

СТОРОЖ В. Г., кандидат технічних наук, доцент (Національний університет «Львівська політехніка»),
НИКОЛИШИН М. Й., кандидат технічних наук, доцент (Національний університет «Львівська політехніка»),
МАТІЄШИН Ю. М., кандидат технічних наук, доцент (Національний університет «Львівська політехніка»),
МАНЬКОВСЬКИЙ С. В., кандидат технічних наук, старший викладач (Національний університет «Львівська політехніка»)



Використання телевізійних методів у швидкісній діагностиці дефектів залізничних колій

У роботі було проведено детальний аналіз закордонних і вітчизняних інформаційних джерел з питань, що стосуються застосування телевізійних візуально-вимірювальних систем, засобів і методів для швидкісної діагностики дефектів залізничних колій, а також оцінки стану дотичної залізничної інфраструктури. Проведено порівняльний аналіз основних технічних параметрів і характеристик розглянутих систем. Концепція автоматизованих телевізійних візуально-вимірювальних систем заснована на використанні високошвидкісної відеокамери, здатної захоплювати відеозображення рейкового шляху, коли транспортний засіб рухається над ним. Захоплені зображення автоматично аналізуються за допомогою спеціального програмного забезпечення для аналізу зображень. Аналіз програмним забезпеченням заснований на ідентифікації об'єктів або дефектів, виявлених за допомогою математичних методів крос-кореляції та вейвлет-перетворень. Особливу увагу у роботі скеровано на використання технологій машинного зору та нейронних мереж для підвищення автоматизації отримання та опрацювання результатів діагностики дефектів залізничних колій телевізійними методами.

Ключові слова: телевізійні методи; дефектоскопія; залізнична колія

Вступ

На кафедрі радіоелектронних пристроїв та систем Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка» впродовж тривалого часу виконувались науково-дослідні роботи з розробки сучасних сенсорів для магнітодинамічного методу дефектоскопії рейок залізничної колії [1-3], а також зі створення методологічних основ побудови радіоелектронних систем моніторингу об'єктів і сцен та розроблення електродинамічних та статистичних моделей процесів формування зображень системами з високою роздільною здатністю [4-6].

За результатами проведених робіт, зокрема, було створено восьмиканальний пошуковий давач на основі сенсорів Холла та діючий лабораторний макет багатоканальної інформаційно-діагностичної системи (ІДС) для пошуку, аналізу та класифікації дефектів залізничних рейок, розроблено різні методи виявлення сигналів від дефектів у режимі реального часу.

©СТОРОЖ В. Г., НИКОЛИШИН М. Й., МАТІЄШИН Ю. М., МАНЬКОВСЬКИЙ С. В. 2024

Працездатність лабораторного макета та восьмиканального пошукового давача була перевірена в процесі інспекції залізничної колії на магнітодинамічному вагоні-дефектоскопі № 442 структурного підрозділу «Львівський центр діагностики» [1-3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Детальний аналіз сучасного стану розвитку мобільних засобів швидкісного неруйнівного контролю залізничної колії показує, що подальші зусилля з удосконалення їх основних технічних характеристик будуть здійснюватися за наступними напрямками [1, 2, 7]:

1) вдосконалення аналізу результатів дефектоскопії з метою повної автоматизації розпізнавання, оцінки та класифікації дефектів відповідно до чинних стандартів, класифікаторів та каталогів дефектів;

2) розробка нових інформаційних технологій обробки сигналів дефектоскопії, отриманих за допомогою найбільш поширених методів

контролю, з метою виявлення дефектів рейок та дотичної залізничної інфраструктури в режимі реального часу;

3) розробка високопродуктивних методів дефектоскопії для високошвидкісних рейок з використанням комп'ютерних алгоритмів виявлення та класифікації дефектів. Це дозволяє створювати нові апаратні реалізації, які є автономними, мобільними і, де це можливо, можуть бути об'єднаними та адаптованими до існуючих систем управління та зв'язку, що вже працюють на залізничному транспорті;

4) оптимізація та розробка високоефективних первинних перетворювачів, зокрема матричних, для приймання сигналів виявлених дефектів з рейкових пар.

