

**ТЕПЛОВИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ СКЛАДНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ**

*В статті проведено аналіз можливості застосування методів неруйнівного контролю (а саме теплових методів) для вирішення основних завдань технічного діагностування, таких як: визначення технічного стану, локалізація несправності та прогнозування. В якості об'єкта контролю обрано великі інтегральні схеми. Стосовно обраного об'єкта контролю принципово важливим є вирішення таких завдань, як визначення технічного стану та прогнозування. Оскільки, навіть при виявленні несправності окремого функціонального вузла, заміні підлягає весь об'єкт контролю.*

*Кузавков В.В., Романенко М.М. Тепловой неразрушающий контроль сложных полупроводниковых структур радиоэлектронного оборудования. В статье проведен анализ возможности применения методов неразрушающего контроля (а именно тепловых методов) для решения основных задач технического диагностирования, таких как: определение технического состояния, локализация неисправности и прогнозирования. В качестве объекта контроля избраны большие интегральные схемы. Относительно выбранного объекта контроля принципиально важным является решение таких задач, как определение технического состояния и прогнозирования. Поскольку, даже при обнаружении неисправности отдельного функционального узла, замене подлежит весь объект контроля.*

*V.Kuzavkov, M.Romanenko Thermal non-destructive testing of complex semiconductor structures of radio electronic equipment. The article analyzes the possibility of applying the methods of non-destructive testing (namely, thermal methods) to solve the main problems of technical diagnostics, such as: determining the technical state, localization of faults and prediction. As the object of control was chosen large integrated circuits. Regarding the selected object of control, it is of fundamental importance to solve such problems as determining the technical state and forecasting. Since, even if a malfunction of a separate functional unit is detected, the entire control object must be replaced.*

**Ключові слова:** радіоелектронне обладнання, метод технічного діагностування.

**Постановка завдання.** Будова сучасної техніки радіоелектронного обладнання (РЕО) стає все більш складною. Ускладнюється і процедура контролю (визначення) технічного стану (ТС) (працездатності) РЕО та окремих функціональних вузлів (радіоелектронних компонентів (РЕК) складної структури, великих інтегральних схем (ВІС)).

Під час експлуатації трапляються випадки виходу з ладу РЕО (РЕК), що є загрозою невиконання бойових завдань, становить небезпеку обслуговуючому персоналу та навколишньому середовищу. Разом з цим постійно зростають вимоги щодо надійності технічних засобів та до засобів автоматизованого діагностування технічних засобів, забезпечення яких можливо методами неруйнівного контролю (НК).

Для отримання достовірної та об'єктивної інформації про стан РЕО, як під час виробництва, так і в умовах експлуатації та визначення його залишкового ресурсу необхідна розробка нових або вдосконалених існуючих методів, методик, засобів неруйнівного контролю, які б дозволили визначити фактичний технічний стан окремих РЕК чи усього РЕО не втручаючись до схемо-технічних рішень об'єкта контролю, не порушуючи його працездатності.

Однією з найпоширеніших причин виходу з ладу устаткування є перевищення граничних значень за температурою (перегрів). Враховуючи, що температура є діагностичним параметром [1], необхідно мати автоматизовані програмно-апаратні засоби для вирішення основних задач технічного діагностування.

Таким чином, розвиток неруйнівних методів контролю РЕО з визначенням фактичного ТС (визначенням залишкового ресурсу) є важливим і актуальним завданням.

**Аналіз останніх публікацій.** Сучасні об'єкти радіоелектронного обладнання є складними технічними системами, що складаються з модулів різного фізичного виконання та призначення. Проведення якісного діагностування цифрових блоків РЕО залежить від

адекватності діагностичної моделі об'єкта контролю, методики проведення діагностування і застосування нових методів неруйнівного контролю [2].

Серед існуючих методів неруйнівного контролю МНК (магнітний, електричний, радіохвильовий, оптичний, радіаційний, акустичний) тепловий МНК є найбільш інформативним та оперативним методом проведення контролю та оцінки технічного стану РЕО. Інтерес до теплового МНК обумовлений його універсальністю, високою продуктивністю і безпекою обслуговування апаратури (на відміну від таких методів неруйнівного контролю, як, наприклад, рентгенівський або радіаційний). Теплові МНК в якості пробної (несучої інформації) енергії використовують теплову енергію, що поширюється об'єктом контролю [3].

