

О. М. Маркова¹
І. Н. Вдовиченко¹

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕМИКАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ У СИСТЕМАХ ЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ В УМОВАХ АКТИВНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

¹Криворізький національний університет

Детально досліджено методи підвищення живучості автономних об'єктів в умовах інтенсивного впливу зовнішніх електромагнітних завад. Обґрунтовано необхідність переходу від високорівневих програмних протоколів до реалізації «жорсткої» логіки на основі математичного апарату перемикальних функцій, що сприяє стабільній роботі системи автономного управління у разі втрати зв'язку з оператором або деградації сигналів глобальних супутникових систем позиціонування.

Методологічна база роботи реалізує класичні підходи комп'ютерної логіки та теорії цифрових автоматів. У процесі дослідження розроблено багатокритеріальну модель прийняття рішень, що базується на аналізі чотирьох ключових вхідних змінних: наявність інтенсивних перешкод у радіоканалі, втрата керувального сигналу (RC Loss), показники датчиків безпечної висоти (Vision) та рівень енергетичного ресурсу (Battery). Авторами детально описано всі етапи синтезу перемикальної функції — формування таблиці істинності на 16 станів та виокремлення критичних наборів, що відповідають умовам виживання апарату.

Особливу увагу в роботі приділено процесу мінімізації логічних виразів. Проведено порівняльний аналіз аналітичного методу спрощення на основі законів булевої алгебри та графічного методу з використанням площинних діаграм (карт Карно). Отримані ідентичні результати підтвердили коректність синтезованої мінімальної диз'юнктивної нормальної форми (МДНФ). Встановлено, що застосування оптимізованої перемикальної функції дозволяє скоротити апаратні витрати на реалізацію системи керування майже вчетверо за рахунок зменшення кількості логічних операцій з одинадцяти до трьох.

Практична частина дослідження включає розробку та моделювання логічної схеми контролера у спеціалізованому середовищі Electronics Workbench. Результати симуляції підтвердили високу швидкість реакції системи на зовнішні загрози.

Доведено, що запропонована архітектура, реалізована на базі ПЛІС або дискретної логіки, забезпечує детермінований час відгуку та унеможлиблює програмне зависання контролера в екстремальних умовах експлуатації.

Наукова новизна роботи полягає у розробці алгоритму «апаратного інстинкту» автономного об'єкта, на основі якого реалізовано процес прийняття рішень на фізичному рівні електронної схеми, що значно підвищує надійність авіаційної техніки в екстремальних умовах експлуатації.

Ключові слова: перемикальна функція, автономний об'єкт, завадостійкість, карти Карно, цифрова логіка, система автономного управління, логічна схема, мінімізація, МДНФ, живучість систем.

Вступ

Сучасний досвід застосування літальних апаратів (ЛА) у складних умовах вказує на критичну вразливість програмних протоколів перед засобами інтенсивних навмисних електромагнітних завад. Мікропроцесорні системи керування, наразі схильні до програмного зависання, збою або втрати детермінованості у разі придушення сигналів навігації та зв'язку [5].

Актуальність роботи полягає у переході до жорсткої логіки на основі перемикальних функцій (ПФ), що дозволяє створити «апаратний інстинкт» повернення автономного об'єкта, який не залежить від зовнішніх команд і є стійким до радіозавад [6].

Метою роботи є побудова логічного пристрою керування, що оперує вектором вхідних станів



$X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$. Для реалізації схеми на дискретних логічних елементах побудовано математичну модель за класичним алгоритмом, застосовуваним до перемикальної функції $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$ [1]:

1. Побудова таблиці істинності $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$;
2. Запис повної диз'юнктивної нормальної форми (ДДНФ);
3. Мінімізація (аналітична або методом площинних діаграм (карт Карно));
4. Побудова логічної схеми системи керування об'єктом.

Результати дослідження

Процес управління автономним об'єктом можна представити як відображення вектора вхідних сигналів X (дані з гіроскопа, лідара, GPS, тощо) у вектор керувальних команд Y : $f: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^m$. де $\{0,1\}$ — алфавіт системи — двійковий код. Кожна змінна може бути або 0 (немає сигналу/загрози), або 1 (є сигнал/завдання); n — кількість вхідних каналів (датчиків); $\{0,1\}^n$ — множина всіх можливих комбінацій вхідних сигналів (у нашому випадку: $n = 4$ (Loss, завада, Оптика, Батарея), кількість комбінацій $2^n = 2^4 = 16$. Тобто автономний об'єкт може перебувати в одному з 16 станів; $\{0,1\}^m$ — вектор вихідних сигналів (виконавчих механізмів), у нашому випадку: $m = 1$ (тільки одна команда — «Return to Home»).

