4,13,17].

Перехресні перешкоди можуть бути синфазними (Even) і протифазні (Odd). У разі синфазних, струм тече в одному напрямку, має однаковий знак. Протифазні перешкоди мають різний знак і протилежний напрямок [11-13,18].

Для пошуку і встановлення оптимальних параметрів, при яких вплив перешкоди буде мінімальним, було виконано автоматизоване проектування пристрою.

Мета статті

Виконати автоматизоване дослідження електронного пристрою на предмет перевірки коректності його функціонування у зв'язку з можливим спотворенням сигналу і зміни його логічного рівня через вплив перехресних перешкод між окремими провідниками на платі електронного пристрою.

Основна частина

Такі фактори, як товщина, ширина, відстань між провідниками і їх кількість, можуть викликати спотворення сигналу на провіднику-жертві.

Першим кроком була виконана побудова структурної схеми в системі автоматизованого проектування OrCAD, були отримані його часові діаграми, потім було виконано трасування в середовищі Allegro PCB [14,15]. Схеми і плата пристрою показані на рис. 1.

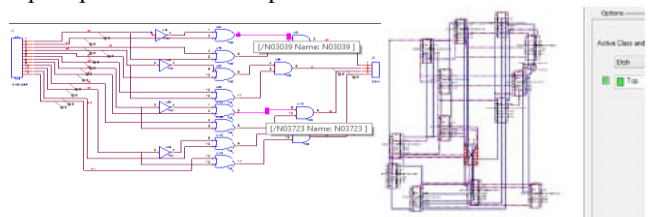


Рис. 1 – Логічна схема та плата пристрою

Було обрано провідники для проведення досліджень (N03723, N03039), які зображені на платі на рис. 2.

Для проведення досліджень було проведено моделювання при значеннях товщини провідників: 1,2, 5, 6 мілідюймів. Результати представлені в табл. 1. Згідно з отриманими результатами, зі зменшенням товщини провідників відбувається зменшення напруги перехресної перешкоди. В таблиці символи Ls/Hs означають низький або високий рівень на провіднику-жертві; Even/Odd – перехід рівня сигналу на провіднику-агресорі з низького на високий і навпаки.

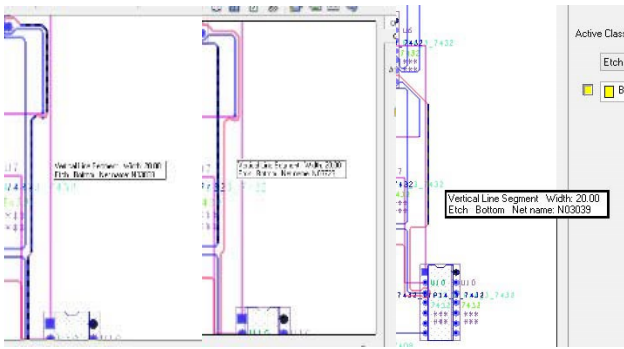


Рис. 2 – Вибір провідників для досліджень

Таблиця 1 – Значення перешкод при різних товщинах провідників

Товщина, мілідюйм	Максимальне значення напруги завади, мВ	Тип перехресної завади
1,2	496,5	LSEvenXtalk
5	707,9	HsOddXtalk
6	770,8	HsOddXtalk

Далі було проведено дослідження, в якому було автоматизовано, але з використанням ручного трасування, встановлено залежність значення величини перехресної перешкоди від відстані між досліджуваними провідниками. В ході даного дослідження були виконані наступні дії: моделювання напруг сигналів на провідниках в разі використання відстані між ними 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320, 300 мілідюймів. Результати наведені в табл. 2, а також показані у вигляді діаграм на рис. 3, 4.

Таблиця 2 – Значення перешкод при зміні прилеглих ділянок провідників

Довжина, мілідюйми	Максимальна напруга перешкоди, мВ	Тип перехресної перешкоди
4340	931, Even	LSEvenXtalk
2020	847, Even	LSEvenXtalk
1620	414 Odd	HSOddXtalk
1050	345,6 Even	LSEvenXtalk
630	80,78 Even	LSEvenXtalk
320	69,47 Even	LSEvenXtalk
300	-	-

При зменшенні довжини прилеглої ділянки до 300 мілідюймів спостерігалася відсутність спотворення сигналу на провіднику-жертві.