У сфері розвитку систем моніторингу об'єктів та обробки зображень також спостерігаються деякі важливі тенденції [4-6]. Ось декілька основних:

1) підвищення ролі застосування систем штучного інтелекту (ШІ). Технології машинного і глибинного навчання дозволяють системам моніторингу об'єктів та обробки зображень автоматично розпізнавати об'єкти, проводити аналіз зображень і виявляти аномалії та дефекти. ШІ також використовується для покращення точності визначення параметрів та класифікації об'єктів на зображеннях;

2) збільшення загального обсягу даних: завдяки поширенню високоякісних відеокамер, дронів та інших пристроїв для збирання даних, системи моніторингу отримують все більші обсяги вхідних зображень. Це створює потребу в ефективному зберіганні, передаванні та опрацюванні цих даних. Технології опрацювання в реальному часі та великі дані (Big Data) стають все більш важливими для забезпечення швидкого та ефективного опрацювання великих обсягів зображень;

3) розширена реалістичність та аналіз відеозображень: з появою систем моніторингу з високою роздільною здатністю та відеоаналітичних рішень, з'являється можливість проводити детальний аналіз відеоданих. Технології відеоаналізу використовуються для розпізнавання об'єктів, виявлення руху, вирішення задач відстеження та прогнозування подій у розвитку. Велика увага при цьому скерована на розробку алгоритмів, що дозволяють розпізнавати об'єкти в режимі реального часу та працювати зі стрімінговими відеоданими;

4) використання 3D-зображень та обробка просторових даних: для деяких застосувань, наприклад у сфері віртуальної реальності, системи моніторингу об'єктів та опрацювання зображень використовують 3D-зображення та опрацювання просторових даних. Це дозволяє точніше моделювати об'єкти та їхню поведінку в тривимірному просторі (наприклад, тривимірні

зображення пошкоджень і дефектів залізничних колій);

5) забезпечення конфіденційності та безпеки: оскільки системи моніторингу об'єктів та обробки зображень працюють з чутливими даними, важливо забезпечити конфіденційність та безпеку цих даних. Розвиток технологій шифрування, методів анонімізації та захисту персональних даних стає все актуальнішим для захисту інформації, що опрацьовується системами моніторингу.

Ці тенденції вказують на швидкий розвиток систем моніторингу об'єктів та опрацювання зображень, який забезпечує нові можливості, зокрема, у сферах безпеки, медицини, транспорту, виробництва, військової та багатьох інших.

Формулювання цілі статті

Напрацьований науково-дослідними групами кафедри радіоелектронних пристроїв та систем багаторічний досвід аналізу, розробки та впровадження різних методів дефектоскопії залізничних рейок і формування зображень з високою роздільною здатністю у широкому спектральному діапазоні оптичних хвиль, може бути використаний при розробленні нових сучасних телевізійних візуально-вимірювальних систем і методів високошвидкісного дослідження та аналізу стану залізничної колії, а також дотичної залізничної інфраструктури.

Моніторинг стану залізничних колій з використанням наземних транспортних засобів та високошвидкісних відеокамер

За останні кілька років на залізницях впроваджуються різноманітні системи відеоспостереження на основі відеокамер [1, 2, 7]. За функціональним призначенням ці системи можна розділити на чотири основні групи:

- а) системи для візуального контролю елементів колії;
- б) системи для візуального контролю поїзда;
- в) системи для технічного обслуговування та експлуатації;
- г) системи для забезпечення пасажирських перевезень.

Принцип дії автоматизованих телевізійних візуально-вимірювальних систем базується на використанні високошвидкісних відеокамер, які можуть формувати відеозображення колії під час руху транспортного засобу. Отримані зображення автоматично аналізуються спеціальним програмним забезпеченням для аналізу зображень. Програмний аналіз заснований на ідентифікації об'єктів і виявлених дефектів за допомогою методів крос-кореляції та вейвлет-перетворення, а дані класифікуються за допомогою схем керування навчання і теорії нейронних мереж. Розпізнавання об'єктів за допомогою методів навчання на основі образів пов'язане з

обчислювальними проблемами. Для досягнення високої продуктивності в реальному часі, необхідно скоротити загальний час обчислень. За потреби виявити невеликі об'єкти, такі як дефекти на поверхні залізничних рейок, роздільна здатність сформованого відеозображення повинна бути високою, щоб забезпечити надійні дані для аналізу. Зі збільшенням роздільної здатності відеозображення збільшується кількість даних, які необхідно отримати, а також час обчислень, необхідний для аналізу. Як наслідок, швидкість інспекції необхідно скоригувати відповідно до швидкості опрацювання та аналізу даних [7].

