

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-24>

УДК 621.391

**Рощенко Олексій Миколайович**, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-3562-5428>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕШКОД НА ЕЛЕКТРОННИЙ ПРИСТРІЙ

**Рощенко О.М. Вплив електромагнітних перешкод на електронний пристрій.** У статті розкрито вплив електромагнітних перешкод на електронний пристрій. Описано напрямки застосування супутникової системи навігації та наголошено на її важливості в умовах сьогодення. Охарактеризовано підхід до захисту від електромагнітних перешкод та випромінювання який наразі застосовується на базі медичної техніки та виробничої системи. Визначено підґрунтя та напрямки розповсюдження імпульсного сигналу, його особливості та спектр дії. Окреслено складову імпульсного сигналу та частотну відстань. Так, у роботі зазначається, що вид імпульсної інтерференції, що розглядається є радіочастотним імпульсним сигналом, який, у свою чергу змодульований синусоїдальною несучою, математична модель якої наведена у часовій області дії. Математично обґрунтовано принцип визначення частотного спектру імпульсного сигналу, з наведеного опису відокремлено спектральну огинаючу імпульсного сигналу основної смуги. Наголошується, що імпульсні перешкоди мають той самий тип сигналу та форму спектру потужності, що й код визначення дальності супутникової системи навігації, що дозволяє змішуватися сигналам в процесі демодуляції основної смуги, і, як наслідок, впливати на відповідну обробку навігаційних сигналів. Описано механізм визначення кінцевої вихідної потужності перешкод корелятора. Куди покладено як показник затримки передачі, частоти перешкод так і фазову похибку, що у сукупності дає точне значення вихідної потужності. У процесі математичного моделювання виявлено, що вплив імпульсних сигналів перешкод на навігаційні сигнали залежить від комбінації параметрів імпульсу, зсуву частоти перешкод і характеристик коду дальності. Також зазначається принцип накладення двійкової фазової маніпуляції. Сформовано графік результатів моделювання частоти бітових помилок під впливом імпульсних перешкод, який наочно доведе запропоновану математичну модель.

**Ключові слова:** екранування, захист, навігація, вплив, перешкода, імпульс, супутник, завада, електронний пристрій.

**Roschenko O. The influence of electromagnetic interference on an electronic device.** The article describes the impact of electromagnetic interference on an electronic device. The areas of application of the satellite navigation system are described and its importance in today's conditions is emphasized. The approach to protection against electromagnetic interference and radiation, which is currently used on the basis of medical equipment and production systems, is characterized. The basis and directions of propagation of the pulse signal, its features and spectrum of action are determined. The component of the pulse signal and the frequency distance are outlined. Thus, it is noted in the paper that the considered type of pulse interference is a radio frequency pulse signal, which, in turn, is modulated by a sinusoidal carrier, the mathematical model of which is given in the time domain. The principle of determining the frequency spectrum of an impulse signal is mathematically substantiated, and the spectral envelope of the impulse signal of the main band is separated from the given description. It is emphasized that pulse jammers have the same signal type and power spectrum shape as the ranging code of the satellite navigation system, which allows the signals to shift during the baseband demodulation process and, as a result, affect the corresponding processing of the navigation signals. The mechanism for determining the final output power of correlator interference is described. Where is the indicator of transmission delay, interference frequency and phase error, which together gives the exact value of the output power. In the process of mathematical modeling, it was found that the influence of pulse signals of obstacles on navigation signals depends on the combination of pulse parameters, the shift of the frequency of obstacles and the characteristics of the range code. The principle of superimposing binary phase manipulation is also noted. A graph of the results of the simulation of the frequency of bit errors under the influence of impulse interference has been created, which clearly proves the proposed mathematical model.

**Key words:** shielding, protection, navigation, influence, obstacle, impulse, satellite, interference, electronic device.

**Вступ та постановка проблеми.** Основи забезпечення військової безпеки країни вирішуються через широкий спектр завдань, таких як, будівництво, розвиток і застосування Збройних Сил України, супровід розробки, створення та аналіз результатів застосування сучасних систем озброєння, а також формування вимог до оборонних комплексів, що йдуть їм на зміну. Враховуючи ситуацію що склалася 24 лютого 2022 року, коли сусідня держава вчинила воєнний наступ актуальність даного дослідження набуває особливого значення.