Температура, як кількісний показник внутрішньої енергії тіл, є універсальною характеристикою об'єктів і процесів фізичного світу, в якому безперервно відбуваються генерація, перетворення, передача, накопичення і використання енергії в її різних формах. Отримання (реєстрація) цієї інформації системи та відповідна її обробка дозволяють визначити і проконтролювати параметри пристрою об'єктів контролю (ОК), які важко або неможливо виміряти безпосередньо [4].

Основний інформативний параметр теплових МНК – різниця температур між бездефектними і дефектними областями об'єкта. Температура може вимірюватися контактним і безконтактним методом. Для діагностування РЕО найбільш зручним є пасивний МНК. При використанні пасивного методу (його називають методом власного випромінювання) реєструють теплові потоки працюючих об'єктів, ставлячи у відповідність місцям підвищеного нагріву несправності і дефекти [5]. Аналіз теплових процесів (температурних полів, втрат тепла і т. п.) дозволяє отримати різноманітну інформацію про стан об'єктів і протікання фізичних процесів у різних ділянках електричної схеми.

В даний час інфрачервона діагностика (ІЧ) та методи теплового НК представляють високотехнологічну галузь прикладних досліджень. Інтерес до ТК обумовлений його універсальним характером, високою продуктивністю і безпекою обслуговування ІЧ апаратури [5].

**Мета статті** полягає в обґрунтуванні необхідності застосування та вдосконалення методу власного випромінювання для діагностування радіоелектронних об'єктів типу великих інтегральних схем.

**Виклад основного матеріалу.** Визначимо основні принципи, на яких ґрунтується метод власного випромінювання. Сутність методу власного випромінювання (надалі – методу) діагностування радіоелектронних блоків полягає в тому, що в якості діагностичних параметрів (ДП) використовуються параметри сигналів в інфрачервоному діапазоні хвиль, що виникає при подачі на радіоелектронний блок тестового впливу.

Слід зазначити, що особливий інтерес викликає ІЧ діапазон 8 – 14 мкм, який повністю співпадає з найбільш широким вікном прозорості атмосфери і такий, що відповідає випромінювальній здатності об'єктів контролю в температурному діапазоні від –50 до +500°C. ІЧ діапазони 3 – 5,5 і 7 – 14 мкм є основою теплового неруйнівного контролю. Повна характеристика запропонованого методу для діагностування радіоелектронних об'єктів наведено в таблиці 1 [6].

В основу класифікації покладені фізичні процеси від моменту взаємодії фізичного поля з об'єктом контролю до отримання первинної інформації (з поясненнями до термінів і ознак класифікації). Цей вид неруйнівного контролю, заснований на реєстрації змін теплових або температурних полів контрольованих об'єктів. При цьому метод НК – метод власного випромінювання (надалі – МЕТОД), заснований на реєстрації параметрів власного випромінювання об'єктів контролю.

Будь-які процеси, які відбуваються в РЕО, супроводжуються поглинанням і виділенням внутрішньої енергії тіла, яка в стані термодинамічної рівноваги пропорційна температурі об'єкта. В результаті цього, поверхні фізичних тіл набувають специфічного температурного розподілу [7].

## Класифікація теплового неруйнівного контролю

Вид контролю (умовне угруповання методів неруйнівного контролю, об'єднане спільністю фізичних принципів, на яких вони засновані).	Методи неруйнівного контролю		
	за характером взаємодії (фізичних полів з контрольованим об'єктом безпосередня взаємодія поля контрольованим об'єктом);	за первинним інформативним параметром (одна з основних характеристик фізичного поля реєстрована після взаємодії цього поля з контрольованим об'єктом);	за способом здобуття первинної інформації (сукупність характеристик фізичного поля реєстрована після взаємодії цього поля з контрольованим об'єктом).
Тепловий неруйнівний контроль – вид неруйнівного контролю, заснований на реєстрації змін температурних полів контрольованих об'єктів, викликаних дефектами.	Метод власного випромінювання (МВВ) – метод неруйнівного контролю, заснований на реєстрації параметрів власного випромінювання контрольованого об'єкта.	теплометричний метод – метод неруйнівного контролю, заснований на реєстрації теплового потоку або величин, що його визначають;	пірометричний – метод неруйнівного контролю температури за допомогою візуальних або фотоелектричних пірометрів;
		термометричний метод – метод неруйнівного контролю, заснований на контактній або дистанційній реєстрації температури контрольованого об'єкта;	калориметричний – метод неруйнівного контролю, заснований на вимірюванні теплових ефектів (кількостей теплоти).

