

Рязанцев О.І., Жученко Є.В., Кардашук В.С., Кравцов С.В.

### СТРУКТУРНИЙ АЛГОРИТМ ПОШУКУ ДЕФЕКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИГНАТУРНОГО АНАЛІЗАТОРА

*У статті проведено дослідження методу діагностики пошуку дефектів на основі сигнатурного аналізу для перевірки та тестування функціонування цифрових схем. Застосування методів на основі сигнатурного аналізу при їх практичній реалізації не вимагає значних зусиль та досвіду від обслуговуючого персоналу. Невеликі габарити приладів, побудованих на основі сигнатурного аналізу, роблять їх застосування легким в освоєнні та експлуатації на відміну від складних стаціонарних приладів. Перевагою застосування приладів на основі сигнатурного аналізу є невеликі габарити, мінімальне живлення, швидкодія, відсутність необхідності попереднього налаштування, можливість роботи у «польових» умовах. Робота сигнатурного аналізатора не залежить від вибору алгоритму, а ґрунтується тільки на сигнатурі еталону, що дає змогу скоротити кількість перевірок та підвищити продуктивність при масовому тестуванні виробів. Наведена модель сигнатурного аналізатора в програмі Multisim 14.3 показує просту реалізацію пристрою з мінімальною кількістю схемотехнічних елементів. Для проведення моделювання застосований генератор цифрових сигналів, 8-ми бітний регістр зсуву, логічний елемент додавання по модулю 2 та індикатори, що відображають отриману сигнатуру в шістнадцятирозрядному коді. Як варіант модернізації сигнатурного аналізатора, замість логічного елемента додавання по модулю 2 пропонується використання програмованої логічної мікросхеми ATF22V10B фірми Microchip, що спростить схемну реалізацію цього вузла. В розглянутій моделі мікропроцесорної системи для перевірки правильності функціонування для визначення одиничних та нульових значень на повному наборі вхідних впливів проведена в програмі Multisim 14.3. При проведенні тестової послідовності отримані значення відображаються на індикаторах. Побудовані тестові пливи для перевірки константних несправностей та алгоритмів дедуктивного моделювання дозволяє виявити дефекти схем вентильного логічного рівня або універсальних базисів. Застосування для перевірки великих інтегральних схем за допомогою багатоканальних цифрових аналізаторів є проблематичним, оскільки велика кількість контактів не дозволяє підключитись безпосередньо до мікросхеми.*

***Ключові слова:** сигнатурний аналіз, діагностика, тестова послідовність, моделювання, аналізатор, інтегральна схема.*

**Актуальність дослідження.** При конструюванні електронних цифрових схем актуальною задачею є дослідження методів підвищення якості їх функціонування та систем побудованих на їх основі. Для перевірки правильності функціонування електронної цифрової схеми зазвичай формують еталонні тестові вхідні впливи та очікують відповідні еталонні реакції. Зазвичай еталонні реакції можливі лише при нормально функціонуючій цифровій схемі. Такий метод діагностики та тестування при практичному використанні отримав назву сигнатурного аналізу [1].

