

# КОНЦЕПЦІЯ КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

**Г.С. Макаренко, Ю.Ю. Мірошник, М.Ю. Білоусов**

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: [hennadii.makarenko@nure.ua](mailto:hennadii.makarenko@nure.ua), [yurii.miroshnyk@nure.ua](mailto:yurii.miroshnyk@nure.ua), [matvii.bilousov@nure.ua](mailto:matvii.bilousov@nure.ua)

**Анотація.** Розглядається необхідність розробки нових методів проектування радіоелектронних засобів, з урахуванням наскрізного підходу до проектування, що включає проведення організаційно-технічних заходів, аналіз електромагнітних характеристик і синтез оптимальних технічних рішень на всіх етапах ЖЦ виробу.

**Ключові слова:** наскрізне проектування, комплексний підхід, електромагнітна сумісність.

## CONCEPT OF INTEGRATED APPROACH IN THE DESIGN OF ELECTRONIC MEANS TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

**Hennadii Makarenko, Yurii Miroshnyk, Matvii Bilousov**

Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauki Ave

E-mail: [hennadii.makarenko@nure.ua](mailto:hennadii.makarenko@nure.ua), [yurii.miroshnyk@nure.ua](mailto:yurii.miroshnyk@nure.ua), [matvii.bilousov@nure.ua](mailto:matvii.bilousov@nure.ua)

**Abstract.** The need to develop new methods of design of electronic means is considered, taking into account the end-to-end approach to design, which includes organizational and technical measures, analysis of electromagnetic characteristics and synthesis of optimal technical solutions at all stages of the product LC.

**Keywords:** end-to-end design, complex approach, electromagnetic compatibility.

У задачах забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) радіоелектронних засобів, у загальному випадку, можна виділити такі рівні ієрархії: компонентна база; друкована плата (ДП); функціональний блок, корпус або стійка; з'єднувальні дроти, а також програмне забезпечення. І хоч виробники компонентів докладають зусиль для забезпечення вимог ЕМС на рівні компонента, все ж таки в даний час найбільш ефективні заходи забезпечуються на рівнях ДП і функціонального блоку.


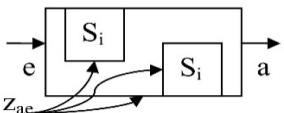
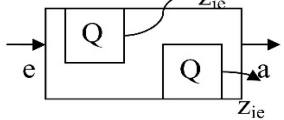
В даний час є різні методи забезпечення ЕМС, які повинні вибиратися виходячи з особливостей експлуатації, конструкції, типів та частотних діапазонів електромагнітних та кондуктивних завад, інших критеріїв. При цьому потрібно запобігти виникненню електромагнітних завад (ЕМЗ) або їх випромінюванню, підвищити стійкість функціональних груп під впливом завад, наприклад, за допомогою розпізнавання порушення функціонування, викликаного недостатньою ЕМС, з подальшою кореляцією функціонування. Як правило, розробники та виробники радіоелектронних засобів потребують конкретних методичних рекомендацій та технічних заходів, якими можна цілеспрямовано впливати на ЕМС пристрою у процесі його проектування. Таблиця 1 у першому наближенні дає уявлення про параметри, фактори, що впливають, та технічні заходи щодо підвищення ЕМС [1].

Комплекс технічних заходів включає схемотехнічні, топологічні і конструкторсько-технологічні, а також реалізовані за допомогою математичного забезпечення (програмні) методи.

На кожному з етапів проектування є певний набір заходів та способів забезпечення вимог ЕМС. Систематизуючи результати проведеного аналізу, визначили необхідність комплексного підходу забезпечення вимог ЕМС при проектуванні радіоелектронних засобів.

Суть комплексного підходу при проектуванні полягає в урахуванні всіх обмежень та критеріїв оптимальності на кожному етапі проектування та цілісного представлення готового виробу кожним із розробників, які беруть участь у виробничому циклі. Рисунки 1 і 2 показують різницю між традиційним і комплексним підходом до проектування виробу. У контексті забезпечення вимог ЕМС ця задача має починатися зі стадії концептуальної розробки пристрою. У практиці, що склалася, і інженери-схемотехніки і інженери-конструктори враховують основні положення ЕМС, однак роблять це відокремлено один від одного. Так перші вирішують питання, що виникають на рівні електричної схеми, не беручи до уваги, як ці рішення можуть позначитися на подальших етапах розробки. Другі ж вирішують конструкторсько-технологічні задачі виходячи з існуючих проектних передумов, що не завжди є оптимальним та ефективним [2].