Основою методу є закон Джоуля [8]:

$$P = I^2 R. \quad (1)$$

Збільшення кількості тепла від окремого радіоелектронного компонента можливо внаслідок витoku, окислення або кородування з'єднань. Для напівпровідникових структур зростання температури є наслідком старіння (фізико-хімічних процесів залежних від часу напрацювання). Непередбачуване тепло (позанормове, відмінне від середньо- статистичного) свідчить про наявність відхилень у фактичному технічному стані. Холодні зони можуть бути показником відкритого контуру (обриву).

Слід відзначити, що старіння напівпровідникових структур розпочинається відразу після виготовлення і не лише при використанні за призначенням, а і на інших етапах життєвого циклу (збереженні, транспортуванні та інше). Щоб розвинути ідею про те, в якій мірі погіршується стан гарячої точки, необхідно дослідити тенденції і оцінити всю систему.

Дослідження тенденцій зміни температури об'єкта контролю, що виражається у побудові залежності фізичної величини від часу. У нашому випадку на вісі абсцис відкладено значення температури. Ґрунтуючись на систематичних вимірюваннях, можна отримати картину зміни стану ОК [9].

Поправка зміни значення температури по відношенню до нормального значення струму через ОК визначається виразом:

$$\Delta T_s = \Delta T_m \left( \frac{I_m}{I_r} \right)^2, \quad (2)$$

де  $T_s$  – підйом температури,  $T_m$  – вимірний підйом температури,  $I_r$  – нормальний струм,  $I_m$  – вимірюваний струм.

Достовірність діагностування радіоелектронного блоку в значній мірі залежить від правильності вибраних ДП, які в свою чергу, залежать від задач, умовно розподілених на дві групи:

задачі, які пов'язані з протіканням процесів, безпосередньо, у радіоелементах радіоелектронного блоку, що виникають у момент подачі діагностичного тесту;

задачі, які пов'язані з можливостями виявлення і фіксації параметрів сигналів вимірника, розрахунку ДП і їх використання для визначення технічного стану радіоелектронних блоків.

Визначення фактичного ТС складних радіотехнічних пристроїв (комп'ютерів, телекомунікаційного устаткування) є основною умовою переходу до передових (прогресивних) форм технічного обслуговування.

Процесор є важливою складовою будь-якої цифрової системи. Саме на нього припадає максимальне навантаження щодо виконання основних обчислювальних дій. При виконанні значної кількості операцій температура процесора неодмінно підвищується. Перевищення граничних значень по перегріву може призвести до виходу устаткування з ладу. На відміну від інших мікросхем (менш складних за своєю внутрішньою структурою), процесор зазвичай оздоблюється радіатором. Як наслідок, відбувається інтегрування (вирівнювання) температури всієї схеми (навіть ті частини процесора, які не мають нагріватися, можуть бути перегрітими).

Застосування сучасних засобів реєстрації та відображення температури (тепловізора або пірометра) не дозволяють (при наявності радіатора) визначити диференціальні показники температури окремих складових частин процесора. Те саме стосується вбудованого датчика температури, який визначає температуру кришки (оболонки) процесора.

Проаналізуємо внутрішню структуру процесорів компанії Intel (другого і третього покоління) (рис. 1 а, б).