В останні роки супутникова система навігації (GNSS), широко використовується у військовій, цивільній та комерційній сферах. Однак із зростанням розвитку електронного інформаційного обладнання електромагнітне середовище сповнене складних сигналів радіоперешкод. Коли радіочастотні перешкоди від частотного обладнання або космічного випромінювання потрапляють у робочу смугу частот приймача супутникової системи навігації, це серйозно впливає на продуктивність прийому та відстеження приймача, знижує точність позиціонування та навіть призводить до втрати супутникового відстеження. Саме тому дослідження

впливу електромагнітних перешкод на електронний пристрій у рамках навігаційної системи є особливо актуальним питанням.

Проблеми дієвого застосування навігаційної апаратури супутникової системи навігації в системах навігації та наведення озброєння та військової техніки виникають через низьку перешкодостійкість. Одним із факторів, що істотно впливають на точність навігаційної апаратури, є вплив електромагнітних полів.

Для ефективної протидії негативному впливу застосовують різноманітні методи захисту електронних приладів. Найбільш технічно простим способом вирішення проблеми електромагнітного випромінювання є заміна або виключення зі схеми приладів елементи яких чутливі до електромагнітних полів. У разі, коли такий варіант неможливий, доцільно вдаватися до методу, який дозволить або повністю запобігти, або послабити електромагнітну дію до такого рівня, при якому виключається виникнення помилок в обладнанні, що використовується. Таким методом є екранування. Ефективність екранування безпосередньо залежить від матеріалу та конструктивних особливостей корпусу екрана. Існує безліч матеріалів, які можуть бути застосовані в якості екрануючого засобу. Вся проблема полягає лише в тому, що всі ці матеріали максимально ефективні лише у певних, конкретних випадках. Якщо ж говорити про конструкцію екрана, то варто помітити, що найбільший вплив на ефективність екранування має форма екрану, товщина стінки та наявність щілин, отворів для елементів керування та кабелів, резонансних ефектів порожнин і т.д.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підхід наукової спільноти до розгляду рівня впливу електромагнітних перешкод на сучасні електронні пристрої визначається ґрунтовним обсягом робіт.

Викладений у [1] матеріал розкриває вплив перехресних завад на роботу електронного пристрою, проектування якого необхідно виконати у рамках наукового завдання. Проаналізовано причини та 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.

Д. А. Іщенко, Д. Л. Федорчук, С. Д. Іщенко та Л. М. Маришук [2] запропонували підхід, згідно з яким дії високоточної зброї у процесі її наведення на об'єкти та відповідні заходи систем захисту, що вживаються на супротив. Науковці розглядають як антагоністичні, оскільки вони виконуються як з використанням передавальних і приймальних радіоелектронних засобів високоточної зброї, так і засобів радіоелектронної боротьби систем захисту. Застосування засобів радіоелектронної боротьби в операції в електромагнітному спектрі з метою протидії високоточної зброї досліджується як складова операції в електромагнітному спектрі.

Особливості розрахунку завадозахищеності радіозв'язку в умовах радіоподавлення запропонували В. П. Заславець, М. П. Долина, О. В. Чечуй [3]. Аналіз застосування сучасних засобів радіоелектронної боротьби свідчить про необхідність проведення розрахунків завадозахищеності ліній радіозв'язку при плануванні зв'язку та при забезпеченні управління військами (силами) в мирний, воєнний час та особливий період. Запропоновано застосування методики розрахунку завадозахищеності ліній радіозв'язку в умовах ведення радіоелектронного конфлікту.