**Постановка проблеми.** Зазвичай стаціонарні прилади контролю та діагностики є габаритними та коштують дорого [2]. Задача – розроблення невеликого по габаритам портативного пристрою для контролю та діагностики цифрових схем. Наступна проблема – це безпосереднє підключення до контактів мікросхем, які налічують інколи 100 і більше виводів. В таких випадках доцільним є застосування малогабаритних пристроїв, які працюють на основі сигнатурного аналізу – порівняння еталонного впливу (сигнатури) з отриманою. Такі дефекти легко виявити порівнюючи сигнатури в точка контролю. Точки контролю для спрощення контролю та діагностики, зазвичай, виконуються у вигляді технологічних отворів/штирів і позначаються маркуванням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Статті і публікації таких відомих вчених як Г. Гордон., К. Г. Самофалов, Г.Ф. Кривуля Г.Ф., В. І. Хаханов та інші дуже добре відображають теоретичні дослідження в області сигнатурного аналізу. Сигнатурний аналіз є методом, в основі якого лежить стиснення інформації, що перетворює двійкові послідовності будь-якої довжини у певній точці схеми, в однозначно характеристичну для цього вузла сигнатуру з набору чотирьох шістнадцятицифрових цифр. Причому, при багатократній подачі такої тестової послідовності її сигнатура (значення) при нормальній працездатності не змінюється і повторюється. Це свідчить про працездатність схеми/вузла/елементу. При наявності дефекту сигнатури еталонна та контрольна будуть відрізнятися і виникає необхідність пошуку дефекту в контрольованій схемі. На сьогоднішній день сигнатурний аналіз застосовується також в програмах антивірусного захисту [3]. Серед переваг методу сигнатурного сканування слід відмітити повторюваність результатів та швидкодію. Сигнатурний аналіз є одним з найбільш поширених методів компактного тестування, що застосовується [4].

**Вирішення проблеми.** Сигнатурний аналізатор – це електронний пристрій для контролю цифрових

систем, який шляхом введення тестової послідовності сигналів та аналізу вихідної послідовності (сигнатури) допомагає виявляти несправності в електронних схемах та їх компонентах. Порівнюючи отримані сигнатури з еталонними від справної плати, він дозволяє локалізувати проблеми в цифрових схемах.

Принцип сигнатурного аналізу заснований на еталонній реакції схеми/вузла/елементу на тестовий вплив у вигляді згорнутої еталонної сигнатури. Для формування 4-х розрядної шістнадцяткової сигнатури з усієї множини можливих поліномів обирають зазвичай поліном

$$P(x)=1+x^7+x^9+x^{12}+x^{16}, \quad (1)$$

що відповідає зворотним зв'язкам від 7, 9, 12 та 16 розрядів.

Такий підхід до визначення поліному був обраний свого часу фірмою Hewlett Packard. Використання циклічного коду з двійкових послідовностей лежить в основі сигнатурного аналізу.

Вихідній двійковій послідовності, яка знімається з певного вузла цифрового пристрою відповідає багаточлен (поліном)  $G(x)$  ступеня  $n-1$ , де  $n$  – число розрядів вихідної двійкової послідовності.

В основі сигнатурного аналізу лежить кодування двійкових послідовностей з використанням циклічного коду.

Як відомо, будь-яке двійкове число можна описати багаточленом з фіктивною змінною  $x$ . При цьому кожна двійкова цифра є коефіцієнтом фіктивної змінної.

Наприклад, двійковому числу 1100101 відповідає багаточлен  $G(x)=x^6+x^5+x^2+1$ .

В процесі формування сигнатури поліном  $G(x)$  ділиться на породжуючий поліном  $P(x)$ , значення якого визначається структурою регістра зсуву із зворотними зв'язками, який є в складі аналізатора. При діленні  $G(x)$  на  $P(x)$  отримуємо приватне  $Q(x)$  і залишок  $R(x)$ . Початковий поліном при цьому можна представити:

$$G(x)=Q(x) \cdot P(x) \oplus R(x). \quad (2)$$

де  $\oplus$  - логічна операція додавання по модулю 2

При діленні  $G(X)$  на  $P(X)$  отримуємо частку  $Q(X)$  та остачу  $R(X)$ . Вихідний поліном при цьому вміст регістра відповідний залишку  $R(x)$  відображається в шістнадцятирічному форматі. Це і є сигнатура двійкової послідовності  $G(x)$ . Так, наприклад, після ділення  $G(x)$  на  $P(x)$  в регістрі зсуву отримуємо залишок  $R(x)$ . Йому відповідає сигнатура: F A 9 C .