На рис. 3 можна спостерігати подачу імпульсного сигналу на провідник агресор, а також його вплив на провідник-жертву в режимі NEXT і FEXT.

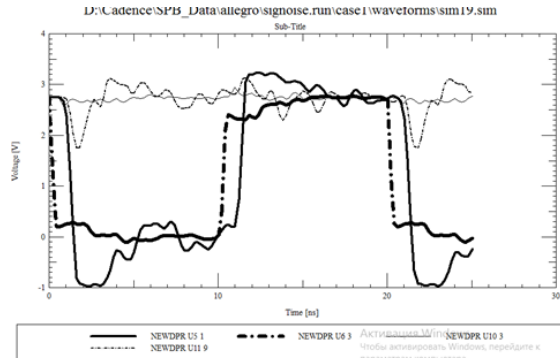


Рис. 3 – Графік зміни сигналів внаслідок дії перехресних завад

На провідник агресор N03039 (на вхідний порт U5 1) був поданий імпульсний сигнал (жирний графік), значення вихідного сигналу аналізується на порту U6 3 (штрих-пунктирна жирний графік). Сигнал на даному провіднику викликає перехресні завади HSOddXtalk на провіднику жертви N03723, сигнал на якому зображений у вигляді графіка U10 3. На цей сигнал діє зворотній вплив перешкоди (NEXT). Сигнал на виході U11 9 (штрих-пунктирний графік, тонкий), який приймає перешкоду типу FEXT, схильний до впливу. Ці графіки зображені на рис. 4. В окремі моменти часу перешкоди на вхідному сигналі такі: на інтервалі часу 1.5-2 нс перешкода 0,01 В, на інтервалі часу 3-4 нс – 0,05 В, на інтервалі часу 16-17 нс – 0,05 В, на інтервалі часу 12,5-13 нс – 0,05 В, на інтервалі часу 23-24 нс – 0,1 В. Слід відмітити, що за рахунок впливу сусіднього провідника напруга на провіднику-жертві може істотно змінитися щодо очікуваної. На наведеному графіку рівні сигналів позначені як VIL і VIH (2В і 3 В відповідно). При цьому VIH – мінімальний рівень сигналу, який з'являється на вході пристрою (U10 3) і представляє логічну одиницю; VIL – максимальний рівень сигналу, який буде на вході пристрою (U10 3). Він представляється як логічний нуль.

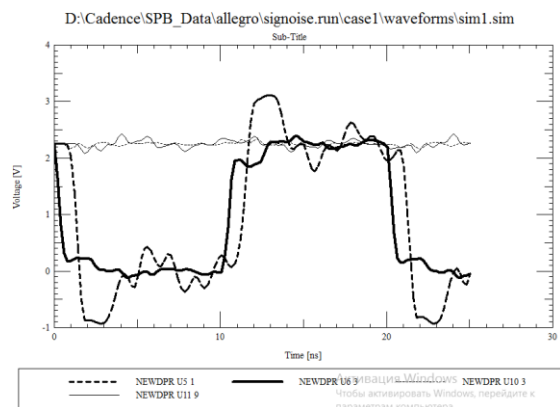


Рис. 4 – Зменшення спотворення сигналу на пасивній лінії

На рис. 4 показано графік імпульсного сигналу, поданого на вхід провідника агресора N03039 (U5 1 – вхідний сигнал, обозначено на графіку товстюю

переривчастою лінією, U6 3 – вихідний сигнал, на графіку обозначено жирною суцільною лінією). На цьому рисунку показано також отриману в результаті моделювання перехресну перешкоду HSOddXtalk, викликану імпульсним сигналом на провідник N03723 (рис. 2). Цей вхідний сигнал зображений тонким пунктирним графіком (U10 3) і зумовлен зворотним впливом перешкоди (NEXT). Вихідний сигнал (U11 9), зображений тонким суцільним, відображає вплив прямої перешкоди (FEXT), яка виникає після збільшення простору між провідником агресором N03039 і провідником жертвою N03723, а також скорочення прилеглої ділянки цих провідників на платі. На рис. 4 можна побачити також перешкоди, які виникли на провіднику-жертві, на інтервалах часу 11-12 нс – 10 мВ; на інтервалах часу 3,5-4,5 нс і 22-24 нс – 180 мВ. Варто зазначити, що певна кількість перешкод збереглася, проте значно зменшилася, також зменшилася і амплітуда напруги перешкод на провідниках (максимальне значення зменшилось до 180 мВ в порівнянні з 0,9 В у випадку з більш довгою прилеглою ділянкою і меншим простором між провідниками).

