

Т.Г. БЕНЬКО

СХЕМОТЕХНІЧНІ МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД У БОРТОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Вступ

Безпілотні літальні апарати (БпЛА) набули широкого застосування у задачах спостереження, моніторингу, картографування, зв'язку та спеціальних операціях. Ефективність і надійність їх функціонування значною мірою визначаються якістю роботи бортових електронних систем, до складу яких входять навігаційні модулі, сенсорні підсистеми, системи керування та передачі даних. В умовах реального часу ці системи повинні забезпечувати високу точність, стабільність і завадостійкість за наявності жорстких обмежень за масою, енергоспоживанням та обчислювальними ресурсами.

Однією з ключових проблем бортової електроніки БпЛА є вплив імпульсних електромагнітних завад, що виникають у процесі роботи силових і комутаційних елементів. Основними джерелами таких завад є електродвигуни, регулятори обертів, імпульсні DC/DC-перетворювачі, системи стабілізації живлення та комутаційні процеси у бортовій мережі. Імпульсні завади характеризуються широким спектром частот і значною амплітудою, що може призводити до спотворення сигналів, зниження відношення сигнал/шум, збоїв у роботі сенсорів і порушення стабільності систем керування.

Для зменшення впливу завад у бортових системах БпЛА широко застосовуються методи цифрової обробки сигналів, зокрема програмна фільтрація та алгоритми компенсації шуму. Проте цифрові методи часто потребують додаткових обчислювальних ресурсів, збільшують затримки обробки сигналів і не завжди ефективні для придушення високочастотних імпульсних завад на ранніх етапах сигнального тракту. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають схмотехнічні методи зменшення завад, реалізовані безпосередньо на рівні електронних кіл. Схмотехнічні методи придушення імпульсних завад включають використання пасивних і активних фільтрів, схем локального розв'язування живлення, демпфувальних ланцюгів та зворотних зв'язків. Перевагою таких методів є їх робота в реальному часі, відсутність обчислювальних затримок і можливість зменшення завад ще до етапу аналого-цифрового перетворення. Разом з тим ефективність схмотехнічних рішень значною мірою залежить від правильного вибору параметрів елементів і врахування реальних неідеальностей компонентів.

Незважаючи на наявність численних досліджень у галузі бортової електроніки та електромагнітної сумісності, питання системного аналізу схмотехнічних методів зменшення імпульсних завад у БпЛА залишається недостатньо опрацьованим. Багато робіт зосереджуються на експериментальних результатах або окремих схемних рішеннях без узагальненого підходу до моделювання завад та оцінки їх впливу на різні підсистеми [1].

У зв'язку з цим метою даної статті є дослідження та моделювання схмотехнічних методів зменшення імпульсних завад у бортових електронних системах безпілотних літальних апаратів. У роботі розглядаються основні джерела імпульсних завад, аналізуються пасивні та активні схеми їх придушення, а також оцінюється вплив параметрів електричних кіл на шумові характеристики та стабільність роботи бортових систем. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні надійних і завадостійких електронних систем БпЛА.

Схмотехнічні методи зменшення імпульсних завад

Для ефективного зменшення імпульсних завад у бортових електронних системах безпілотних літальних апаратів необхідно насамперед визначити основні джерела їх виникнення та шляхи проникнення в сигнальні кола. Імпульсні завади формуються внаслідок

комутаційних процесів у силових та керувальних підсистемах і поширюються через бортову мережу живлення, загальні шини заземлення та паразитні ємнісні й індуктивні зв'язки [2].

Після ідентифікації основних джерел імпульсних завад у бортових електронних системах безпілотних літальних апаратів доцільно розглянути схемотехнічні методи, спрямовані на зменшення їх рівня без істотного ускладнення конструкції та збільшення масогабаритних показників. Основна увага приділяється рішенням, які можуть бути реалізовані на рівні електричних схем і є сумісними з вимогами авіаційної електроніки.