У роботах категорії «польові» часто потрібні компактні прилади налаштування дротових ліній передачі даних у складних кліматичних умовах. Такий прилад повинен мати мінімальна кількість деталей, відсутність налаштування приладу, мінімальний вплив напруги живлення та температури, високу надійність загального тестування. Очевидне рішення полягає у використанні цифрових мікросхем та цифрової технології.

Сигнатурний аналізатор є пристрій що складається з регістру зсуву охопленого зворотним зв'язком з функцією передачі "сума по модулю 2" (рис. 1).

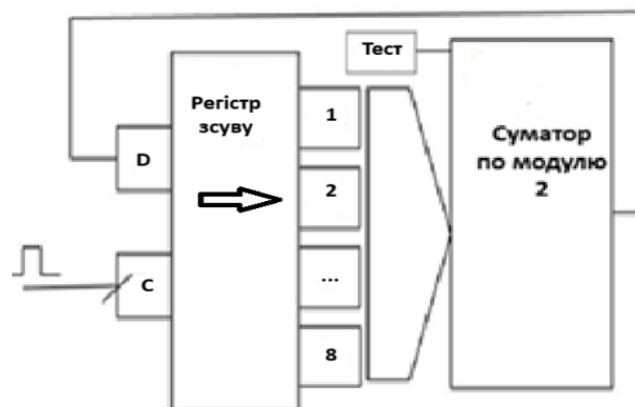


Рисунок 1 – Функціональна схема сигнатурного аналізатора

Генератор може створювати послідовність різної довжини, але слід пам'ятати що максимальний період, коли генератор проходить всі внутрішні стани, можливий тільки при певних відповідних послідовностях. Його застосування для діагностування ґрунтується на тому принципі, що справна цифрова схема при періодичному збудженні одного й того ж входу завжди видаватиме однаковий вихідний сигнал, перетворений у сигнатуру. Якщо ж цей періодичний вихідний сигнал відрізняється від еталонного, то схема несправна. Дана методика дозволяє з високою точністю локалізувати несправність і не вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Математична основа сигнатурного аналізу - спосіб кодування двійкових послідовностей з використанням циклічних кодів. При цьому будь-яке двійкове число описується многочленом, що містить фіктивну змінну  $X$ .

При проведенні сигнатурного аналізу користуються такими термінами як тест, сигнатура, елементарна перевірка, результати перевірки, зондова перевірка, контрольна точка. Важливим питанням є визначення попередників для обраної цифрової схеми – списку ліній і примітивів, що розташовані на ній, інформація від яких може пройти по цієї лінії в штатному режимі роботи схеми без помилок, також наступників. При такому підході виявляємо область підозрюваних дефектів. На цифровій схемі можна позначити перелік контрольних точок, які аналізуються на черговому кроці алгоритму тестування на наявність дефекту елемента/монтажу друкованої плати.

Процес формування сигнатури відбувається наступним чином. Попередньо на входи /CLR мікросхеми зсувних регістрів U1 та U2 подається сигнал скидання, щоб перевести виходи у початковий стан лог. 0 (рис. 2).