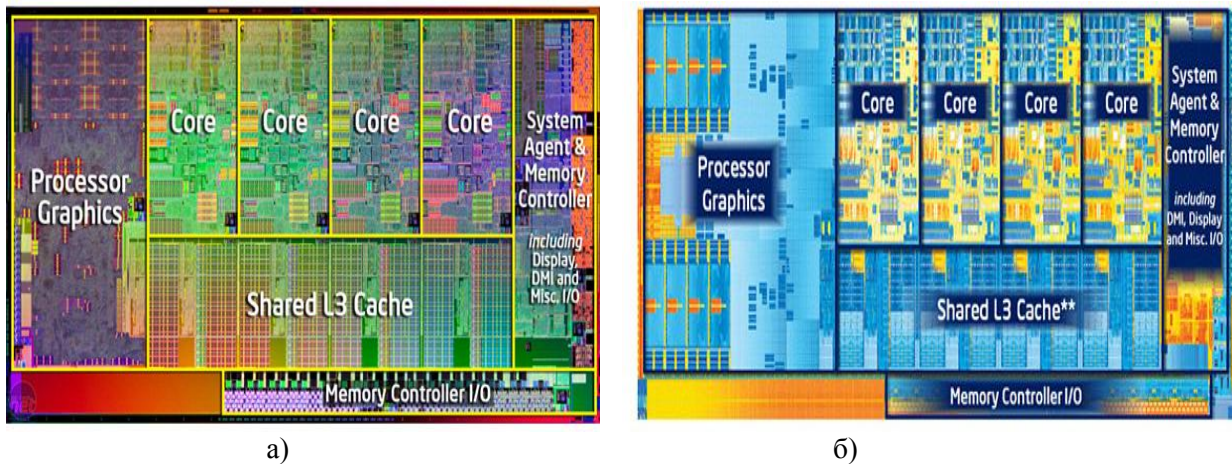


Рис. 1. Внутрішня структура процесорів компанії Intel

На рис. 1 а представлено внутрішню структуру кристала 4-ядерного процесора сімейства Intel Sandy Bridge, а на рис. 1 б – 4-ядерного процесора сімейства Intel Ivy Bridge. Графічний процесор в Intel Ivy Bridge, збільшився в розмірах та нараховує шістнадцять виконавчих модулів (замість дванадцяти в Intel Sandy Bridge). Збільшилася і загальна кількість транзисторів, що використовується. У самій складній версії чіпа Intel Sandy Bridge налічувалося близько 995 млн. транзисторів при площі кристала 216 кв. мм., тоді як у версії Intel Ivy Bridge – майже 1,4 млрд. транзисторів при площі кристала 160 кв. мм.

З наведених зображень слідуює, що можливо чітко виділити та геометрично прив'язати розташування основних функціональних вузлів (ФВ) сучасного процесора. Електричну активацію будь-якої ділянки (будь-якої складової частини або ФВ) забезпечуємо, створивши (розробивши) відповідну тестову послідовність (в рамках тестового контролю. Прикладом тестового контролю може бути стандартна програма POST контролю [1].

У багатьох випадках, де апаратним рішенням задач можна віддати перевагу порівняно з програмними рішеннями, мікроконтролери можна замінити на програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС). ПЛІС – це надвелика інтегральна схема, яка вміщує на кристалі універсальні налаштовані користувачем функціональні перетворювачі та програмовані

зв'язки між ними. За своїми можливостями, ПЛІС не відрізняється від звичайних, спеціалізованих великих інтегральних схем.

Задавати алгоритм дії проєктованого цифрового пристрою для реалізації на ПЛІС можна у вигляді часових діаграм, текстового опису, схем на логічних елементах, у вигляді логічних функцій. Використовуючи засоби системи автоматизованого проєктування (САПР), розробники отримують файл, який використовується при програмуванні ПЛІС.

Таким чином інтегральні мікросхеми з програмуємою логікою – FPGA (field programmable gate arrays) є великими цифровими інтегральними мікросхемами (ІМС), які складаються з програмованих логічних блоків і програмованих з'єднань між цими блоками [3].

### 1. Логічні блоки

- Реалізують елементарну комбінаційну і послідовну логіку

### 2. Між'єднання

- Лінії для з'єднання входів і виходів логічних блоків

### 3. Вхідні/вихідні блоки

- Служать для зовнішнього з'єднання мікросхеми ПЛІС

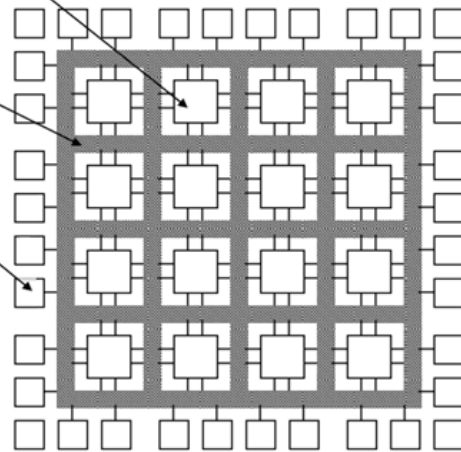


Рис. 2. Загальна структура мікросхем ПЛІС

Отже, на площі 100 – 200 кв. мм розташована складна апаратна частина, ТС якої фактично неможливо контролювати (з точки зору технічного діагностування). Зважаючи на те, що температура напівпровідникової структури є діагностичним параметром, виникає необхідність створення програмно-апаратних засобів для вирішення основних задач технічного діагностування визначеного об'єкта [1].