Одним із найбільш ефективних методів зменшення імпульсних завад є застосування пасивних фільтрів у колах живлення чутливих електронних модулів. Типова схема фільтрації з використанням LC-ланцюга наведена на рис. 1. Така конфігурація забезпечує ослаблення високочастотних складових завад, що виникають унаслідок комутаційних процесів у силових перетворювачах. Правильний вибір індуктивності та ємності дозволяє узгодити фільтр зі спектром завад і зменшити рівень пульсацій напруги на вході навантаження без суттєвого падіння постійної складової.

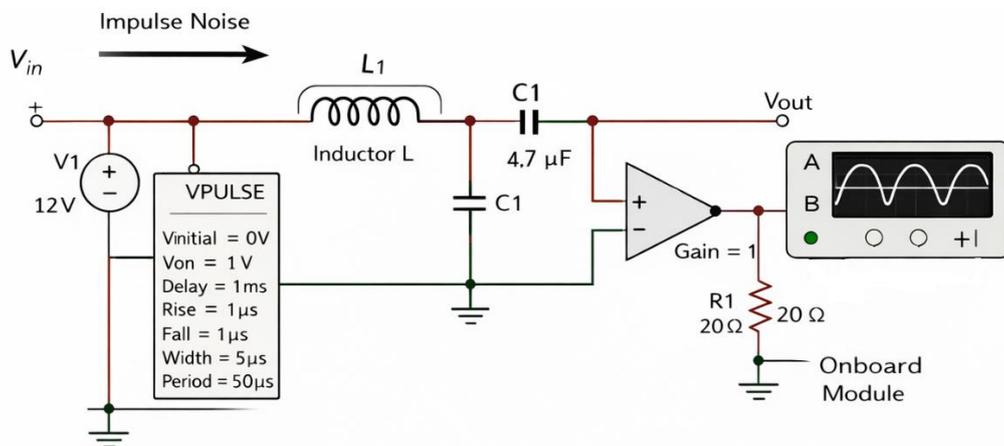


Рис. 1. Схемотехнічна реалізація LC-фільтра для зменшення імпульсних завад у колі живлення бортового електронного модуля

Для запобігання проникненню імпульсних завад у низькорівневі сигнальні кола застосовуються методи гальванічної та диференційної розв'язки [3]. Узагальнена схема використання диференційного підсилювача для підвищення завадостійкості наведена на рис. 2. Диференційна обробка сигналів дозволяє ефективно пригнічувати завади загального режиму, що є характерними для бортових систем із спільними шинами живлення та заземлення.

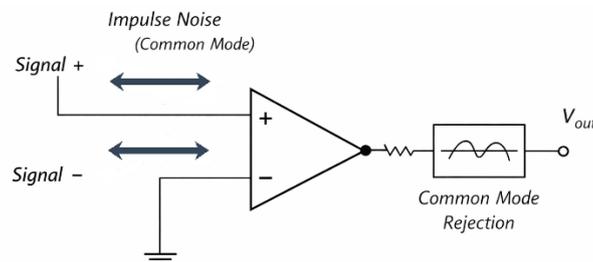


Рис. 2. Спрощена схема диференційного сигнального тракту з підвищеною стійкістю до імпульсних завад

Рациональна організація системи заземлення суттєво впливає на рівень імпульсних завад у бортових електронних системах БПЛА. Принцип «зіркоподібного» заземлення, показаний на рис. 3, дозволяє мінімізувати взаємний вплив силових і сигнальних контурів за рахунок усунення спільних струмових шляхів. Крім того, оптимізація топології друкованих плат,

зменшення площі струмових петель і використання суцільних заземлювальних площин сприяють зниженню паразитних індуктивностей і рівня наведень [4].