Таблиця 1 – Параметри ЕМС, фактори, що впливають, та заходи щодо забезпечення вимог електромагнітної сумісності на рівнях ДП та функціонального блоку

Параметр	Фактор, що впливає	Заходи
<p>Внутрішня стійкість до завад</p> 	<p>кількість, вид, інтенсивність, топологічне розташування внутрішніх джерел завад <math>Q_i</math> і приймачів <math>S_i</math>, конфігурація системи; можливості поширення <math>Z_{ie}</math> функціональними або паразитними шляхами; завадостійкість елементів до <math>Z_{ie}</math>; концепція обробки сигналів та часові режими <math>Q_i</math> та <math>S_i</math></p>	<p>схемотехнічні, топологічні, конструкторсько-технологічні, програмні</p>
<p>Стійкість до зовнішніх впливів</p> 	<p>можливості проникнення <math>Z_{ae}</math> по функціональним чи паразитним зв'язкам; ступінь урахування <math>Z_{ae}</math>, що проникла всередину радіоелектронних засобів, наприклад, шляхом застосування завадостійких елементів, додаткових бар'єрів (фільтрів, екранів) або вибору концепції обробки з урахуванням можливих завад</p>	<p>схемотехнічні, топологічні, конструкторсько-технологічні, програмні</p>
<p>Випромінювання завад</p> 	<p>кількість, вид, інтенсивність, топологічне розташування внутрішніх джерел <math>Q_i</math>; випромінюючі властивості системи; виникнення електромагнітних впливів, обумовлених внутрішніми джерелами <math>Z_{ie}</math> і які розповсюджуються по функціональним чи паразитним зв'язкам</p>	<p>схемотехнічні, топологічні, конструкторсько-технологічні</p>

Після закінчення проектних робіт та виготовлення дослідного зразка він перевіряється на відповідність вимогам нормативних документів у галузі ЕМС. Такий підхід дуже часто призводить до проблем із забезпечення вимог ЕМС, які виявляються надто пізно. Зазвичай досягнення норм ЕМС вдається забезпечити дорогими виправленнями, при цьому не завжди раціональними. У деяких випадках потрібна кардинальна переробка конструкції, що значно підвищує вартість ДКР та збільшує терміни отримання дослідного зразка [3].

При комплексному підході до проектування, наведеному на рис. 2, розробники заздалегідь розглядають методи та способи забезпечення цілісності сигналу та інших аспектів ЕМС з урахуванням їхньої реалізованості та допустимості на етапах розробки та виробництва життєвого циклу (ЖЦ) радіоелектронних засобів, при цьому цілком може бути обрано оптимальне та економічно ефективне рішення. Додатково до уваги має братися забезпечення

теплого режиму, надійності, захисту від зовнішніх факторів, а також економічних, естетичних, ергономічних та екологічних вимог. Такий комплексний підхід до проектування дозволяє сформулювати вимоги до виробу на ранніх концептуальних і проектних стадіях розробки [4].

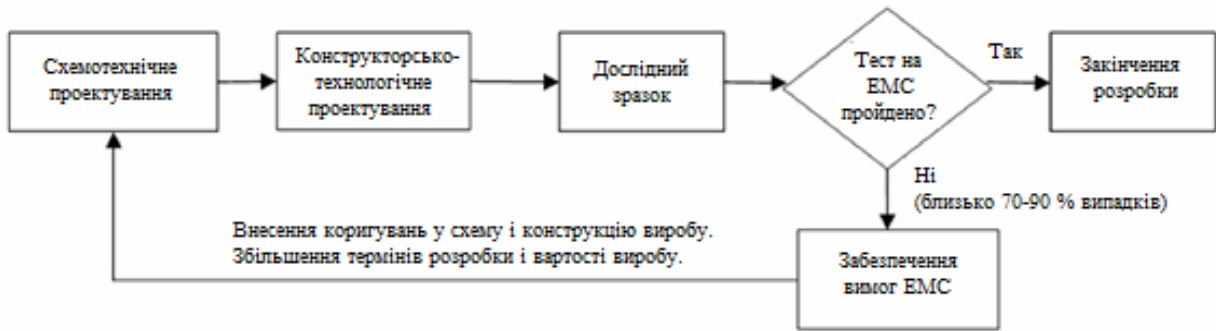


Рисунок 1 – Традиційний підхід до проектування

Враховуючи складність радіоелектронних засобів, що постійно збільшується, прагнення їх мініатюризації та збільшення щільності упаковки компонентів, реалізація заходів щодо забезпечення вимог ЕМС на заключних етапах розробки, як це часто відбувається при традиційній розробці радіоелектронних засобів, стає менш ефективною. На нашу думку 70 % нових розробок не проходять початкове тестування з вимог ЕМС, що призводить до дорогих переробок на пізніх стадіях і, як наслідок, високих збитків через прострочення часу розробки, а також застосування не оптимізованих технічних рішень. Тому комплексне проектування, засноване на концептуальному аналізі ЕМС, що включає моделювання електромагнітних процесів, має використовуватися з самого початку процесу розробки радіоелектронних засобів для виявлення та вирішення можливих проблем ЕМС з найменшими витратами.

Як основні шляхи підвищення ефективності розробки конструкцій радіоелектронних засобів на основі комплексних методів оптимального проектування з урахуванням забезпечення вимог ЕМС можна виділити:

- нормативні документи та вимоги в галузі ЕМС;
- аналіз та вирішення проблем ЕМС на ранніх стадіях проектування;
- забезпечення вимог ЕМС при виборі елементної бази;
- ефективне забезпечення вимог ЕМС на ДП;
- провідні корпуси як ефективний спосіб забезпечення ЕМС;
- провідні прокладки та універсальні ущільнення для електромагнітного екранування;
- собівартість забезпечення вимог ЕМС;
- вибір матеріалу для оптимального екранування.



