

ЗАДАЧІ ТА СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ НАДІЙНІСНОГО АСПЕКТУ ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

© Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А., 2010

Розглянуто зміст завдань надійнісного аспекту проектування радіоелектронних засобів на різних ієрархічних рівнях проектування, відзначено сучасні тенденції розвитку.

The article deals with modern development trends and the content of the problems concerning reliability aspect of radioelectronic device designing at the different hierarchic designing levels.

Вступ. Радіоелектроніка – галузь науки і техніки, яка визначає рівень і темпи науково-технічного прогресу. Тому проблема забезпечення високих показників надійності радіоелектронних засобів (РЕЗ) стала стратегічним завданням технічної політики держави. Ця проблема являє собою сукупність науково-технічних та організаційно-методичних заходів, спрямованих на забезпечення заданих показників надійності РЕЗ на етапах проектування, виробництва та експлуатації. Специфіка її полягає у тому, що кожен наступний етап призводить до зниження показників надійності: на етапі виробництва привносяться технологічні дефекти, а на етапі експлуатації можуть бути перевищені допустимі межі зовнішніх дестабілізуювальних впливів (температури, вологості, радіації тощо). Тому особливо важливим стає завдання забезпечення високого рівня надійності на етапі проектування. Така постановка задачі стимулювала розвиток надійнісного аспекту проектування РЕЗ, який являє собою комплекс взаємозв'язаних проектних задач, спрямованих на оцінку та ефективне керування показниками надійності об'єкта проектування (ОП) з метою забезпечення потрібного чи можливого рівня надійності за умови збереження заданої функціональної поведінки ОП.

Основна частина. Характерною особливістю сучасної радіоелектроніки є неперервне підвищення відповідальності та ускладнення функцій, що їх реалізують РЕЗ, у зв'язку з чим зростають вимоги до технічних параметрів, що, своєю чергою, призводить до ускладнення їх архітектури. В результаті виникає суперечність між складністю та надійністю РЕЗ.

Цю суперечність розв'язують за допомогою оптимізаційної постановки задачі проектування: забезпечення потрібних функціональних параметрів ОП за максимально досяжного рівня надійності, або досягнення найкращих функціональних параметрів за заданих обмежень на показники надійності. Зрозуміло, що в обох випадках враховується також обмеження на наявні ресурси (енергоспоживання, вартість, масогабаритні характеристики тощо).

Зміст і методи розв'язання задач надійнісного аспекту проектування РЕЗ залежать від ступеня деталізації уявлень про ОП, який зростає у міру переходу від стадії розроблення технічного завдання до технічного (робочого) проектування. Під час розроблення РЕЗ виділяють такі ієрархічні рівні проектування [1]: системний, функціонально-логічний, схемотехнічний, компонентний. Для кожного рівня використовують відповідний математичний апарат та математичні моделі (ММ), які адекватно описують ті властивості ОП, що цікавлять дослідника.

На стадії розроблення технічного завдання вибирають принцип побудови ОП та визначають перелік вихідних параметрів, які характеризують цільове призначення ОП, а також комплекс зовнішніх впливів, істотних для функціонування ОП.

На цій стадії надійнісний аспект проектування полягає в обґрунтуванні вимог до показника надійності, який розглядають як здатність ОП виконувати в заданих умовах призначені функції, зберігаючи значення усіх функціональних параметрів у межах, встановлених нормативно-технічною документацією. Розв'язують цю задачу на основі аналізу інформації, яка міститься в банках даних про показники надійності РЕЗ, що перебуває в експлуатації, і які є аналогами до проєктованих за призначенням, умовами виробництва, експлуатації, функціональною складністю, а також даних про досягнуті показники надійності елементної бази та про основні види порушень працездатності тощо [3].

На системному рівні ОП розглядають у функціональному аспекті спочатку як єдине ціле, що може бути описане узагальненою ММ, в якій відображено закон функціонування, що описує вектор вихідних параметрів ОП \dot{Y} як функцію вектора зовнішніх дій \dot{Q} :

$$\dot{Y} = F(\dot{Q}), \quad (1)$$

де F – деякий оператор, що описує закон функціонування.

Вектор \dot{Q} характеризує комплекс зовнішніх дій – вхідні сигнали, завади, температуру, вологість тощо. Зауважимо, що закон функціонування можна інтерпретувати як **зовнішню поведінку** досліджуваного об'єкта, спрямовану на виконання заданих функцій.