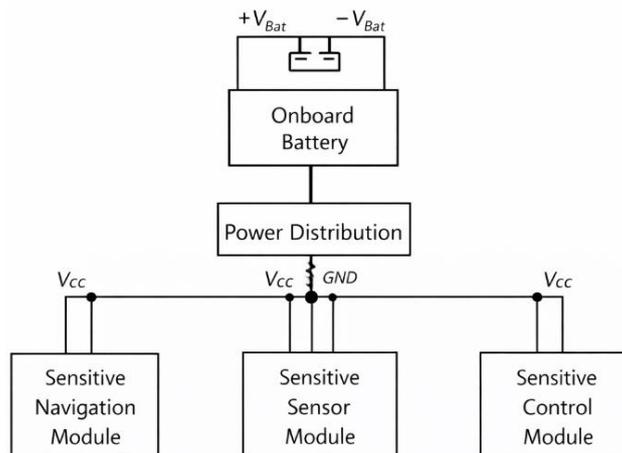


Рис. 3. Принципова схема організації зіркоподібного заземлення в бортовій електронній системі БПЛА

Для обмеження амплітуди імпульсних перенапруг і захисту чутливих електронних компонентів застосовуються демпфуючі та захисні елементи. Типова схема використання TVS-діода та RC-демпфера наведена на рис. 4.

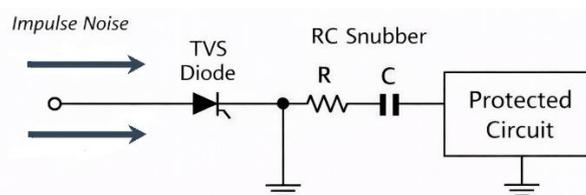


Рис. 4. Схема застосування TVS-діода та RC-ланцюга для захисту від імпульсних перенапруг у сигнальних і силових колах

Такі елементи забезпечують поглинання енергії короткочасних імпульсів і запобігають їх поширенню в суміжні функціональні блоки, що є особливо важливим для високоцілільних бортових систем.

Моделювання імпульсних завад та оцінка ефективності фільтрації

Моделювання виконувалося з метою оцінки ефективності пасивних і активних схем придушення завад, а також впливу топології заземлення на рівень наведень у чутливих електронних модулях. Імпульсні завади моделювалися у вигляді короткочасних перенапруг, що накладаються на шину живлення та виникають унаслідок комутаційних процесів силових перетворювачів і виконавчих механізмів [5]. Узагальнену модель поширення імпульсної завади в лініях живлення та сигналу наведено на рис. 5, де враховано паразитні опори та індуктивності провідників.

Ефективність пасивних фільтрувальних ланок досліджувалася на прикладі RC- та LC-фільтрів, включених у лінії живлення чутливих модулів (рис. 6). Результати моделювання показали, що RC-фільтри забезпечують зменшення амплітуди коротких імпульсів, проте їхня ефективність обмежується допустимим падінням напруги. LC-фільтри демонструють вищий рівень придушення високочастотних складових, однак за відсутності демпфування можуть спричинити резонансні перехідні процеси. Моделювання активних схем подавлення завад запроваджувалося з використанням активних фільтрів другого порядку [6, 7].