Далі було проаналізовано вплив відстані між провідниками на значення величини перехресної перешкоди. Були обрані значення відстані 5 і 6 міліджоїмів. Після виконання автоматизованого проектування були отримані дані, які представлені в табл. 3. Було встановлено, що при відстані, як мінімум 6 міліджоїмів, перешкода не викликає спотворення сигналу на провіднику жертви.

Таблиця 3 – Зменшення напруги перехресної завади при збільшенні відстані між провідниками

Відстань, міліджоїм	Напруга перехресною перешкоди
5	587.3, HsOddXtalk
6	-

Також було проведено дослідження щодо впливу матеріалів провідників на величину перехресною перешкоди. Для даних експериментів були взяті метали з різними значеннями питомої електропровідності: срібло (62500000 См/м), мідь (59500000 См/м), платина (100000000 См/м), золото (430000000 См/м), нікель (150000000 См/м), алюміній ($35 \cdot 10^6$ См/м), сталь (140000000 См/м). При виконанні моделювання було обрано прилеглу ділянку між провідниками довжиною 550 міліджоїмів. Товщина обох провідників була встановлена 5 міліджоїмів, відстань між ними 1.2 міліджоїма. Отримані значення показані в табл. 4, в якій приведені значення напруги перешкоди і її тип. Однак можна звернути увагу, що істотного зміни напруги перехресною перешкоди не спостерігається тільки в разі, якщо обидва провідники мають матеріал сталь. При цьому значення напруги нижче на 12 мВ щодо інших результатів.

Таблиця 4 – Значення напруги перехресних перешкод при різних матеріалах провідників

Матеріал	Максимальна напруга перехресною завади, мВ	Тип перехресною перешкоди
срібло	141.6	LSEvenXtalk
платина	141.3	LSEvenXtalk
мідь	143	LSEvenXtalk
алюміній	142.7	LSEvenXtalk
сталь	128.4	LSEvenXtalk
золото	142.8	LSEvenXtalk
нікель	141.9	LSEvenXtalk

Обговорення результатів

В ході дослідження були виконані дослідження з різними товщинами провідників (показані в табл. 1), дослідження при зменшенні величини товщини обох провідників, за рахунок якого очікується зменшення значення перехресною перешкоди, що впливає на пасивну лінію: від 770,8 мВ при товщині 6 міліджоїмів до 496,5 мВ при товщині 1.2 міліджоїма.

Під час проведення дослідження впливу довжини прилеглої ділянки провідників на величину перехресною перешкоди були отримані результати, що описують зниження величини перешкоди від зменшення довжини прилягання провідників: від 931 мВ при 4340 міліджоїмах до повної відсутності спотворення при довжині ділянки прилягання 300 міліджоїмів. Порівнюючи графіки, зображені на рис. 2, 3, можна побачити імпульсні сигнали, подані на вхід провідника-агресора, а також зниження амплітуди перешкоди в пасивній лінії при зменшенні довжини прилеглої ділянки провідників.

Після проведення досліджень щодо впливу величини відстані були отримані дані, що вказують, що при відстані між провідниками, рівному 5 міліджоїмів, значення напруги стає 587.3 мВ, при подальшому збільшенні відстані перешкода не викликає спотворення сигналу на провіднику-жертві.

Після проведення дослідження впливу матеріалу провідників електронного пристрою було встановлено, що зміна матеріалу не веде до істотної зміни сигналу на пасивній лінії.

Висновки

Таким чином, в ході даного дослідження за допомогою систем САПР OrCAD і Allegro було встановлено вплив товщини, відстані між провідниками і довжини прилеглих ділянок провідників на величину перехресною перешкоди. Встановлено допустиму довжину ділянки прилягання провідників (300 міліджоїмів), товщину (5 міліджоїмів), відстані між провідниками (6 міліджоїмів), при яких пристрій працює коректно, не змінюючи рівнів сигналів на провідниках

внаслідок перехресних перешкод. Також даного ефекту можна досягти, розмішуючи між провідниками на печатній платі шар землі, а також за рахунок застосування екранування. Отримані дані вказують про необхідність урахувати цих особливостей при проектуванні і виготовленні печатних плат електронних пристроїв для уникнення небажаних збоїв функціонування і гарантування коректної роботи пристрою.