Рисунок 2 – Комплексний підхід під час проектування, що враховує вимоги ЕМС

На підставі вищесказаного для організації процесу оптимізованого конструювання радіоелектронних засобів з урахуванням забезпечення вимог ЕМС на всіх етапах ЖЦ висунуті наступні ключові принципи:

- багатоетапності – аналіз та перевірка забезпечення вимог ЕМС здійснюються на кожному ключовому етапі ЖЦ радіоелектронних засобів (від вибору елементної бази при проектуванні до сервісного обслуговування та утилізації);

- оптимальності способів – застосування спеціальних заходів для забезпечення вимог ЕМС конструкцій радіоелектронних засобів має здійснюватися з урахуванням критеріїв оптимальності, визначених для кожного етапу розробки, та типу методів, що застосовуються;

- уніфікації моделей – моделі електромагнітної взаємодії формуються з обмеженої кількості можливих конструктивів, дозволяючи спростити процеси аналізу та синтезу шляхом використання типових математичних моделей та методів;

- комплексності методів – електромагнітні процеси у конструкціях радіоелектронних засобів характеризуються тісним взаємозв'язком між різними ієрархічними рівнями, що має бути враховано у застосовуваних методах;

- достатнього ступеня точності – при вирішенні задачі електромагнітного проектування вибираються моделі та методи, які за достатнього ступеня точності забезпечують оптимальний синтез проектного рішення, адекватний повноті наявних даних, що досягається підбором раціональних способів забезпечення ЕМС;

- адаптації – кожен ключовий етап розробки радіоелектронних засобів характеризується певним типом заходів щодо забезпечення вимог ЕМС та відповідним йому пулу застосовуваних способів, що характеризуються конкретними критеріями оптимальності.

**ВИСНОВКИ.** У роботі сформульовано суть комплексного підходу до електромагнітного проектування, як вирішення проблеми забезпечення вимог ЕМС у радіоелектронних засобах, що полягає в урахуванні всіх обмежень та критеріїв оптимальності на кожному етапі проектування і цілісного представлення готового виробу кожним спеціалістом, який бере участь на всьому ЖЦ виробу.

Для організації процесу оптимізованого конструювання радіоелектронних засобів з урахуванням забезпечення вимог ЕМС висунуто такі ключові принципи: багатоетапності, оптимальності способів, уніфікації моделей, комплексності методів, достатньо точності, адаптації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Лазебний В.С., Пілінський В.В., Швайченко В.Б. Електромагнітна сумісність електронних засобів. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 343 с.
2. Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури: навч. посібн. Київ: НАУ, 2014. 309 с.
3. German F. Designing early for EMC. EDN, 2004, October 24. pp. 93-98.
4. Arnold R. R. Electronic product trends drive new EMI/RFI shielding solutions. Interference Technology. 2003. 324 p.
5. Al-Sharo, Y., Abu-Jassar, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., Maksymova, S. A Robo-hand prototype design gripping device within the framework of sustainable development, Indian Journal of Engineering, 20 2023 e37ije1673. <https://doi.org/10.54905/disssi.v20i54.e37ije1673>
6. Lyashenko, V., Abu-Jassar, A.T., Yevsieiev, V., Maksymova, S. Automated Monitoring and Visualization System in Production, Int. Res. J. Multidiscip. Technovation, 5(6) 2023 09-18. <https://doi.org/10.54392/irjmt2362>
7. Attar, H., & et al. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.
8. Vladyslav Yevsieiev, Samariddin, S. M., Nikolay Starodubtsev, & Amer Abu-Jassar. (2024). ACTIVE CONTOURS METHOD IMPLEMENTATION FOR OBJECTS SELECTION IN THE MOBILE ROBOT'S WORKSPACE. Journal of Universal Science Research, 2(2), 135–145.
9. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // In the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. Chicago, USA. P.92-94
10. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. Scientific Collection «InterConf», (140), P. 648-651.
11. Yevsieiev V. (2023) Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / Yevsieiev V., Starodubcev N. // Scientific Collection «InterConf», (141), P. 331-334.
12. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2023). An Automatic Assembly SMT Production Line Operation Technological Process Simulation Model Development. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2(2), 1–9. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.01>
13. A Small-Scale Manipulation Robot a Laboratory Layout Development / Yevsieiev V., Starodubcev N., Maksymova S., Stetsenko K. // International independent scientific journal, №47, 2023. P.18-28.
14. Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., & Starodubcev, N. . (2022). A ROBOTIC PROSTHETIC A CONTROL SYSTEM AND A STRUCTURAL DIAGRAM DEVELOPMENT. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (August 12, 2022; Zurich, Switzerland), 113–114. <https://doi.org/10.36074/logos-12.08.2022.33>
15. Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N. Software Implementation Concept Development for the Mobile Robot Control System on ESP-32CAM // Current issues of science, prospects and challenges: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference (Vol. 2), June 10, 2022. Sydney, Australia: European Scientific Platform., 2022. P. 54-56