Джерелом енергії в багатошаровій структурі напівпровідникового РЕК є розігрітий кристал. Температура кристалу  $T$  визначається відповідно до діагностичної моделі  $p-n$  переходу. Для методу власного випромінювання, який ґрунтується на аналізі вольт-амперної характеристики (ВАХ) напівпровідникового переходу [3], температура залежить від струму через  $p-n$  перехід та фізико-хімічних властивостей напівпровідника:

$$T = \frac{U - \phi_{30}}{\frac{k}{q} \ln \frac{I}{I_{00}} - \varepsilon_3} \quad (3)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – температура;  $q$  – заряд електрона;  $I_{00}$  – величина, яка не залежить від температури;  $\phi_T$  – температурний потенціал;  $\phi_{30}$  – ширина забороненої зони при нульовій температурі;  $\varepsilon_3$  – температурна чутливість.

Підставивши в формулу (3) значення струму через  $p-n$  перехід [10]:

$$I = -\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csc} h \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2, \quad (4)$$

отримаємо математичну модель температурної залежності  $p-n$  переходу:

$$T = \frac{U - \varphi_{30}}{\frac{k}{q} \ln \left( \frac{-\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2}{I_{00}} \right)} - \varepsilon_3 \quad (5)$$

де –  $W$  ширина дифузійної області;  $L_n$  – довжина дифузійного зміщення електронів;  $U_{\text{бe}}$ ,  $U_{\text{бк}}$  – напруги, прикладені до переходів;  $S$  – площа напівпровідника;  $D_n$  – коефіцієнт концентрації основних носіїв;  $n_p^0, n_p^w$  – рівноважні концентрації в базі на границі переходів. Граничні умови:

$$n_1 = n_p^0 (e^{\lambda U_{\text{бe}}} - 1); \quad n_2 = n_p^w (e^{\lambda U_{\text{бк}}} - 1). \quad (6)$$

Отримана модель дозволяє визначити нагрів кристала напівпровідника, або кількість тепла, як діагностичний параметр процесів, які відбуваються в напівпровіднику.

Основним шляхом реалізації методу є створення програмно-апаратних засобів (автономних автоматизованих систем контролю), які забезпечують перетворення температурного градієнта у електричний сигнал [2].

Зміну ІЧ поля над РЕК під впливом функціонального або перевірного тесту доцільно використовувати для визначення фактичного технічного стану радіоелектронного блоку. Для цього вимірювальний пристрій – реєстратор ІЧ випромінювання розміщується на нормалі над об'єктом контролю. На виході реєстратора формується сигнал з певними параметрами. Наявність та параметри сигналу на реєстраторі служать інформацією про факт роботи та стан РЕК радіоелектронного блоку.

Діагностична інформація надходить до блоку її обробки. На основі порівняння параметрів еталонних і отриманих сигналів, приймається рішення про ТС об'єкта контролю.

Застосування методу в системі технічного обслуговування РЕО дозволяє:

- виключити необхідність використання вихідних контактів та контрольних точок для визначення несправного радіоелектронного блоку;
- усунути вплив пристрою діагностування на „власну” надійність радіоелектронного блоку, так як до нього не додаються нові елементи та не змінюється принципова схема;
- створити уніфікований засіб для об'єктів різних поколінь (як існуючих так і перспективних);
- зменшити час виконання основних завдань технічної діагностики.

Наукова новизна методу полягає у тому, що вперше, в якості ДП для визначеного об'єкта контролю використовуються параметри власного випромінювання, які виникають під час відпрацювання перевіркою тестової послідовності, яка забезпечує вихід об'єкта контролю на сталий режим та прояв діагностичного параметра.