Список літератури

1. Савельев А. Й. *Проектирование компьютеров и систем*, Москва: Вища школа, 1984. 284 с.
2. Фей Дай, Ян Лю. *Теория та методи проектування кількісних оцінок щодо електромагнітної сумісності на рівні системи*, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-3690-4.
3. Джункі Женг. *Електромагнітна сумісність (EMC) Розробка та аналіз тестових кейсів*, 2019. doi: 10.1002/9781118956847.
4. Генрі В. Отт. *Техніка електромагнітної сумісності*, 2009. doi: 10.1002 / 9780470508510.
5. Ерік Богатін. *Цілісність сигналу*, 2018.
6. Пол Клейтон. *Вступ Електромагнітна сумісність*. 2006. doi: 10.1002/0471758159.
7. Марк Ван Гельворт, Матьє Меленхорст. EMC для установників. Електромагнітна сумісність систем та установок, 2018. Doi: 10.1201 / 9781315119359.
8. Кейзер Кенет, Довідник з електромагнітної сумісності, 2005 р.
9. Четан Каталай, Практичний підхід до електромагнітної сумісності, 2020 р.
10. Zhang, J., Xu, W., Chen, D., Zhang, C. Порівняльне дослідження схем, оптимізованих за струмом і напругою, для системи WPT з декількома передавачами і одним приймачем. Журнал електронної та комп'ютерної інженерії (Scopus), 2020.
11. Волін М.Л. Паразитні процеси в електронному обладнанні. Друге видання переглянуте та розширене. Москва, Видавництво "Радіо та зв'язок", 1981.
12. Князев А.Д., Проектування радіоелектронної та електронно-обчислювальної техніки з урахуванням електромагнітної сумісності. Москва, Видавництво радіо та зв'язку, 1989.
13. Рогінський В. Ю. Екранування в радіоприладах. Ленінград, Видавництво "Енергія", 1969.
14. Шапіро Д.Н. Основи теорії електромагнітного екранування. Ленінград, Видавництво "Енергія", 1975.
15. Дизайн печатної плати за допомогою OrCAD Capture та редактора печатних плат, 1-е видання, Крейг Міцнер.
16. Цифрові інтегральні схеми. Методологія проектування, 2-е видання.
17. Касрі, Піах. Компактний високовольтний імпульсний генератор для імпульсних застосувань електричного поля: Розробка лабораторних масштабів. Журнал електронної та комп'ютерної інженерії (Scopus), 2020.

18. Манкалале М.Г., Лян З., Чжао З., Магнітоелектрична логічна технологія на основі композитного входу. Журнал IEEE про дослідницькі твердотільні обчислювальні пристрої та схеми, 2017, с. 27-36 (Scopus).

References (transliterated)