У [4] систематизовано нормативні вимоги, що встановлені до стійкості приладів обліку електричної енергії від дії впливу на них радіочастотного електромагнітного випромінювання. Окреслено механізм впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання та визначено конструктивні елементи приладів обліку, чутливі до дії такого випромінювання. Теоретично обґрунтовано застосування електромагнітного екранування як дієвого технічного засобу запобігання впливу електромагнітного поля у радіочастотному діапазоні на відповідність обліку електричної енергії. Запропоновано поділ конструктивного виконання приладів обліку електричної енергії на групи за ознаками захисту від впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Pan Yanfei, Dai Mayin, Zhao Hongwei, Hu Nianguang, Guo Qiang, Huang Jintian [5], Kuila Chinmoy, Maji Animesh, Murmu Naresh, Kuila Tapas, Srivastava Suneel [6], Jiang Lu, Xue Cun, Zhou You-He [7], Tiwari Alavya, Tiwari Arushi, Bhatia Arpit, Chadha Utakarsh, Kandregula Satvik, Selvaraj Senthil Kumaran, Bhardwaj Preetam [8], Ma Guilei, Man Menghua, Zhang Yongqiang, Liu Shanghe [9], M'barki Zakaria, Rhazi Senhaji, Mejdoub Youssef [10], Liu Yaowen, Qu Sudong [11], Wanasinghe Dimuthu, Aslani Farhad, Ma Guowei [12], Zhao Kaiyuan, Xiao Sa, Wu Xiangyu, Wang Yang, Cheng Xian [13], Liu Yan, Yu Kang, Chen Ruixun [14], Crovetti Paolo [15], Shi Chaofan, Wang Mengyuan, Zhang Xin, Shi Wangzhou, Shi Hui, Zhang Yi [16], Tiwari Arun,

Kumar Amit, Said Zafar [17], Singh Dr. Avani, Mishra Monika, Ohlan Anil, Dhawan Sundeep [18] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання впливу електромагнітних перешкод на електронний пристрій залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

**Постановка завдання.** У рамках даної статті необхідно розкрити принципи впливу електромагнітних перешкод на електронний пристрій. Математично описати форму хвилі імпульсних перешкод і проаналізувати вплив імпульсних перешкод на продуктивність демодуляції навігаційного приймача.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Імпульсний сигнал перешкод відноситься до сигналу перешкод, який складається із серії вузьких імпульсів, що повторюються протягом періоду. Слід зазначити, що цей вид імпульсної інтерференції є радіочастотним імпульсним сигналом, модульованим синусоїдальною несучою, яка може бути змодельована у часовій області як:

$$I_{PUI}(t) = p(t)\sqrt{2J}\cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (1)$$

де  $J$  – потужність сигналу імпульсної перешкоди,

$f_i$  – центральна частота несучої,

$\theta_i$  – початкова фаза,

$p(t)$  – імпульсний сигнал основної смуги.

Вираз прямокутного імпульсу у часовій області якого можна записати як:

$$p(t) = \begin{cases} A, mT_p \leq t \leq (m + D)T_p, m = \text{int} \\ 0, \text{інше} \end{cases} \quad (2)$$

де  $A$  – амплітуда прямокутного сигналу,

$T_p$  – період імпульсу

$D$  – шпаруватість імпульсного сигналу відповідно.

Частота повторення  $f_{PRF} = 1/T_p$ .

Використовуючи перетворення Фур'є на формулі 2 знаходимо частотний спектр імпульсного сигналу:

$$p(f) = D \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(k\pi D) \delta\left(f - \frac{m}{T_p}\right)$$

Це, зокрема, показує, що спектральна огинаюча імпульсного сигналу основної смуги є функцією  $\text{sinc}$ , яка складається з дискретних спектральних ліній з інтервалом  $1/T_p$  а ширина смуги основного пелюстка спектральної лінії становить  $1/(DT_p)$ .

У сигналі супутникової системи навігації (GNSS – Global Navigation Satellite System) частотний спектр коду визначення дальності, який використовується для модуляції з розширеним спектром даних навігаційних повідомлень, також складається з дискретних спектральних ліній, а інтервал спектральних ліній становить  $1/T_c$  ( $T_c = 1$  мс, що є періодом коду ранжування). Імпульсні перешкоди мають той самий тип сигналу та форму спектру потужності, що й код визначення дальності GNSS. Певна подібність сигнальної системи дозволяє легко накладатися на навігаційні сигнали в процесі демодуляції основної смуги, тим самим впливаючи на відповідну обробку навігаційних сигналів.