Якщо автономний об'єкт має декілька команд (наприклад: 1. Сісти, 2. Повернутися, 3. Самознищитися), $m = 3$;

Символ $\rightarrow$ означає правило (алгоритм), за яким кожному вхідному стану ставиться у відповідність конкретна вихідна дія.

Для нашої моделі: $f: \{0,1\}^4 \rightarrow \{0,1\}^1$

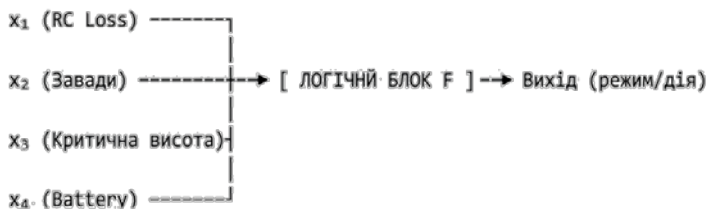


Рис. 1. Загальна математична модель перемикальної функції у системі логічного управління автономним об'єктом: x_1 — втрата сигналу керування (RC Loss); x_2 — детектування критичного рівня електромагнітних завад; x_3 — критична висота (Vision) (нижче безпечного порогу); x_4 — наявність палива/заряду для маневру (Battery)

На рис. 1 подана загальна математична модель.

Для забезпечення автономного повернення автономного об'єкта ($F = 1$) за умов загрози (Loss або завада), але за наявності ресурсів (Vision та Battery), визначено критичні набори значень. На основі визначених умов життєдіяльності об'єкта, будемо таблицю істинності функції управління об'єктом $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$ (табл. 1).

Таблиця 1

Таблиця істинності функції управління автономним об'єктом $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$

№	x_1	x_2	x_3	x_4	F
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	0
3	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	0
5	0	1	0	1	0
6	0	1	1	0	0
7	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	0
11	1	0	1	1	1
12	1	1	0	0	0
13	1	1	0	1	0
14	1	1	1	0	0
15	1	1	1	1	1

1. Аналіз матриці станів логічного контролера автономного об'єкта

1. Логічне обґрунтування: функція F набуває значення «1» лише в наборах 7, 11 та 15. Це ті стани, де об'єкт ідентифікував зовнішню заваду (x_1 або x_2), але при цьому має технічну спроможність для автономного завершення місії (x_3 та x_4 одночасно дорівнюють 1).

2. ДДНФ та МДНФ: на основі одиничних значень (рядки 7, 11, 15) будується початкова ДДНФ, яка після мінімізації спочатку аналітично, а потім (для порівняння) методами Карт Карно [1] перетворюється на елементарну схему.

3. Критичний аспект: таблиця демонструє жорстку фільтрацію «хибних спрацювань». Наприклад, у рядку 12 (повний блекаут без ресурсів) функція дорівнює 0, що запобігає безглуздій витраті енергії на маневри, які об'єкт не здатний виконати, і переводить систему в режим пасивного очікування або самознищення.

Згідно з методологією цифрового проектування [2], на основі табл. 1 побудовано повну ДДНФ:

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 + x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4 + x_1 x_2 x_3 x_4.$$

2. Процес мінімізації перемикальної функції алгоритму виживання

Наведемо приклад проведення аналітичної мінімізації [1] ДДНФ функції F для чотирьох змінних x_1, x_2, x_3, x_4 (де x_3 та x_4 — ресурси, а x_1 та x_2 — чинники загрози):

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 + x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4 + x_1 x_2 x_3 x_4.$$

Алгоритм мінімізації передбачає такі етапи:

1. Винесення спільного множника

У всіх трьох доданках присутня кон'юнкція $x_3 x_4$. Згідно з дистрибутивним законом булевої алгебри винесемо її за дужки

$$F = (x_3 x_4)(\bar{x}_1 x_2 + x_1 \bar{x}_2 + x_1 x_2).$$

2. Застосування закону склеювання

Розглянемо вираз у дужках $P = \bar{x}_1 x_2 + x_1 \bar{x}_2 + x_1 x_2$.