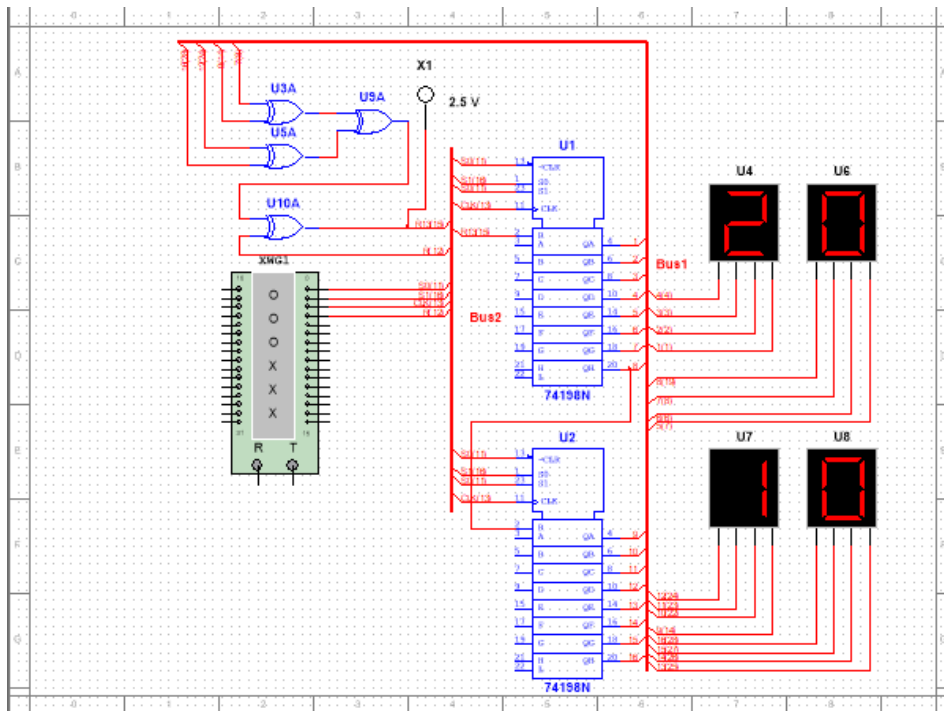


Рисунок 2 – Схемна модель логічного аналізатора

Входи регістрів S0 та S1 задають напрямок зсуву інформації. У нашому випадку – це зсув вправо (S0=1, S1=0). Інформація від генератора у послідовному коді подається на вхід R першого регістра (U1), а при заповненні регістра U1 на вхід R другого регістра (U2).

Регістри у схемі працюють по передньому фронту імпульсу, тобто запис інформації в регістр відбувається при переході імпульсу від лог. 0 до лог. 1. Як тільки інформація буде зафіксована в регістрах вона відразу відображається на його виходах. Для заповнення двох регістрів тестовою послідовністю потрібно інформаційних 16 тактів. В такому випадку аналізатор вважається заповненим і тільки тоді можна зафіксувати сигнатуру. Розряди регістрів зсуву 16, 12, 9 і 7 повертаються у вигляді зворотних зв'язків на схему формування додавання по модулю 2 (U3A) з сигналом вхідної послідовності (U10A).

Наприклад, у генератор записується залишок R(X) у шістнадцятиричному форматі 1111 0000 0011 1111. Додавання проводиться на кожному часовому такті. Перші сім тактів часового інтервалу зворотні зв'язки в додаванні участі не приймають. Тільки після сьомого такту лог. 1 з виходу 18 (U1) надходить на вхід схему додавання по модулю 2 і складається з лог. 0 на восьмого такті. На виході (U10A) з'являється лог. 1, яка подається на вхід R регістра (U1). Аналогічно формуються сигнали на інших виходах входов/виходах регістрів U1 та U2. Після 16 тактів на індикаторах U4, U6, U7, U8 буде відображений 16-ти розрядний код (сигнатура). Слід відмітити, що сигнал зворотного зв'язку поступає на схему додавання по модулю 2 з затримкою на 1 такт. Це треба враховувати при формуванні тестової послідовності, а також характеристику запису інформації в регістр по передньому фронту імпульсу.

Призначення елементів логічного аналізатора наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Призначення елементів логічного аналізатора

Поз.	Найменування	Призначення
U3A, U10A	74ALS86N	Логічний елемент додавання по модулю 2 фірми NXP Semiconductors
U1, U2	74198N	8-ми бітний регістр зсуву фірми Texas Instruments
U4, U6	U143M	7-ми сегментний індикатор фірми Temic (молодша частина)
U7, U8	U143M	7-ми сегментний індикатор фірми Temic (старша частина)
XWG1	-	Генератор коду

Для практичного застосування сигнатурного аналізатора створена модель центральної частини мікропроцесорної системи в склад якої водять регістри адреси U3, U10, шинні формувачі даних – для передачі U7A, U8B та прийому – U12A, U13A. Максимально спрощена структура дозволяє виконати аналіз проходження та фіксації сигнатур в контрольних точках X1-X3. Індикація адреси відбувається на семисегментних індикаторах U1, U2, U4, U6 та даних – індикатори U9, U11, U14, U15. Функції задавача в системі виконує генератор XWG1 (рис. 3).