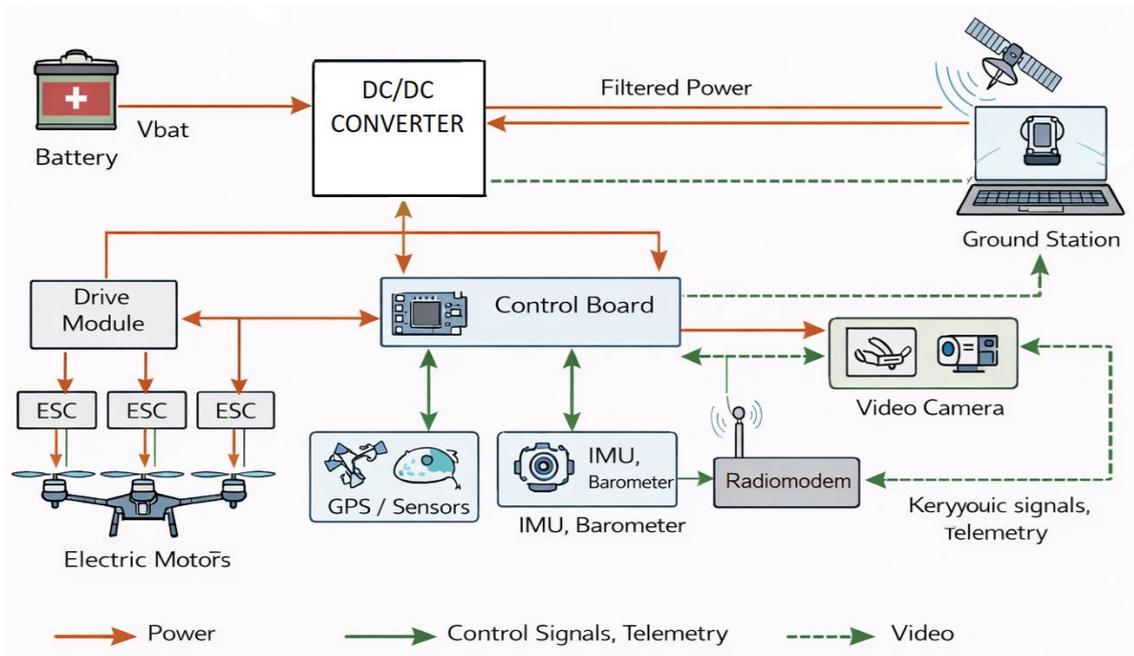


Рис. 5. Структурна схема розподілу живлення та сигналів бортової електроніки БПЛА

Встановлено, що такі схеми забезпечують суттєво більше ослаблення імпульсних перешкод у широкому частотному діапазоні, однак є чутливими до параметрів операційних підсилювачів і можуть впливати на стабільність системи в режимі реального часу [8, 9].

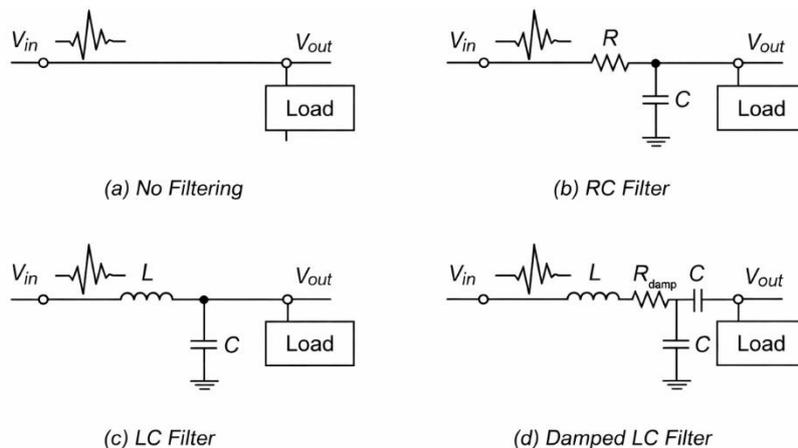


Рис. 6. Пасивні RC та LC-фільтри

Окремо досліджено вплив топології заземлення на рівень імпульсних наведень. Як показано на рис. 7, застосування зіркоподібної схеми заземлення дозволяє мінімізувати взаємний вплив між силовими та чутливими електронними модулями, зменшуючи рівень наведеної завади порівняно зі спільними заземлювальними шинами.

Захист від короточасних перенапруг у сигнальних і силових колах моделювався з використанням TVS-діодів [10-12] та RC-ланцюгів демпфування (рис. 8). Результати підтвердили ефективність такого поєднання для обмеження амплітуди імпульсних перенапруг та зменшення швидкості фронтів завад.