Для оцінки ступеня відповідності об'єкта своєму функціональному призначенню задають межі допустимих значень n вихідних параметрів у вигляді співвідношень:

$$y_{i \min} \leq y_i \leq y_{i \max}; \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

котрі в сукупності визначають область допустимих значень D_y вектора вихідних параметрів.

У надійнісному аспекті розглядають здатність об'єкта виконувати в заданих умовах заданий закон функціонування, зберігаючи значення усіх функціональних параметрів у допустимих межах.

Очевидно, що умова працездатності об'єкта та правильного функціонування формулюється у вигляді співвідношення:

$$\dot{Y} \in D_y. \quad (3)$$

Кількісною характеристикою показника надійності є імовірність $R(T)$ того, що протягом заданого часового інтервалу $[0, T]$ буде виконана умова (3):

$$R(T) = P\{Y(t) \in D_y, \forall t \in [0, T]\}. \quad (4)$$

Звернемо увагу на те, що показник (4) одночасно характеризує також серійнопридатність досліджуваного об'єкта, оскільки при $t=0$ його значення визначає ймовірність того, що виготовлений об'єкт буде працездатний за наявності розкиду параметрів елементів. Імовірнісний характер показника надійності зумовлений тією обставиною, що зміна технічного стану об'єкта описується деяким випадковим процесом $\dot{Y}(t)$, поведінку якого визначають показники надійності елементної бази з урахуванням конкретних режимів роботи у схемі та умов експлуатації. Проте ці фактори на системному рівні невідомі й можуть бути уточнені лише за умови збільшення ступеня деталізації уявлень про досліджуваний об'єкт.

На функціонально-логічному рівні розглядають архітектуру досліджуваного об'єкта, під якою у загальному випадку розуміють структуру та алгоритм функціонування.

У функціональному аспекті структуру досліджуваного об'єкта подають у вигляді сукупності взаємопов'язаних однофункціональних вузлів, призначених для виконання простіших функцій, визначають необхідні взаємозв'язки між ними, технічні параметри і характеристики кожного вузла тощо. Алгоритм функціонування відображає характер і послідовність взаємодії між вузлами при реалізації закону функціонування, тобто **внутрішню поведінку** об'єкта.

Задача синтезу архітектури сучасних РЕЗ в загальному випадку формалізується важко і нині її розв'язують, як правило, евристично – на основі досвіду та інтуїції розробника. Складність

розв'язання цієї задачі зумовлена наявністю великої кількості альтернативних варіантів, оскільки сучасна елементна база радіоелектроніки являє собою істотно неоднорідний базис для синтезу й уможливує використання як простих компонентів, так і складних мікроелектронних виробів, дає змогу будувати цифрову апаратуру як за принципом “жорсткої логіки” (коли структура пристрою однозначно визначає алгоритм функціонування), так і за принципом “програмованої логіки”, який реалізується за допомогою мікропроцесорних комплектів ВІС та НВІС (коли за фіксованої структури апаратних засобів можлива реалізація різних алгоритмів). В останньому випадку з'являється велика кількість варіантів розподілу функцій між апаратними і програмними засобами, що додатково ускладнює задачі проектування внаслідок необхідності порівняльної оцінки варіантів як за складом і характеристиками апаратних засобів, так і за параметрами програмного забезпечення – швидкодією, об'ємом пам'яті тощо [2, 4, 5, 9].

Результатом розв'язання задач функціонального аспекту проектування є побудована на функціонально-логічному рівні модель структури M_C і модель алгоритму функціонування M_A , перша з яких відображає наявність функціональних вузлів та взаємозв'язки між ними, а друга описує алгоритм функціонування, часто без конкретизації апаратної реалізації. ММ об'єкта подають у вигляді деякого математичного оператора F_1 , котрий перетворює вектор \dot{Z} параметрів моделей M_C та M_A і вектор зовнішніх дій \dot{Q} на вектор вихідних параметрів \dot{Y} :

$$\dot{Y} = F_1(\dot{Z}, \dot{Q}) \quad (5)$$

Зміст надійнісного аспекту проектування на цій стадії проекту полягає у розв'язанні таких задач:

- а) визначення переліку відповідних показників надійності з урахуванням специфіки функціонального призначення ОП, його режимів роботи, властивостей елементної бази, які визначають види та механізми відмов;
- б) розподіленні вимог стосовно показників надійності складових частин структури та алгоритму і попередній оцінці показників надійності;
- в) визначення шляхів і способів забезпечення заданих вимог до показників надійності.