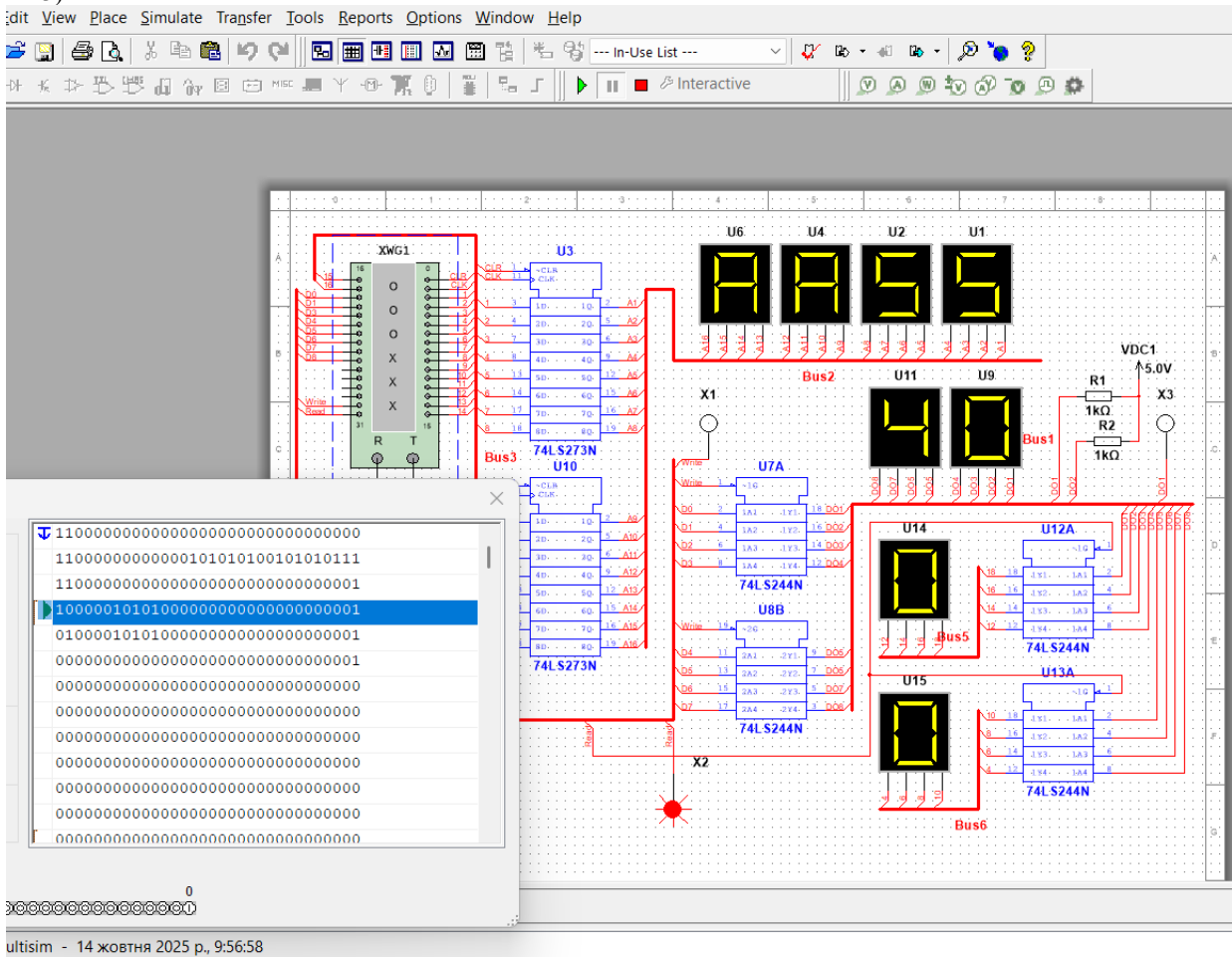


Рисунок 3 – Фрагмент моделі центральної частини мікропроцесорної системи

Призначення елементів логічного аналізатора наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Призначення елементів центральної частини мікропроцесорної системи