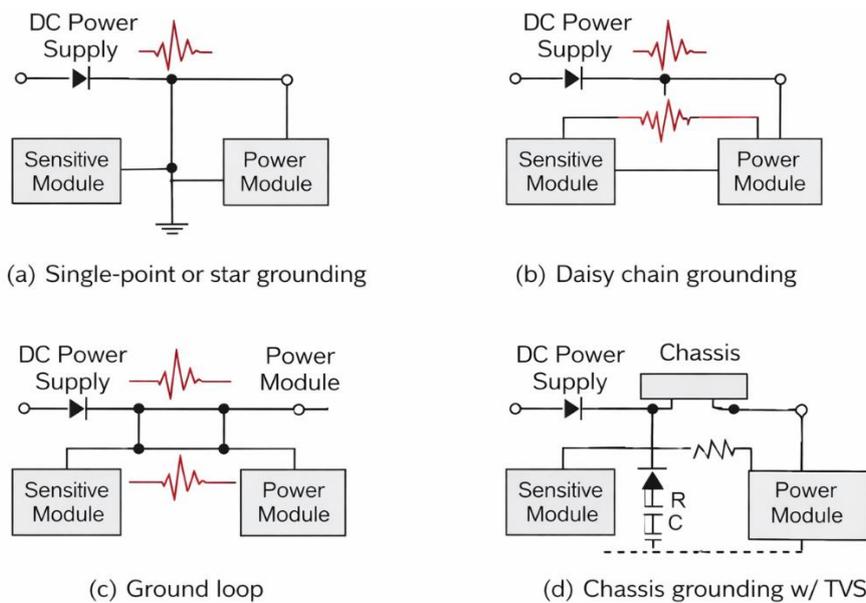


Рис. 7. Топології заземлення: (а) «зірка»; (б) «ланцюжок»; (с) «земляна петля»; (д) шасі з TVS (плейсхолдер)

Як видно з рис. 8, у випадку відсутності фільтрації спостерігається максимальна амплітуда імпульсної завади. Перехідний процес супроводжується значними високочастотними коливаннями, що потенційно можуть призводити до порушення роботи чутливих електронних модулів.

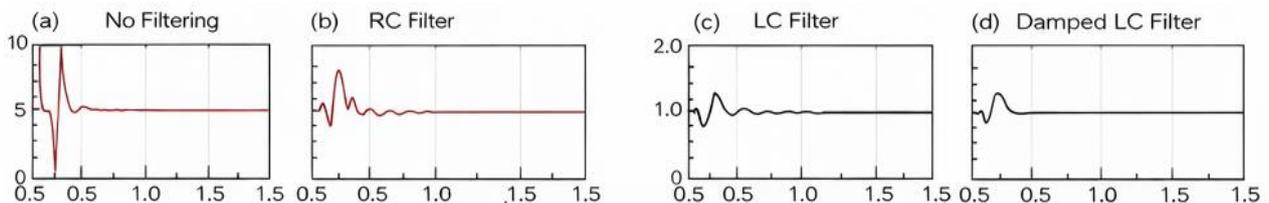


Рис. 8. Часові осцилограми сигналу:
 (а) без фільтрації – максимальна амплітуда, високочастотні коливання;
 (б) RC-фільтр – часткове згладжування фронтів;
 (с) LC-фільтр – значне пригнічення високих частот, можливі резонансні коливання;
 (д) демпфований LC – мінімальна амплітуда, скорочений час встановлення

Узагальнення результатів моделювання показує, що найбільш ефективно зменшення імпульсних завад у бортових електронних системах БПЛА досягається при комплексному застосуванні пасивної та активної фільтрації разом з оптимізованою топологією заземлення та елементами захисту від перенапруг.

Висновки

У роботі представлено підхід до схемотехнічного моделювання методів зменшення імпульсних завад у бортових електронних системах безпілотних літальних апаратів. За допомогою еквівалентних електричних моделей і часових симуляцій проаналізовано пасивні та активні методи придушення завад, а також вплив топології заземлення.

Результати моделювання показали, що пасивні RC-фільтри забезпечують обмежене ослаблення імпульсних завад при мінімальній складності схем, тоді як LC-фільтри демонструють вищу ефективність, але можуть спричиняти резонансні перехідні процеси. Активні фільтри другого порядку забезпечують максимальний рівень ослаблення завад, проте потребують ретельного вибору параметрів для забезпечення стабільної роботи в режимі реального

часу. Також підтверджено, що застосування зіркоподібної топології заземлення суттєво зменшує взаємні наведення між силовими та чутливими електронними модулями.