У кореляційному процесорі імпульсний сигнал перешкоди множиться на локальний опорний код визначення діапазону, згенерований корелятором, а потім інтегратор виконує когерентну обробку інтегрування протягом часу  $T_d$  інтегрування. Кінцева вихідна потужність перешкод корелятора становить

$$P_{PUI} = k \left| \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} \sqrt{2J} \sum_{z=1}^{\infty} p(nT_s - zT_p) \cdot c(nT_s - \tau_n) e^{j(2\pi\Delta f_i nT_s + \Delta\theta_i)} \right| \quad (4)$$

де  $c(t)$  – локально згенерований опорний код розширення,

$\tau_n$  – затримка передачі,

$\Delta f_i$  – частота перешкод,

$\Delta\theta_i$  – фазова похибка.

Формула (4) показує, що вплив імпульсних сигналів перешкод на навігаційні сигнали залежить від комбінації параметрів імпульсу, зсуву частоти перешкод і характеристик коду дальності.

Еквівалент  $C/N_0 \in C/N_0$  на виході корелятора навігаційного приймача. За наявності перешкод вихідна потужність перешкод корелятора може бути еквівалентна приросту потужності шуму. У цей час еквівалент  $C/N_0$  під дією імпульсних перешкод становить

$$[C/N_0]_{eq} = \frac{P_s}{P_N + P_{PUI}},$$

де  $P_s$  – потужність навігаційного сигналу на виході корелятора,  
 $P_N$  – потужність шуму на виході корелятора.

Навігаційний сигнал модулюється двійковою фазовою маніпуляцією. Згідно з найкращою теорією виявлення приймача, частота бітових помилок системи під впливом імпульсних перешкод становить

$$P_e = (1 - D)Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) + DQ\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + N_J}}\right) \quad (6)$$

де  $N_0$  – одностороння спектральна щільність потужності шуму,

$E_b$  – потужність сигналу, що переноситься сигналом на біт ( $E_b = P_s/R_s$ ),

$N_J$  – спектральна щільність потужності імпульсної перешкоди,

$R_s$  – швидкість коду розширення.

Підставляючи  $E_b$  у формулу (6), отримаємо:

$$P_e = (1 - D)Q\left(\sqrt{\frac{2[C/N_0]_{eq}}{N_0 R_s (P_N + P_{PUI})}}\right) + DQ\left(\sqrt{\frac{2[C/N_0]_{eq}}{(N_0 + N_J) R_s (P_N + P_{PUI})}}\right)$$

З формули (7) видно, що частота бітових помилок обернено пропорційна еквівалентному  $C/N_0$  і прямо пропорційна робочому циклу. Припускаючи, що відношення сигнал/шум навігаційного сигналу становить 10 дБ, коли перешкоди не застосовуються, є можливість отримати результат моделювання частоти бітових помилок під впливом імпульсних перешкод, як показано на рисунку 1.