Поз.	Найменування	Призначення
U3, U10	74LS273N	8-ми бітний регістр D-типу фірми Texas Instruments
U7A, U8B	74LS244N	8-ми бітний шинний формувач з трьома станами фірми Texas Instruments
U1, U2, U4, U6	U143M	7-ми сегментні індикатори адреси фірми Temic
U7, U8	U143M	7-ми сегментні індикатори даних фірми Temic
XWG1	-	Генератор коду

У якості модернізації та удосконалення сигнатурного аналізатора пропонується у якості елемента мажоритарної операції додавання по модулю 2 використати програмовану логічну матрицю ATF22V10B фірми Microchip (рис. 4).

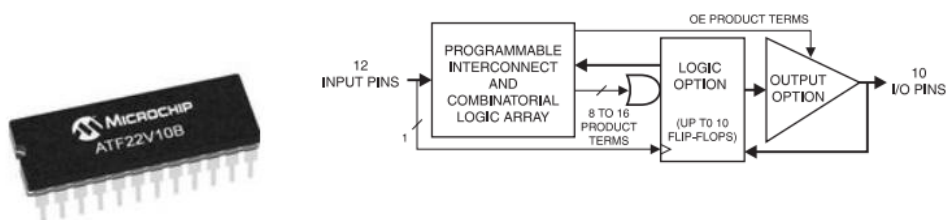


Рисунок 4 – Програмована логічна матриця ATF22V10B фірми Microchip

Серед переваг такого застосування слід відмітити можливість створення рівняння для логічного аналізатора з довільним поліномом. Наявність 12 вхідних та 10 вхідних/вихідних контактів дозволяють реалізувати широкий набір можливих функцій. Детальніше застосування програмованих логічних матриць розглянуто в [5].

**Висновки.** Здійснено дослідження методу діагностики пошуку дефектів на основі сигнатурного аналізу для перевірки та тестування функціонування цифрових схем. Наведені практичні переваги застосування приладів на основі сигнатурного аналізу. Проведено моделювання сигнатурного аналізатора в програмі Multisim 14.3. Запропоновано використання програмованої логічної матриці ATF22V10B для реалізації широкої номенклатури поліномів для перевірки контактних несправностей.

#### Література

1. М.Ю. Лосев. Методика синтезу одноктактового паралельного сигнатурного аналізатора. Електронний ресурс. Режим доступу <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/e260de01-ea5d-42a6-9b6d-b9898eb3e504/content> (дата доступу 13.10.2025).
2. Д. В. Кухаренко. Метод діагностики складних електронних схем з використанням сигнатурного аналізу. Електронний ресурс. Режим доступу [https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020\\_3\\_2020-3-133.pdf](https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020_3_2020-3-133.pdf) (дата доступу 13.10.2025).
3. Демчук Л. Ю. Технології виявлення атак (аналіз сигнатур). Електронний ресурс. Режим доступу <https://int-konf.org/ru/2013/prostir-i-chas-suchasnoji-nauki-22-24-04-2013-r/258-demchuk-l-yu-tekhnologiji-viyavlennya-atak-analiz-signatur> (дата доступу 10.10.2025).
4. Метод діагностики складних електронних схем з використанням сигнатурного аналізу. Електронний ресурс. Режим доступу [https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020\\_3\\_2020-3-133.pdf](https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020_3_2020-3-133.pdf) (дата доступу 10.10.2025).
5. Рязанцев О.І., Кардашук В.С., Барбарук В.М., Кравцов С.В. Електронний ресурс. Режим доступу <https://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/2025-28-4.pdf> (дата доступу 10.10.2025).