Для спрощення використаємо закон ідемпотентності $A + A = A$ і продублюємо останній доданок ($x_1 x_2$), щоб склеїти його з кожним із попередніх

$$P = (\bar{x}_1 x_2 + x_1 x_2) + (x_1 \bar{x}_2 + x_1 x_2).$$

У першій дужці виносимо x_2 $x_2(\bar{x}_1 + x_1) = x_2 \cdot 1 = x_2$;

у другій дужці виносимо x_1 $x_1(\bar{x}_2 + x_2) = x_1 \cdot 1 = x_1$.

Отже, вираз у дужках спрощується до $x_1 + x_2$.

3. Кінцева мінімальна диз'юнктивна нормальна форма (МДНФ)

Підставляємо спрощений вираз назад у загальну функцію

$$F_{\min} = x_3 x_4 (x_1 + x_2). \quad (1)$$

Така мінімізація дозволяє реалізувати систему всього на декількох логічних вентилях, що гарантує детермінований час відгуку, який є на порядки меншим, ніж у програмних аналогів [4]. Це підтверджує теорію побудови відмовостійких авіаційних систем, де простота логіки прямо пропорційна надійності в екстремальних умовах [3].

3. Порівняльний аналіз складності

Для наочності подамо зміну апаратної складності у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння складності апаратної частини з використанням ДДНФ та МДНФ функції управління автономним об'єктом $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$

Параметр	Повна ДДНФ	Мінімальна форма (МДНФ)	Ефект спрощення
Кількість логічних операцій	11	3	11/3 ≈ 4 рази
Кількість логічних вентилів	3 (AND4) + 1 (OR3)	1 (OR2) + 1 (AND3)	Зменшення площі чипа
Затримка сигналу	Висока (багаторурсна)	Мінімальна (2 яруси)	Швидша реакція на завади

Отже, аналітична мінімізація ПФ дозволила скоротити кількість необхідних логічних операцій з 11 до 3. У контексті автономного об'єкта це означає, що логіка автономного прориву може бути інтегрована безпосередньо у вхідний каскад польотного контролера, забезпечуючи реакцію на придушення зв'язку супротивником за час, що прямує до фізичної межі швидкодії напівпровідника [1], [2].

3. Мінімізація перемикальної функції алгоритму виживання за допомогою карт Карно

Перевіримо другий спосіб мінімізації функції управління об'єктом $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$ за допомогою методу площинних діаграм (карти Карно).

Для чотирьох змінних x_1, x_2, x_3, x_4 карта Карно має вигляд матриці 4×4 . Кожна клітинка відповідає певному набору вхідних змінних (рис. 2).

3.1. Заповнення карти Карно

Використовуємо набори даних, для яких наша функція $F = 1$. Згідно з попередньою логікою «протоколу виживання», одиниці виставляються для станів, де є ресурси ($x_3 = 1, x_4 = 1$) та завада (x_1 або x_2).

Це набори (десяткові індекси):

- 7 (0111): $\bar{x}_1 x_2 x_3 x_4$ (завада, Vision, Battery);
- 11 (1011): $x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4$ (Loss, Vision, Battery);
- 15 (1111): $x_1 x_2 x_3 x_4$ (Loss, завада, Vision, Battery).

Після заповнення всіх комірок карти Карно (рис. 2) відповідними значеннями, застосовуємо правило мінімізації картами Карно [1]: виділяємо 2 контури в суміжних комірках, де стоять 1.

З першого контуру отримаємо добуток $x_2 x_3 x_4$, з другого — $x_1 x_3 x_4$.

Запишемо підсумковий вираз функції $F = x_2 x_3 x_4 + x_1 x_3 x_4$.

Проаналізуємо отриманий вираз та спільну частину $x_3 x_4$ згідно з дистрибутивним законом булевої алгебри винесемо за дужки

$$F = x_3 x_4 (x + x_2). \quad (2)$$

Вирази (1) та (2) ідентичні, що підтверджує правильність виконання мінімізації обома методами. Але, з погляду швидкодії та наочності, метод площинних діаграм є ефективнішим у порівнянні з аналітичним.

5. Апаратна реалізація логічного контролера автономного об'єкта

Після проведення мінімізації отримано остаточну робочу функцію $F = x_3 x_4 (x + x_2)$.

Ця структура визначає архітектуру пристрою на рівні логічних затворів. У автономних об'єктах така схема може бути реалізована як частина енергонезалежного модуля на базі ПЛІС (FPGA) або дискретної логіки серії 74НС, що забезпечує роботу навіть за критичного збою основного процесора.