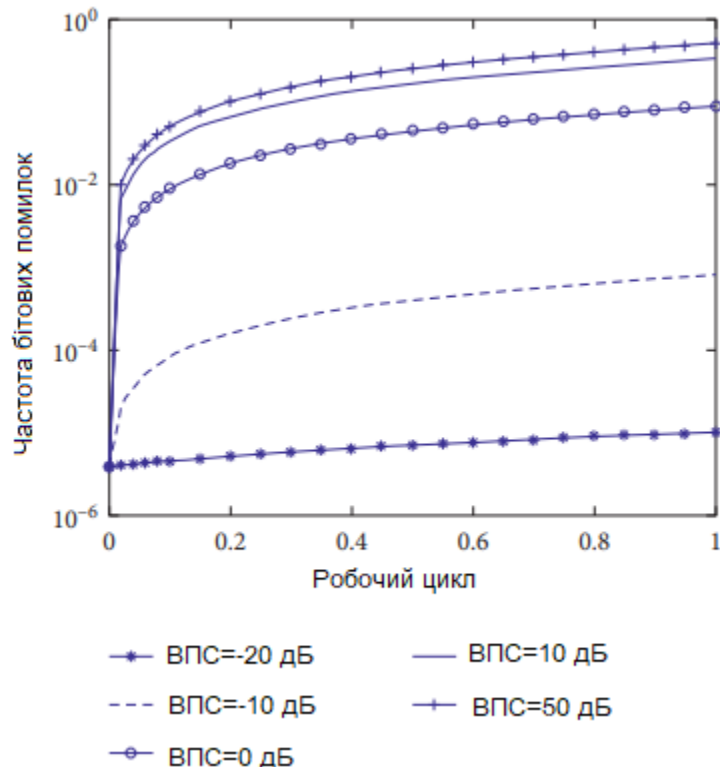


Рис.1 – Графік моделювання частоти бітових помилок під впливом імпульсних перешкод

З рисунка 1 видно, що зі збільшенням шпаруватості імпульсної перешкоди збільшується частота бітових помилок. Коли відношення перешкод до сигналу імпульсних перешкод становить - 20 дБ, частота бітових помилок є надзвичайно малою, і імпульсні перешкоди майже не впливають на навігаційну систему. З поступовим збільшенням відношення перешкод до сигналу відповідно зростає частота бітових помилок під час того самого циклу навантаження.

Коли відношення перешкод до сигналу  $> 10$  дБ, збільшення відношення перешкод до сигналу мало впливає на подальше погіршення продуктивності навігаційної системи. Це показує, що потужність перешкод імпульсної перешкоди значною мірою визначає ефект перешкод, але коли потужність перешкод досягає певного порогу, частота бітових помилок системи має тенденцію залишатися незмінною зі збільшенням відношення перешкод до сигналу. На даний момент частота бітових помилок більше не є ефективним показником якості навігаційного приймача. Якщо продовжити збільшувати відношення перешкод до сигналу, імпульсні перешкоди матимуть серйозний вплив на канал збору та відстеження, що призводить до втрати замкнутого циклу та супутникового відстеження, що значно впливає на продуктивність навігаційної системи.

**Висновки.** У роботі досліджено вплив електромагнітних перешкод на електронний пристрій. Проаналізовано частотно-часові характеристики імпульсного сигналу перешкод, а також вплив на продуктивність згорання та демодуляції навігаційної системи.

Існування імпульсних перешкод призводить до збільшення частоти бітових помилок навігаційної системи, і дана частота пропорційна робочому циклу та потужності перешкод.

За умови, якщо частота сигналу перешкод становить  $> 1560$  МГц, ефект ослаблення імпульсної перешкоди навігаційного сигналу значно сильніший, ніж у одно частотного імпульсного впливу. Пояснюється це тим, що імпульсна інтерференція та код вимірювання дальності мають подібні спектральні характеристики, які є кореляційною інтерференцією. Кілька дискретних спектральних ліній, що потрапляють у смугу інтегратора, можуть легко вплинути на згорання та демодуляцію навігаційного сигналу через корелятор, а менша потужність перешкод може досягти такого ж ефекту перешкод, як і одно частотний імпульсний вплив.

Перспективами подальшого дослідження є проектування екрануючого пристрою, дія якого буде максимально направлена на захист навігаційної системи від електромагнітного випромінювання.