#### References

1. M.Y. Losev. Methodology for the synthesis of a single-cycle parallel signature analyzer. Electronic resource. Access mode <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/e260de01-ea5d-42a6-9b6d-b9898eb3e504/content> (access date 10/13/2025).
2. D. V. Kukhareno. Method for diagnosing complex electronic circuits using signature analysis. Electronic resource. Access mode [https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020\\_3\\_2020-3-133.pdf](https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020_3_2020-3-133.pdf) access date 10/13/2025).
3. Demchuk L. Yu. Attack detection technologies (signature analysis). Electronic resource. Access mode <https://int-konf.org/ru/2013/prostir-i-chas-suchasnoji-nauki-22-24-04-2013-r/258-demchuk-l-yu-tekhnologiji-viyavlennya-atak-analiz-signatur> (access date 10.10.2025).
4. Method of diagnostics of complex electronic circuits using signature analysis. Electronic resource. Access mode [https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020\\_3\\_2020-3-133.pdf](https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020_3_2020-3-133.pdf) (access date 10.10.2025).
5. Ryazantsev O.I., Kardashuk V.S., Barbaruk V.M., Kravtsov S.V. Electronic resource. Access mode <https://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/2025-28-4.pdf> (access date 10.10.2025).

*The article studies the method of diagnostics of defect search based on signature analysis for verification and testing of functioning of digital circuits. The application of methods based on signature analysis in their practical implementation does not require significant efforts and experience from the service personnel. The small dimensions of devices built on the basis of signature analysis make their use easy to master and operate, unlike complex stationary devices. The advantage of using devices based on signature analysis is small dimensions, minimal power supply, high speed, no need for pre-setting, and the ability to work in "field" conditions. The operation of the signature analyzer does not depend on the choice of algorithm, but is based only on the signature of the standard, which allows to reduce the number of checks and increase productivity during mass testing of products. The presented model of the signature analyzer in the Multisim 14.3 program shows the simplicity of implementing the device with a minimum number of circuit elements. For modeling, a digital signal generator, an 8-bit shift register, a logical element of addition modulo 2 and indicators displaying the obtained signature in a sixteen-bit code were used. As an option for upgrading the signature analyzer, instead of the logical element of addition modulo 2, it is proposed to use a programmable logic chip 22V10B from Microchip, which will simplify the circuit implementation of this node. In the considered model of the microprocessor system, to check the correctness of the functioning, to determine single and zero values on a full set of input influences, the Multisim 14.3 program was used. When conducting a test sequence, the obtained values are displayed on the indicators. The constructed test floats for checking constant faults and deductive modeling algorithms allow detecting defects in gate logic level circuits or universal bases. The use of multi-channel digital analyzers for checking large integrated circuits is problematic, since a large number of contacts does not allow connecting directly to the microcircuit.*

**Keywords:** signature analysis, diagnostics, test sequence, modeling, analyzer, integrated circuit.

**Рязанцев О.І.** – професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [ryazantsev@snu.edu.ua](mailto:ryazantsev@snu.edu.ua)

**Жученко Є.В.** – кандидат педагогічних наук, директор коледжу Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [juchenko-ev@ukr.net](mailto:juchenko-ev@ukr.net)

**Кардашук В.С.** – доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [kardashuk@snu.edu.ua](mailto:kardashuk@snu.edu.ua)

**Кравцов С.В.** – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [asp-122-22-434@snu.edu.ua](mailto:asp-122-22-434@snu.edu.ua)

Стаття надійшла до редакції: 21.10.2025 р.

Стаття прийнята до друку: 03.11.2025 р.

Стаття опублікована: 09.12.2025 р.