В загальному випадку показник надійності встановлюють з огляду на припущення, що до деякого моменту часу t_0 об'єкт був вимкнений, або перебував в резерві, а в момент t_0 він почав функціонувати. Тому показник надійності подають у вигляді:

$$P(T) = P(t_0) \cdot P(t_0, T), \quad t_0 < T, \quad (6)$$

де $P(t_0)$ – імовірність того, що у момент t_0 об'єкт є працездатним; $P(t_0, T)$ – імовірність правильного функціонування об'єкта на інтервалі часу $\Delta T = [t_0, T]$ за умови, що у момент початку функціонування t_0 об'єкт був працездатним.

У такому формулюванні показник $P(t_0)$ трактують як коефіцієнт готовності, який характеризує стан структури (технічний стан) у момент t_0 , а показник $P(t_0, T)$ характеризує імовірність правильного функціонування (функціональний стан) об'єкта на інтервалі ΔT .

Попередню оцінку показників надійності здійснюють за допомогою моделі надійності ОП, яка відображає взаємозв'язок між значеннями коефіцієнта готовності та імовірності правильного функціонування, з одного боку, і параметрами моделей структури M_C та алгоритму функціонування M_A – з іншого боку.

Модель надійності ОП в загальному випадку являє собою сукупність двох моделей: моделі надійності структури M_{HC} і моделі надійності алгоритму M_{HA} .

Модель надійності структури M_{HC} будують на підставі структурного підходу [2,3], згідно з яким випадковий процес, який моделює появу та усунення несправностей (відмов) ОП, визначається заданням станів працездатності та непрацездатності компонентів структури з урахуванням її топологічних особливостей та характеристик стратегії обслуговування.

Модель надійності алгоритму M_{HA} будують на підставі структурно-алгоритмічного підходу [4], згідно з яким закон функціонування ОП моделюють реалізацією конкретного алгоритму із структурною (апаратною) реалізацією операторів та логічних умов та з урахуванням показників їх

надійності та швидкодії. Це означає, що конкретним операторам та логічним умовам алгоритму ставлять у відповідність конкретні компоненти структури (функціональні вузли – реєстри, лічильники, шифратори тощо), які беруть участь у їх реалізації, і враховують показники правильності функціонування та швидкодії цих компонентів під час оцінки показників правильності реалізації та швидкодії алгоритму загалом. Звичайно при цьому алгоритми описують на рівні команд. Отже, алгоритмічне та програмне проектування займають важливе місце на функціонально-логічному рівні під час розроблення апаратно-програмних комплексів, закон функціонування яких розподілений між апаратними та програмними засобами.

Значення коефіцієнта готовності та показників функціональної надійності знаходять як математичні сподівання деяких функціоналів, побудованих на траєкторіях випадкових процесів, які характеризують поведінку M_C та M_A за наявності різних видів порушення працездатності.

За допомогою моделей $M_{НС}$ та $M_{НА}$ розв'язують не лише задачі надійнісного аналізу, тобто визначення значень показників коефіцієнта готовності та імовірності правильного функціонування залежно від прийнятих значень параметрів цих моделей, але і задачі надійнісного синтезу і надійнісної оптимізації.

Задача надійнісного синтезу полягає у доповненні та перетворенні моделей M_C і M_A з метою забезпечення потрібного рівня надійності їх реалізацій. Надійнісний синтез структури ОП спрямований на збільшення коефіцієнта готовності та реалізується за допомогою різноманітних методів резервування, реконфігурації тощо. Надійнісний синтез алгоритмічних моделей поведінки спрямований на збільшення показника $P(t_0, T)$ і реалізується за допомогою функціонально-еквівалентних перетворень і доповнень алгоритмів з метою надання їм властивостей контрольованості та коректованості. Отже, надійнісний синтез структур і алгоритмів спрямований на надання об'єктам проектування властивості відмовостійкості через уведення в них апаратної, алгоритмічної, інформаційної та інших видів надлишковості та реалізації за їх допомогою функцій контролю працездатності, локалізації несправностей та відновлення працездатності.

Задача надійнісної оптимізації полягає в оптимальному виборі значень керованих параметрів моделей M_C і M_A з метою досягнення максимальних чи потрібних показників надійності за заданих обмежень на інші показники.