5.1. Склад логічної схеми:

1. Вентиль АБО (OR): об'єднує сигнали завади x_1 (Loss) та x_2 (завада). Це перший ярус логіки. Достатньо появи хоча б одного сигналу «1», щоб на виході вентилля сформувався потенціал активації.

2. Вентиль І (AND): виконує роль «дозволу». Він має три входи:

- результат першого вентилля $x_1 + x_2$;
- сигнал x_3 (Vision OK);
- сигнал x_4 (Battery OK).

Вихідний сигнал $F = 1$ (команда на повернення) з'явиться тільки тоді, коли на всіх трьох входах вентилля AND буде логічна одиниця.

Для візуалізації логічної схеми контролера автономного об'єкта використано програму Electronics Workbench (безкоштовний симулятор). Результат побудови показано на рис. 3.

На рис. 3 продемонстровано момент, що відповідає стану 1111 (Loss, завада, Vision, Battery), тобто у разі втрати сигналу керування (RC Loss), у разі детектування критичного рівня електромагнітних завад, у разі критичної висоти (Vision) (нижче безпечного порогу) та наявності палива/заряду для маневру (Battery) об'єкт має можливість автономного повернення.

Для генерації двійкових кодів (тут у шістнадцятковій системі числення) згідно з табл. 1 використано інструмент Word Generator.

$x_1, x_2 \backslash x_3, x_4$	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	1	0
11	0	0	1	0
10	0	0	1	0

Рис. 2. Карта Карно для мінімізації функції управління БПЛА $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$