#### Список бібліографічного опису

1. Леонов С. Дослідження впливу перехресних перешкод на роботу електронного пристрою / С. Леонов, Б. Клішчов // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2021. Т. 4 (66). С. 23-26. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.4.023>.
2. Іщенко Д. А., Федорчук Д. Л., Іщенко С. Д., Маришук Л. М. Оцінювання ефективності застосування засобів радіоелектронної боротьби для протидії високоточній зброї як складової операції в електромагнітному спектрі // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем, 2023. № (23). С. 62–76. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.05>
3. Заславець В.П., Долина М.П., Чечуй О.В. Особливості розрахунку завадозахищеності ліній радіозв'язку в умовах радіоподавлення (радіоелектронного конфлікту). Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 1(61). С. 7-12. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.01>.
4. Роголін С. В. Теоретичні основи експертних досліджень приладів обліку електричної енергії, що зазнали впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання // Forensic Herald, Криміналістичний вісник, 2022. № 1 (37). С. 66-76.
5. Pan Yanfei, Dai Mayin, Zhao Hongwei, Hu Nianguang, Guo Qiang, Huang Jintian. Wood-Based Composites with High Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Ultra-Low Reflection. Coatings, 2022. №12. P.1117. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings12081117>.
6. Kuila Chinmoy, Maji Animesh, Murmu Naresh, Kuila Tapas, Srivastava Suneel. Recent advancements in carbonaceous nanomaterials for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding and wearable devices. Carbon, 2023. № 210. P. 118-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118075>.
7. Jiang Lu, Xue Cun, Zhou You-He. Sensitivity of the thermomagnetic instability in superconducting film to magnetic perturbation for electromagnetic interference detection. Superconductor Science and Technology. 2022. № 36. doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aca007>.
8. Tiwari Alavya, Tiwari Arushi, Bhatia Arpit, Chadha Utkarsh, Kandregula Satvik, Selvaraj Senthil Kumaran, Bhardwaj Preetam. Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding Applications: A Review. Nano. 2022. № 17. doi:<https://doi.org/10.1142/S1793292022300018>.
9. Ma Guilei, Man Menghua, Zhang Yongqiang, Liu Shanghe. Electromagnetic Interference Effects of Continuous Waves on Memristors: A Simulation Study. Sensors. 2022. № 22. P. 57-85. doi:<https://doi.org/10.3390/s22155785>.
10. M'barki Zakaria, Rhazi Senhaji, Mejdoub Youssef. A novel fuzzy logic control for a zero current switching-based buck converter to mitigate conducted electromagnetic interference. International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2023. № 13. P. 1423-1436. doi:<https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1423-1436>.

11. Liu Yaowen, Qu Sudong. Research on Electromagnetic Interference of Distributed Control Radar Servo System. 2022. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9\\_151](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9_151).
12. Wanasinghe Dimuthu, Aslani Farhad, Ma Guowei. Effect of Carbon Fibres on Electromagnetic-Interference-Shielding Properties of Geopolymer Composites. *Polymers*. 2022. № 14. P. 37-50. doi:<https://doi.org/10.3390/polym14183750>.
13. Zhao Kaiyuan, Xiao Sa, Wu Xiangyu, Wang Yang, Cheng Xian. Electromagnetic Signal Interference Based on Convolutional Autoencoder. 2023. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-031-23902-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23902-1_18).
14. Liu Yan, Yu Kang, Chen Ruixun. Electromagnetic Interference Posed by Wireless Devices Inside Airproof Cabin of Manned Spacecraft. 2023. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5_37).
15. Crovetto Paolo. Electromagnetic Interference and Compatibility. 2021. doi:<https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0501-5>.
16. Shi Chaofan, Wang Mengyuan, Zhang Xin, Shi Wangzhou, Shi Hui, Zhang Yi. Enhanced electromagnetic interference shielding performance of patterned AgNWs doped MXene films in X-band. *Physica Scripta*. 2023. doi:<https://doi.org/10.1088/1402-4896/acbdc4>.
17. Tiwari Arun, Kumar Amit, Said Zafar. Nanomaterials for electromagnetic interference shielding application. 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00035-9>.
18. Singh Dr. Avanish, Mishra Monika, Ohlan Anil, Dhawan Sundeep. Electromagnetic Interference Shielding and its Evaluation. 2022. doi:<https://doi.org/10.2174/9789815036428122010004>.