1. Savelyev A.Y. Design of computers and systems, Moscow: Higher school, 1984. – 284 p.
2. Fei Dai, Yan Liu. Theory and Methods of Quantification Design on System-Level Electromagnetic Compatibility, 2019. Doi: 10.1007/978-981-13-3690-4.
3. Junqi Zheng. Electromagnetic Compatibility (EMC) Design and Test Case Analysis, 2019. doi:10.1002/9781118956847.
4. Henry W. Ott. Electromagnetic Compatibility Engineering, 2009. Doi: 10.1002/9780470508510.
5. Eric Bogatin, Signal Integrity, 2018.
6. Paul Clayton. Introduction Electromagnetic Compatibility. 2006. Doi: 10.1002/0471758159.
7. Mark Van Helvoort, Mathieu Melenhorst. EMC for Installers. Electromagnetic Compatibility of Systems and Installations, 2018. Doi: 10.1201/9781315119359.
8. Kaiser Kenneth L, Electromagnetic Compatibility Handbook Hardcover, 2005.
9. Chetan Kathalay. A Practical Approach to Electromagnetic compatibility, 2020.
10. Zhang, J., Xu, W., Chen, D., Zhang, C. A Comparative Study on Current-And Voltage-Optimized Circuit Scheme for Multiple-Transmitter and Single-Receiver WPT System, Journal of Electrical and Computer Engineering (Scopus), 2020.
11. Volin M.L. Parasitic processes in electronic equipment. Second edition revised and enlarged. Moscow, Publishing House "Radio and Communication", 1981.
12. Knyazev A.D. Design of radio-electronic and electronic-computing equipment, taking into account electromagnetic compatibility. Moscow, Radio and Communication Publishing House, 1989.
13. Roginsky V.Yu. Shielding in radio devices. Leningrad, Energiya Publishing House, 1969.
14. Shapiro D.N. Fundamentals of the theory of electromagnetic shielding. Leningrad, Energiya Publishing House, 1975.
15. PCB Design with OrCAD Capture and PCB Editor, 1st Edition, Craig Mitzner.
16. Digital integrated circuits. Design Methodology, 2nd Edition.
17. Kasri, N.F., Piah, M.A.M., Adzis, Z. Compact High-Voltage Pulse Generator for Pulsed Electric Field Applications: Lab-Scale Development., Journal of Electrical and Computer Engineering (Scopus), 2020.
18. Mankalale M.G., Liang Z., Zhao Z. Composite-Input Magnetolectric-Based Logic Technology. IEEE Journal on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits, 2017, pp. 27-36 (Scopus).

Відомості про авторів (About authors)

Леонов Сергій Юрійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра обчислювальної техніки та програмування, м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0001-8139-0458; email: serleomail@gmail.com

Sergey Leonov – Doctor of Technical Sciences, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8139-0458; e-mail: serleomail@gmail.com

Боровик Олексій Романович – студент магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра обчислювальної техніки та програмування, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2097-5994; e-mail: science.alex.email@gmail.com

Oleksiy Borovik – Master's student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Computer Engineering and Programming Department, Kharkov, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2097-5994; e-mail: science.alex.email@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Леонов С. Ю., Боровик О. Р. Дослідження роботи електронних пристроїв з урахуванням електромагнітної сумісності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 71-76. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11.

Please cite this article as:

Leonov S., Borovuk O. Research of electronic devices taking into account electromagnetic compatibility. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 71-76, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Леонов С. Ю., Боровик А. Р. Исследование работы электронных устройств с учётом электромагнитной совместимости. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2020. № 4 (6). С. 71-76. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11.

АННОТАЦІЯ В статті розглянуті методи і засоби забезпечення електромагнітної сумісності, які можуть застосовуватися для зменшення впливу перехресних перешкоджань між провідниками на платі пристрою. Були проаналізовані причини і механізм виникнення перехресних перешкоджань, які можуть порушити коректну роботу пристрою через зміну логічного рівня сигналу на провіднику-жертві внаслідок впливу на нього наводки перехресної перешкоди. Було виконано моделювання впливу перешкоди на сигнал в пасивній лінії в залежності від відстані між провідниками, довжини прилеглої частини провідників, матеріалів провідників. Для дослідження була розроблена логічна схема електронного пристрою, в частині шифратора, і його друкована плата. Були проведені експерименти при використанні наступних даних: товщина провідників рівна 5, 6 і 1.2 мільйонів, відстань між провідниками рівна 5 і 6 мільйонів, довжина прилеглих частин провідників рівна 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320 і 300 мільйонів. Також в ході експериментів були використані матеріали провідників, які мають різні значення питомої електропровідності: срібло (62500000 См/м), мідь (5950000 См/м), платина (10000000 См/м), золото (43000000 См/м), нікель (15000000 См/м), алюміній ($35 \cdot 10^6$ См/м), сталь (1400000 См/м). Були отримані дані про величини перехресних перешкоджань. В ході виконання досліджень були встановлені і підтверджені залежності збільшення величини значення перехресних перешкоджань від збільшення довжини прилеглих частин, зменшення відстані між провідниками. Встановлено, що матеріали провідників, які мають різну електропровідність, не викликають суттєвого впливу на величину перехресної перешкоди.

Ключевые слова: електромагнітна сумісність; перехресні перешкоди; друкована плата; автоматизоване проектування; САПР; шифратор; електронне пристроїв

Надійшла (received) 28.11.2020