На схемотехнічному рівні розглядають схеми функціональних вузлів об'єкта як такі, що складаються із електрорадіоелементів – транзисторів, резисторів, конденсаторів тощо. Стосовно мікроелектронних ОП зауважимо, що елементами їх схем, крім перелічених вище електрорадіоелементів, можуть бути операційні підсилювачі, диференційні каскади тощо, які виготовлені у вигляді мікросхем і тому їх розглядають як окремі компоненти.

Математичним забезпеченням функціонального аспекту на схемотехнічному рівні слугують математичні моделі елементів схеми, методи та алгоритми формування ММ схем із ММ елементів, методи розв'язання отриманих рівнянь, а також методи багатоваріантного аналізу та оптимізації електронних схем.

У функціональному аспекті ММ об'єкта на схемотехнічному рівні описує вектор фазових змінних $\dot{\mathbf{V}}$, котрий характеризує фізичний або інформаційний стан об'єкта як деяку функцію F_2 вектора параметрів елементів схеми $\dot{\mathbf{X}}$ і вектора зовнішніх дій $\dot{\mathbf{Q}}$:

$$\dot{\mathbf{V}} = F_2(\dot{\mathbf{X}}, \dot{\mathbf{Q}}). \quad (7)$$

Роль фазових змінних можуть відігравати напруги та струми гілок схеми, заряди, потікозчеплення тощо.

Вектор вихідних параметрів $\dot{\mathbf{Y}}$ в окремих випадках може збігатися з вектором фазових змінних $\dot{\mathbf{V}}$, але в загальному випадку його визначають через вектор $\dot{\mathbf{V}}$:

$$\dot{\mathbf{Y}} = F_3(\dot{\mathbf{V}}) = F_3(F_2(\dot{\mathbf{X}}, \dot{\mathbf{Q}})). \quad (8)$$

Оператори F_2 та F_3 можуть бути задані аналітично, у вигляді алгоритмів розв'язання диференційних рівнянь, у вигляді програм моделювання тощо.

Вирази (7), (8) адекватно відтворюють вплив вектора параметрів елементів \dot{X} на траєкторію вектора вихідних параметрів \dot{Y} у просторі станів працездатності та непрацездатності, що дає підставу застосувати їх для побудови моделі надійності об'єкта на схемотехнічному рівні. Цю модель будують на підставі використання надійнісних моделей елементної бази з урахуванням таких властивостей конкретних типоміналів використовуваних електрорадіоелементів, як інтенсивність відмов, швидкість часового дрейфу параметрів, вплив режимів роботи та параметрів зовнішнього середовища тощо. Математичне забезпечення цього процесу становлять методи теорії чутливості, теорії допусків, теорії параметричної оптимізації тощо.

Аналіз моделі надійності схемотехнічного рівня дає змогу коректно відобразити область працездатності D_y із простору вихідних параметрів в область D_x у просторі параметрів елементів схеми. При тому показник надійності (4) набуває вигляду:

$$R(T) = P\{\dot{X}(t) \in D_x, \forall t \in [0, T]\}. \quad (9)$$

Оскільки задача відображення області працездатності D_y в область D_x у загальному випадку пов'язана із значними труднощами, то на практиці цю задачу розв'язують виконанням над ММ об'єкта серії цілеспрямованих багатоваріантних машинних експериментів, розраховуючи його вихідні характеристики для різних наборів змінних параметрів у різних умовах експлуатації.

На компонентному рівні розглядають процеси, що відбуваються у компонентах схеми. При тому у функціональному аспекті використовують відповідні ММ цих процесів. Такими моделями можуть бути, наприклад, рівняння математичної фізики, що описують фізичні процеси, які відбуваються в елементах інтегральних мікросхем під час їх функціонування у складі цифрових пристроїв. Моделювання має на меті визначення просторових і часових залежностей електростатичного потенціалу та електрохімічних потенціалів електронів і дірок за заданих електрофізичних та конструкторсько-технологічних параметрів компонентів схеми. Для напівпровідникових компонентів (діодів, транзисторів) за умови лінійної локальної залежності термодинамічних явищ використовують ММ у вигляді системи рівнянь для потенціалів, яку називають дифузійно-дрейфовою моделлю.

Надійнісний аспект представлень на компонентному рівні полягає у побудові надійнісних моделей компонентів, які відображають часові залежності інтенсивності відмов або ймовірності безвідмовної роботи через електрофізичні і конструкторсько-технологічні параметри, параметри зовнішнього середовища, умови експлуатації тощо.