Автоматизовані телевізійні візуально-вимірювальні системи можуть використовуватися для моніторингу та вимірювання геометрії головки рейки і відсотку її зносу, розривів колії, зміщення шпал, відсутності баласту (мінерального сипучого матеріалу між шпалою і поверхнею землі), стану опорних плит, відсутності кріпильних болтів і наявності пошкоджень поверхні тощо. Швидкість цих систем варіюється від 60 км/год до 320 км/год залежно від характеру перевірки та необхідної роздільної здатності отримуваних відеозображень. Наприклад, інспекція при виявленні зовнішніх деформацій залізничних рейок займає набагато менше часу, ніж інспекція при виявленні тріщин від прокатної контактної втоми (ПКВ). Однак, автоматизовані телевізійні візуально-вимірювальні системи поки не можуть бути використані для повної заміни інших, більш традиційних та поширених методів контролю, оскільки ці системи не дають повної інформації про наявність та стан внутрішніх дефектів [7].

Серед поширених у світі автоматизованих телевізійних візуально-вимірювальних залізничних систем залежно від використаного типу наземного транспортного засобу можна виокремити такі:

- системи з використанням рухомого складу потягів різних типів;
- системи з використанням автотрис;
- системи з використанням автомобільних транспортних засобів різних типів.

Прикладом систем першого типу є транспортний засіб «IRIS 320», який використовує французька компанія Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF). Він оснащений високошвидкісними відеокамерами, за допомогою яких проводять інспекцію з метою виявлення дефектів поверхні швидкісних залізничних колій на швидкості до 320 км/год (рис. 1). Звичайні залізничні колії перевіряються на швидкості близько 160 км/год. Проводиться також візуальний аналіз геометричних параметрів колії: поздовжній рівень, поперечний рівень, викривлення тощо. Ці параметри вимірюються і контролюються через кожні 25 см довжини колії на швидкостях від 10 км/год до 320 км/год. Максимальна частота

оновлення зображення відеокамери складає 400 Гц (для швидкості руху транспортного засобу 320 км/год).

Подібні системи також розроблені та використовуються в Німеччині (Bildverarbeitungssysteme GmbH) та Італії (MERMES) [7]. Особливістю цих систем є те, що вони здатні виконувати регулярний автоматизований візуальний огляд залізничних колій з точним і раннім виявленням дефектів, відсутності кріплень, шпал чи баласту, порушень геометрії із високою швидкістю обробки.

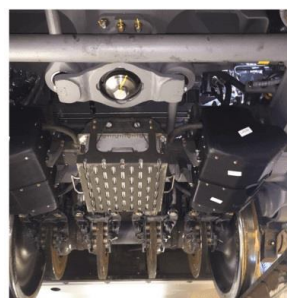


Рис. 1. Високошвидкісний потяг IRIS 320 та його автоматизована телевізійна візуально-вимірювальна система [7]

Для візуального контролю рейкових пар використовуються два різних набори відеокамер, розташованих над рейкою і збоку від неї (рис. 2). Відеокамери над рейкою формують зображення рейки паралельно поздовжній осі залізничної колії. Отримані зображення використовують для вимірювання відстані між кріпленням та основою рейки, перевірки електронного шаблону кріплення, вимірювання відстані між точкою з'єднання та рейкою, а також для виявлення зносу та тріщин рейок. Бічна відеокамера знімає зображення перпендикулярно до поздовжньої осі рейки, тобто в поперечному напрямку. З цього кута добре видно основу рейки і систему кріплення, а зображення допомагає виміряти відстань між анкерами і краями з'єднань для перевірки створеного електронного шаблону. Крім того, цей ракурс також використовується для виявлення місць відсутності болтів чи костилів, зношених або пошкоджених стрілочних переводів (рис. 3).