Дослідження показали [2], що сигнали, наведені в вимірювальному пристрої, адекватно відображають процеси, які відбуваються в радіоелектронному об'єкті контролю незалежно від елементної бази. Потужність наведених сигналів забезпечує співвідношення сигнал-шум більш ніж в 5 – 7 разів і ці сигнали можливо використовувати у якості діагностичних параметрів.

Слід зазначити, що технічні засоби аналого-цифрового перетворення можуть забезпечити будь-яке число рівнів температури і високу точність вимірювань для відображення стану РЕО. При цьому функцію теплового контролю можна зробити внутрішньою функцією об'єкта контролю, передбачивши її на стадії проектування. В якості узагальненого параметра контролю слід використовувати значення температури корпусу ОК, строго прив'язавши геометричну точку вимірювання діагностичного параметра до внутрішньої структури об'єкта. У перспективній радіоелектронній апаратурі, побудованій на елементах „система на кристалі” (SoC), можлива ефективна організація діагностування, оскільки датчик температури можна розмістити в (на) напівпровідниковому кристалі. Це

дозволить усунути інерційність вимірювань, спростити конструктивно-схемне рішення, підвищити достовірність даних контролю.

**Висновки.** Таким чином, в статті вирішена задача, яка полягає у обґрунтуванні необхідності вдосконалення та застосування методу власного випромінювання для діагностування радіоелектронних об'єктів типу великих інтегральних схем. Даний метод можна взяти за основу для побудови уніфікованих, автоматизованих систем діагностування об'єктів РЕО, які дозволять визначити технічний стан окремого функціонального вузла внутрішньої структури великих інтегральних схем без втручанням в існуюче устаткування з заданими показниками якості.

Сутність методу полягає в тому, що в якості діагностичних параметрів використовуються параметри сигналів власного випромінювання певних частин зовнішньої оболонки, які виникають в процесі функціонування (тестування) складних РЕК.

Перевага вдосконаленого методу полягає в наступному:

- виключено необхідність використання вихідних контактів та контрольних точок для визначення несправного РЕК;
- відсутній вплив пристрою діагностування на „власну” надійність об'єкта контролю (до нього не додаються нові елементи та не змінюється принципова схема);
- можливість застосування методу як до існуючих, так і до перспективних РЕК;
- скорочення часу вирішення завдань технічної діагностики.

**Напрямом подальших досліджень** є аналіз теплових процесів у структурних модулях радіоелектронного обладнання – мікропроцесорах, ВІС та надвеликих інтегральних схемах; розробка моделі поширення тепла поверхнями складних напівпровідникових структур (великих інтегральних схем).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кузавков В.В., Романенко М.М. Температура складових процесора як діагностичний параметр. Збірник тез доповідей XI науково-практичної конференції 08.11.2018р. – Київ: ВІТІ, 2018. С. 136.
2. Гайдур Г.І., Кузавков В.В., Серих С.О. Діагностична модель  $p$ - $n$  ( $n$ - $p$ ) переходу для методу власного випромінювання // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2015. – № 1 С. 39 – 43.
3. Вишнівський В.В., Кузавков В.В., Редзюк Є.В. Термографія як засіб пасивного контролю електричного устаткування // 7 наук.-практ. сем.: Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення: 24 жовтня 2013 р.: тез. доп. – К., 2013. – С. 86.
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с франц. – М. Мир, 2005. – 416 с.
5. Клюев В.В. (ред.) Неразрушающий контроль. Том 5. Книга 1. Тепловой контроль. // В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с. – ISBN 5-217-03364-9
6. Coppola A. The status of the reliability engineering technology // Reliability Society Newsletter, 1997. – N 43. – P. 7 – 9.
7. Городецкий А. Тестирование или техническая диагностика цифровых устройств // Компоненты и технологии. – 2011. – № 3. – С. 8 – 10.
8. Jones A.C., O'Callahan, B.T., Yang H.U., Raschke M.B. The thermal near-field: coherence, spectroscopy, heat-transfer, and optical forces. Progress in Surface Science, 2013. – 392 p.
9. Електронний ресурс: <https://memagazineselect.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2678850>
10. Електронний ресурс: [https://www.tutorialspoint.com/digital\\_circuits/digital\\_circuits\\_programmable\\_logic\\_devices.htm](https://www.tutorialspoint.com/digital_circuits/digital_circuits_programmable_logic_devices.htm).