### References

1. Leonov S. Study of the influence of crosstalk on the operation of an electronic device / S. Leonov, B. Klishchov // Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers. Poltava: PNTU, 2021. T. 4 (66). C. 23-26. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.4.023>.
2. Ishchenko DA, Fedorchuk DL, Ishchenko SD, Marishchuk LM Evaluation of the effectiveness of the use of electronic warfare to counter high-precision weapons as a component of an operation in the electromagnetic spectrum // Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems, 2023. № (23). C. 62-76. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.05>
3. Zaslavets V.P., Dolyina M.P., Chechui O.V. Features of calculating the interference immunity of radio communication lines in conditions of radio jamming (radio electronic conflict). *Weapons systems and military equipment*. 2020. № 1(61). C. 7-12. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.01>.
4. Rogalin S. V. Theoretical foundations of expert studies of electricity metering devices exposed to radio frequency electromagnetic radiation // *Forensic Herald, Criminalistics Bulletin*, 2022. № 1 (37). C. 66-76.
5. Pan Yanfei, Dai Mayin, Zhao Hongwei, Hu Nianguang, Guo Qiang, Huang Jintian. Wood-Based Composites with High Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Ultra-Low Reflection. *Coatings*, 2022. №12. P.1117. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings12081117>.
6. Kuila Chinmoy, Maji Animesh, Murmu Naresh, Kuila Tapas, Srivastava Suneel. Recent advancements in carbonaceous nanomaterials for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding and wearable devices. *Carbon*, 2023. № 210. P. 118-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118075>.
7. Jiang Lu, Xue Cun, Zhou You-He. Sensitivity of the thermomagnetic instability in superconducting film to magnetic perturbation for electromagnetic interference detection. *Superconductor Science and Technology*. 2022. № 36. doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aca07>.
8. Tiwari Alavya, Tiwari Arushi, Bhatia Arpit, Chadha Utkarsh, Kandregula Satvik, Selvaraj Senthil Kumaran, Bhardwaj Preetam. Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding Applications: A Review. *Nano*. 2022. № 17. doi:<https://doi.org/10.1142/S1793292022300018>.
9. Ma Guilei, Man Menghua, Zhang Yongqiang, Liu Shanghe. Electromagnetic Interference Effects of Continuous Waves on Memristors: A Simulation Study. *Sensors*. 2022. № 22. P. 57-85. doi:<https://doi.org/10.3390/s22155785>.
10. M'barki Zakaria, Rhazi Senhaji, Mejdoub Youssef. A novel fuzzy logic control for a zero current switching-based buck converter to mitigate conducted electromagnetic interference. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2023. № 13. P. 1423-1436. doi:<https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1423-1436>.
11. Liu Yaowen, Qu Sudong. Research on Electromagnetic Interference of Distributed Control Radar Servo System. 2022. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9\\_151](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9_151).
12. Wanasinghe Dimuthu, Aslani Farhad, Ma Guowei. Effect of Carbon Fibres on Electromagnetic-Interference-Shielding Properties of Geopolymer Composites. *Polymers*. 2022. № 14. P. 37-50. doi:<https://doi.org/10.3390/polym14183750>.
13. Zhao Kaiyuan, Xiao Sa, Wu Xiangyu, Wang Yang, Cheng Xian. Electromagnetic Signal Interference Based on Convolutional Autoencoder. 2023. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-031-23902-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23902-1_18).
14. Liu Yan, Yu Kang, Chen Ruixun. Electromagnetic Interference Posed by Wireless Devices Inside Airproof Cabin of Manned Spacecraft. 2023. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5_37).
15. Crovetto Paolo. Electromagnetic Interference and Compatibility. 2021. doi:<https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0501-5>.
16. Shi Chaofan, Wang Mengyuan, Zhang Xin, Shi Wangzhou, Shi Hui, Zhang Yi. Enhanced electromagnetic interference shielding performance of patterned AgNWs doped MXene films in X-band. *Physica Scripta*. 2023. doi:<https://doi.org/10.1088/1402-4896/acbdc4>.
17. Tiwari Arun, Kumar Amit, Said Zafar. Nanomaterials for electromagnetic interference shielding application. 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00035-9>.
18. Singh Dr. Avanish, Mishra Monika, Ohlan Anil, Dhawan Sundeep. Electromagnetic Interference Shielding and its Evaluation. 2022. doi:<https://doi.org/10.2174/9789815036428122010004>.