Висновки. Із сказаного вище випливає, що специфічною особливістю надійнісного аспекту проектування РЕЗ є наявність великої кількості можливих способів забезпечення необхідного рівня надійності об'єктів проектування, котрі відрізняються побудовою структури, алгоритмами функціонування, використаною елементною базою, режимами роботи елементів схеми, способами реалізації функцій забезпечення відмовостійкості тощо.

Нині застосовують структурні, інформаційні, алгоритмічні та інші методи підвищення надійності апаратури, а також різноманітні способи діагностування технічного стану об'єктів, які належать до системного та функціонально-логічного рівнів проектування. Під час аналізу надійності структур широко застосовують математичний апарат булівської алгебри і теорії марковських процесів. Поява нової елементарної бази – сучасних великих та надвеликих інтегральних схем (ВІС та НВІС), яким притаманні специфічні механізми відмов, стимулює подальший розвиток досліджень їх надійнісних характеристик, методів побудови моделей надійності та прогнозування показників надійності [6, 10]. Актуальними залишаються питання надійнісного проектування алгоритмів, оскільки алгоритмічні методи забезпечують широкі можливості для забезпечення показників надійності цифрових пристроїв, що зумовило все ширше їх застосування під час розв'язання задач надійнісного проектування, і передусім при розробленні мікропроцесорних пристроїв і систем. Застосування алгоритмічних методів забезпечення надійності передбачає розроблення моделей, які описують внутрішню поведінку цифрових пристроїв та

систем за наявності відмов та збоїв з урахуванням необхідності забезпечення заданого закону функціонування. Тому особливої актуальності набувають питання побудови моделей несправностей мікроелектронних виробів та кількісної оцінки їх характеристик, а також задач розроблення на їх основі засобів автоматизованого надійнісного проектування алгоритмічного забезпечення цифрових пристроїв та систем [7].

Оскільки сучасні ВІС та НВІС містять внутрішню надлишковість, то ця обставина полегшує реалізацію принципу відмовостійкості апаратних засобів і стимулює розвиток методів тестування, діагностики, вбудованого контролю та самоперевірки. У зв'язку з цим виникли нові задачі побудови надійнісних моделей, які на системному рівні урахували б такі фактори, як реконфігурація структури з можливою зміною при цьому процедур виявлення несправностей, їх діагностики, відновлення працездатності тощо [8]. Все ширше застосування програмованої елементної бази – мікропроцесорних ВІС та НВІС ставить нову задачу надійнісного проектування – оптимального розподілу функцій забезпечення відмовостійкості між апаратними та програмними (алгоритмічними) засобами з урахуванням обмежень на швидкодію та витрати і, отже, стимулює розроблення нових методів і засобів розв'язання цієї задачі.

Відсутність методів оптимального розв'язання задач надійнісного аспекту проектування в загальному випадку зумовлює широке використання в інженерній практиці порівняльного аналізу альтернативних варіантів. Складність і трудомісткість цього процесу зумовили актуальність проблеми подальшого розвитку наявних та розроблення нових методів і засобів автоматизованого надійнісного проектування РЕЗ за допомогою сучасної комп'ютерної техніки. Ця проблема є самостійним перспективним напрямом досліджень, який має важливе практичне значення.

Саме цієї проблеми стосуються науково-дослідні роботи, які провадяться в лабораторії НДЛ-51 Національного університету "Львівська політехніка". За період 2007–2009 рр. завершено держбюджетну тему "Розробка комп'ютерних макромоделей радіоелектронних систем та їх функціональних вузлів, адаптованих до задач надійнісного проектування", результатом якої є розроблені комп'ютерні макромоделі функціональних вузлів РЕЗ, призначені для багатоваріантного аналізу на функціонально-логічному рівні. Для системного рівня проектування розроблено моделі відмовостійких систем з мажоритарною структурою з реконфігурацією та ковзним резервуванням з урахуванням ефектів старіння без відновлення та модель з різними стратегіями відновлення (технічного обслуговування). Набула подальшого розвитку технологія автоматизованого моделювання об'єктів проектування, математичний опис яких відповідає дискретно-неперервній стохастичній системі. Зокрема, розроблено формалізований метод автоматизованої побудови марковських моделей таких систем, який істотно (на 1–2 порядки) скорочує затрати часу на розв'язання задач багатоваріантного аналізу.

Подальші дослідження лабораторії спрямовані на розвиток теоретичних засад надійнісного моделювання радіоелектронних програмно-апаратних засобів та електромеханічних пристроїв і систем довготривалого використання і, зокрема, розроблення математичного забезпечення для побудови надійнісних моделей складних технічних систем високого ступеня адекватності (з мінімальними спрощеннями і обмеженнями) та рівнем формалізації, який дає змогу автоматизувати процес їх надійнісного аналізу.

1. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник / Е.В. Авдеев, А.Т. Еремин, И.П. Норенков, М.И. Песков / Под ред. И.П. Норенкова. – М.: Радио и связь, 1986. – 368 с. А.М. Половко, С.В. Гуров. Основы теории надежности. БХВ – Петербург, 2006. – 560 с. 2. Хенлі Е. Дж., Кумамато Х. Надійнісне проектування технічних систем і оцінка ризику / Пер. з англ. за ред. Ю.Г. Зареніна. – К.: Вища школа, гол. вид-во, 1987. – 544 с. 3. Сафонов И.В. Надежностное проектирование алгоритмов управления / Дальневосточный научный центр АН СССР, Ин-т автоматики и процессов управления. – Владивосток, 1982. – 157 с. 4. Ушаков И.А. Вероятностные модели надежности информационно-измерительных систем. – К.: Радио и связь, 1991. – 131 с. 5. Бобало Ю.Я., Капустій Б.О., Мандзій Б.А. Функціональна надійність цифрових пристроїв / За ред. проф. Б.А. Мандзія. Навч. посібник. – Львів: Держуніверситет "Львівська

політехніка”, 1997. – 160 с. 6. Волочій Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем: Монографія. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2004. – 220 с. 7. Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. Моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем у задачах дослідження їх відмовостійкості // Відбір і обробка інформації. – Вип. 28 (104). – 2008. – С. 39–47. 8. Abd-El-barr M. Design And Analysis of Reliable And Fault-tolerant Computer Systems, Imperial Collegdge Press, 2006. 9. Walls L. and Alkali B. Advances in Mathematical Modeling for Reliability, IOS Press, 2008.

УДК 004.051:353

В.І. Боженко, В.І. Шклярський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра радіоелектронних приладів та систем

ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ЗАСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ОБ’ЄКТІВ

© Боженко В.І., Шклярський В.І., 2010

Проаналізовано можливість застосування тепловізійних систем для дослідження теплових об’єктів, процес формування тепловізійного зображення, його складові частини та можливі методи поліпшення результатів цього процесу.

Possibility of the thermal systems application for the thermal objects research, the process of the thermal image forming, its component parts and possible methods of this process results improvement, are analysed.

Вступ. Серед сучасних засобів дослідження стану об’єктів одне з чільних місць посідають засоби теплового моніторингу [1, 3, 8–10, 18, 21]. Ці засоби забезпечують візуалізацію теплового стану об’єкта за рахунок перетворення теплового випромінювання на електричний сигнал, який надалі використовується для аналізу стану об’єкта спостереження, що дає змогу розв’язувати задачі дистанційного та безконтактного неруйнівного контролю в недоступному для людського зору інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектра випромінювання.

Мета роботи. Вихідний результат роботи тепловізійних систем (ТС) потребує покращення, оскільки отримані теплові зображення (ТЗ) найчастіше є зашумленими, слабкояскравими, малоконтрастними та не відповідають вимогам користувача. Відповідно постає задача аналізу процесу формування ТЗ у ТС [3, 13, 19], складових частин цього процесу [11–12, 18, 22–23, 27] та можливих методів покращення таких зображень [5, 16–17, 20], які б відповідали вимогам до сучасних засобів дослідження теплових об’єктів.

Основна частина. Принцип роботи ТС ґрунтується на тому, що усі тіла, тверді та рідкі, нагріті до певної температури, випромінюють енергію в ІЧ-спектрі. Довжини хвиль, що випромінює тіло, залежать від температури нагрівання: чим вища температура, тим коротша довжина хвилі та вища інтенсивність випромінювання [3]. Як відомо, ІЧ-діапазон хвиль розташований між видимим і радіохвильовим діапазонами і займає область від 0,74 до 1000 мкм, що відповідає частотному діапазону $3 \cdot 10^{12} \div 1,5 \cdot 10^{15}$ Гц.

Для оцінки якості перетворення ІЧ-випромінювання на електричний сигнал використовують такі показники [9–10, 12–13, 18, 22, 27]: робочий спектральний діапазон, чутливість перетворювача теплового випромінювання на електричний сигнал, модуляційна передавальна функція (МПФ) системи, мінімальна розрізняювана різниця температур (МРРТ), відношення сигналу до шуму (С/Ш), середньоквадратичне значення шуму.