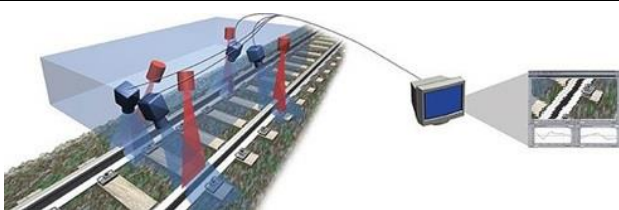


Рис. 2. Огляд залізничної колії з використанням автоматизованої візуально-виміральної системи [7]

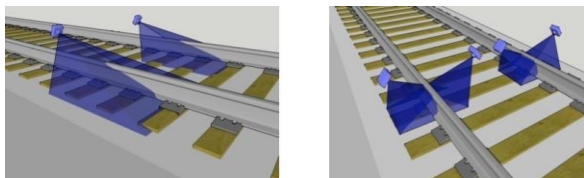


Рис. 3. Розташування камер візуального огляду залізничної колії: а) над колією (зліва); б) збоку від колії (справа) [7]

Більш універсальними та автономними мобільними залізничними засобами, що уніфіковані для виконання робіт з технічного контролю та діагностики залізничної інфраструктури, є автомотриси. При їх розробці та проектуванні застосовуються різні інноваційні технології, що суттєво підвищує ефективність використання спеціального рухомого складу та знижує енергозатрати. Автомотриси можуть працювати на швидкостях до 130 км/год та при суттєвих нахилах рейкового шляху, які, наприклад, є характерними для західних регіонів України.

Автоматизовані телевізійні візуально-вимірвальні системи на базі автомотрис для аналізу отриманих відеокамерами зображень на предмет наявності дефектів рейкової поверхні, стану шпал та стану рейкового полотна активно використовуються за кордоном. Це, наприклад, автоматизоване обладнання, яке встановлюється на автомотрисах відомої американської залізничної транспортної компанії SPERRY (рис. 4) [8].

Стабільний, повторюваний і послідовний контроль стану великих ділянок залізничної колії на достатньо високих швидкостях повинен водночас бути надійним, безпечним та комфортним, що дозволяє контролювати стан окремих елементів залізничних рейок і шпал. Для цього часто використовують автомобільні транспортні засоби, обладнані відповідними спеціальними системами технічного зору. Такі системи можуть оглядати до 70 000 шпал протягом однієї години руху зі швидкістю 50 км/год, а за день – кілька сотень кілометрів колії.



Рис. 4. Автомотриса SRS 141 виробництва SPERRY та автоматизована телевізійна візуально-вимірвальна система [8]

Прикладом такого автомобільного транспортного засобу для автоматизованого візуального контролю залізничної колії є пікап виробництва компанії Nagle Research (Остін, Техас), оснащений високошвидкісною 3D-відеосистемою Sick Ranger, який пересувається залізничними коліями зі швидкістю 50 км/год та формує відеозображення колії по всій ширині шпал (2,7 м), зокрема і за межами рейкової ділянки шляху, з роздільною здатністю 1 мм по кожній осі спостереження. Проводиться також точна перевірка наявності та стану дерев'яних і бетонних шпал, костилів, анкерів і з'єднувальних пластин, а також дослідження геометричних характеристик шпал та ширини колії (віддалі між рейками) і визначення рівня зношення опорної поверхні рейок (рис. 5). Міжнародна офіційна назва цієї системи відеоконтролю колії – Aurora Georgetown Rail [9].



Рис. 5. Транспортний засіб для візуального огляду Aurora [9]

Nagle Research також розробила для користувачів аналітичний програмний пакет, який може опрацювати гігабайти даних і створювати детальні звіти зі значеннями для більше, ніж десять різних параметрів шпал (рис. 6). Пакет дозволяє користувачам отримувати 3D-зображення будь-якої шпали, якщо є якісь сумніви щодо її стану. Повні звіти є доступними вже протягом 48 годин після обстеження і надають детальну інформацію про опору, викривлення, напрямок і положення шпали за допомогою системи глобального позиціонування GPS, стан окремих рейкових стиків і точок кріплення шпал, стан зносу рейкової основи окремих шпал або груп шпал, нахил рейки, відстань між шпалами, стан шару під рейкою та стан покриття кочетів [9].