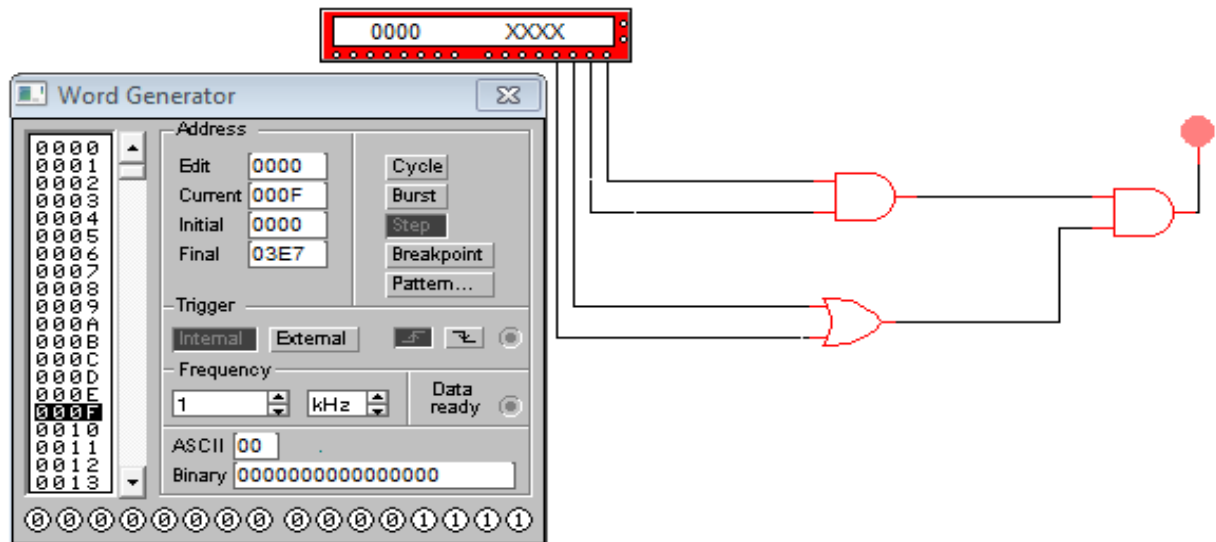


Рис. 3. Логічна схема контролера автономного об'єкта

Висновки

Застосування перемикальних функцій у комп'ютерній логіці автономного об'єкта дозволяє обійти обмеження традиційного ПЗ у критичних умовах. Мінімізована апаратна логіка забезпечує високу завадозахищеність, енергоефективність та миттєву реакцію апарата. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на синтез динамічно реконфігурованих логічних матриць для адаптації до нових типів перешкод.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. В. Бабич, і І. А. Жуков, *Комп'ютерна логіка*, підручн. Київ, Україна: НАУ, 2014, 484 с. [Online]. Available: <http://er.nau.edu.ua/handle/123456789/7268>.
- [2] J. F. Wakerly, *Digital Design, Principles and Practices*, 5th ed. Belmont, CA: Pearson, 2017, 912 p. [Online]. Available: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/digital-design-principles-and-practices/P200000003259/9780134460093> (WoS).
- [3] R. W. Beard, and T. W. McLain, *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2012, 300 p. [Online]. Available: <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691149219/small-unmanned-aircraft>. (Scopus)
- [4] В. М. Синеглазов та ін., *Проектування систем керування автономними об'єктами*, навч. посіб., Київ, Україна: НАУ, 2021, 250 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://er.nau.edu.ua/handle/123456789/18063>.
- [5] О. О. Макаренко, і Ю. В. Терещенко, «Аналіз завадозахищеності каналів зв'язку літальних апаратів в умовах радіоелектронних перешкод», *Системи управління, навігації та зв'язку*, вип. 2 (64), с. 28-34, 2021. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.028> (WoS).
- [6] *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*. Washington, USA: Naval Air Warfare Center, 2013. [Online]. Available: <https://www.navair.navy.mil/nawcwg/nawcwg-products/engineering-handbook>.

Рекомендована редколегією журналу «Вісник Вінницького політехнічного інституту»

Дата надходження 20.04.2026

Дата прийняття після доопрацювання 15.05.2026

Дата прийняття до друку після рецензування 26.06.2026

Дата публікації 2.10.2026

Маркова Оксана Миколаївна — канд. пед. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, e-mail: markova@knu.edu.ua . <https://orcid.org/0000-0002-5236-6640> ;

Вдовиченко Ірина Нікіфоровна — канд. тех. наук, доцент, старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж, e-mail: vivin2015@knu.edu.ua . <https://orcid.org/0000-0003-0953-655X> .

Криворізький національний університет, Кривий Ріг

O. M. Markova¹
I. N. Vdovychenko¹

The Use of Switching Functions in Object Logic Control Systems Under Intensive Electromagnetic Interference

¹Kyryvi Rih National University

The article provides a detailed study of methods for increasing the survivability of autonomous objects under the conditions of intensive external electromagnetic interference. The necessity of the transition from high-level software protocols to the implementation of "hardwired" logic based on the mathematical apparatus of switching functions is substantiated. This approach facilitates the stable operation of the autonomous control system in case of communication failure with the operator or the degradation of global navigation satellite system signals.

The methodological framework of the study implements classical approaches of computer logic and digital automata theory. In the course of the research, a multi-criteria decision-making model was developed based on the analysis of four key input variables: the presence of intensive interference in the radio channel, loss of control signal (RC Loss), safe altitude sensor readings (Vision), and energy resource level (Battery). The authors describe in detail all stages of the switching function synthesis – from the formation of a 16-state truth table to the isolation of critical sets corresponding to the object's survival conditions.

Special attention is paid to the process of minimizing logical expressions. A comparative analysis of the analytical simplification method based on Boolean algebra laws and the graphical method using plane diagrams (Karnaugh maps) was carried out. The identical results obtained confirmed the correctness of the synthesized minimal disjunctive normal form (MDNF). It was established that the use of an optimized switching function allows for reducing hardware costs for the control system implementation by nearly four times due to the reduction in the number of logical operations from eleven to three.

Practical part of the study includes the development and modeling of the controller's logic circuit in the specialized Electronics Workbench environment. The simulation results confirmed the high response speed of the system to external threats. It has been proven that the proposed architecture, implemented on the basis of FPGA or discrete logic, provides a deterministic response time and prevents software freezing of the controller in extreme operating conditions.

The scientific novelty of the work lies in the development of a "hardware instinct" algorithm for an autonomous object, based on which the decision-making process is implemented at the physical level of the electronic circuit, significantly increasing the reliability of aviation equipment in extreme operating conditions.

Keywords: switching function, autonomous object, noise immunity, Karnaugh maps, digital logic, autonomous control system, logic circuit, minimization, MDNF, system survivability.

Markova Oksana M. — Cand. Sc. (Ped.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Systems and Networks, e-mail: markova@knu.edu.ua . <https://orcid.org/0000-0002-5236-6640>;

Vdovychenko Iryna N. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Senior Lecturer, of the Chair of Computer Systems and Networks, e-mail: vivin2015@knu.edu.ua . <https://orcid.org/0000-0003-0953-655X>