Показано, що найбільш ефективно зменшення імпульсних завад у бортових електронних системах БПЛА досягається при комплексному застосуванні пасивної та активної фільтрації, оптимізованої системи заземлення та захисних елементів, таких як TVS-діоди й RC-демпфуючі ланцюги. Запропонований підхід до моделювання може бути використаний для обґрунтованого проектування малошумних бортових електронних систем.

Список літератури:

1. X. Chang, W. Chen, Y. Yang, K. Wang and X. Yang, *Research and realization of a novel active common-mode EMI filter*, in Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015, pp. 1941–1945, doi: <https://doi.org/10.1109/APEC.2015.7104612>.
2. D. Hamza and P. K. Jain, *Conducted EMI noise mitigation in DC-DC converters using active filtering method*, in IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC), 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/PESC.2008.4591923>.
3. C.-Y. Zhuang and D.-B. Lin, *Design compact absorptive common-mode noise suppression filter with series unified circuit*, Sensors, vol. 23, no. 2, p. 957, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23020957>.
4. K. Mainali and R. Oruganti, *Conducted EMI mitigation techniques for switch-mode power converters: A survey*, IEEE Trans. Power Electronics, vol. 25, no. 9, pp. 2344–2356, 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2047734>.
5. Y. O. Onikienko, V. V. Pilinsky, P. V. Popovych, V. S. Lazebnyi, O. I. Smolenska and V. S. Baran, *Modelling of operation modes and electromagnetic interferences of GaN-transistor converters*, Electr. Eng. Electromech., no. 3, pp. 37–42, 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.06>.
6. . Sai Charishma Pathala and V. Y. Jayasree Pappu, “Elimination of CM Noise from SMPS Circuit using EMI Filter,” *Int. j. elect. comput. eng. syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 465–471, Apr. 2023. doi: <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.4.10>.
7. Y. Ma, C. Feng, C. Li, L. Wang, Z. Jia, and J. Chen, “A Precise Design Method of EMI Filter Based on Compound Common-mode and Differential-mode Inductance,” in *2017 2nd Int. Conf. Control, Automat. Artif. Intell. (CAAI 2017)*, Sanya, China, Jun. 25–26, 2017. Paris, France: Atlantis Press, 2017. doi: <https://doi.org/10.2991/caai-17.2017.26>.
8. S. Yu, N. Chen, L. Gao, H. Zhou, and Y. Huang, “Suppressing Conducted DM EMI in an Active Power Filter via Periodic Carrier Frequency Modulation,” *Energies*, vol. 12, no. 10, p. 1903, May 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/en12101903>.
9. G. Di Capua, N. Femia, and K. Stoyka, “Design of Differential-Mode Input Filters for DC-DC Switching Regulators,” in *2019 16th Int. Conf. Synthesis, Model., Anal. Simul. Methods Appl. Circuit Des. (SMACD)*, Lausanne, Switzerland, Jul. 15–18, 2019. IEEE, 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/smacd.2019.8795273>.
10. R. Goswami and S. Wang, “Modeling and Stability Analysis of Active Differential-Mode EMI Filters for AC/DC Power Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 10277–10291, Dec. 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2018.2806361>.
11. W. Fan, Y. Shi, and Y. Chen, “A Method for CM EMI Suppression on PFC Converter Using Lossless Snubber with Chaotic Spread Spectrum,” *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3583, Apr. 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/en16083583>.
12. B. Narayanasamy and F. Luo, “Design and implementation of a novel differential mode active EMI filter with a twin circuit,” in *2019 IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., Signal Power Integrity (EMC+SIPI)*, New Orleans, LA, USA, Jul. 22–26, 2019. IEEE, 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/isemc.2019.8825210>.

Надійшла до редколегії 18.11.2024

Відомості про автора:

Бенько Тарас Григорович – асистент кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Україна / Vasyl Stefanyuk Precarpathian National University; email: taras.benko@pnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6310-8743>