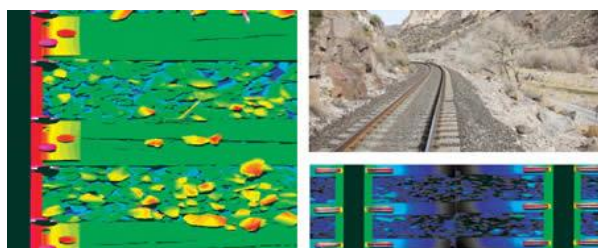


Рис. 6. Візуалізація результатів дослідження залізничної колії [9]

Моніторинг залізничної колії з використанням безпілотних літальних апаратів та високошвидкісних відеокамер

За останні кілька років великі залізничні компанії почали впроваджувати інноваційні рішення на основі безпілотних технологій для моніторингу та діагностики залізничної

інфраструктури, боротьби з крадіжками та вандалізмом, забезпечення охорони, безпеки та вирішення різних проблем, пов'язаних із залізницею. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), оснащені високошвидкісними відеокамерами, збирають інформацію та, базуючись на результатах подальшого аналізу, можуть бути використані для підвищення безпеки та захисту і зменшення операційних витрат найбільших світових залізничних компаній більш ніж на 20 % [10-12].

Наймасштабніші програми впровадження та використання БПЛА на залізниці реалізовані: в компанії Deutsche Bahn (Німеччина) у 2013 році для боротьби з вандалізмом у приміському залізничному сполученні за допомогою БПЛА, що оснащені відеокамерами; в компанії PKP Cargo (Польща) у 2014 році для зниження кількості крадіжок вантажів та елементів інфраструктури на залізниці; в компанії Network Rail (Великобританія) для перевірки стану колії та підтримуючих конструкцій внаслідок впливу ерозії та руйнувань після підтоплень і паводків поблизу річок та на узбережжі Ла-Манша; в компанії SNFC (Франція), яка починаючи з 2015 року робить ставку на використання БПЛА для огляду та обслуговування залізничної інфраструктури, підвищення безпеки та надійності залізничних мереж, зокрема у гірській місцевості, екологічної безпеки, створення карт розташування небажаної рослинності земляного полотна залізничної колії; в компанії BNSF Railway (США) починаючи з 2015 року впроваджений моніторинг за допомогою БПЛА понад 32,5 тисяч миль залізничної колії для оцінки стану безпеки інфраструктури, зокрема і наземних частин залізничних мостів (прольотів, опор, тросового навісу) [10-12].

Можливі шляхи використання БПЛА в залізничній галузі України це:

- 1) зменшення фінансових та матеріальних витрат через крадіжки елементів залізничної інфраструктури, майна та вантажів;
- 2) розслідування обставин аварій залізничного транспорту;
- 3) моніторинг об'єктів залізничної інфраструктури з метою запобігання пошкодженням та втраті елементів колії і засобів сигналізації та зв'язку [10-12].

БПЛА важко почути у повітрі, вони є практично безшумними та не заважають мешканцям ближніх населених пунктів та довкіллю, їх також важко виявити через невеликі розміри (рис. 7). Вони можуть бути також оснащені високоякісними тепловізійними відеокамерами для роботи вночі та за несприятливих погодних умов, що дозволяє виявляти підозрілі об'єкти в будь-який час доби та

за будь-яких кліматичних умов на відстані понад один кілометр.



Рис. 7. Огляд залізничної колії за допомогою БПЛА [10-12]

БПЛА також все частіше використовують для розслідування залізничних аварій та інцидентів, коли близькість дерев і повітряних проводів обмежує використання інших повітряних транспортних засобів (наприклад, гелікоптерів) для отримання відеозображень з місця події.

Отже, використання БПЛА для збору важливих даних в небезпечних для життя людей умовах (гірська місцевість, осередок вогню, підтоплена місцевість, забруднена небезпечними хімічними речовинами місцевість тощо) значно знижує ризик при залученні працівників до розслідування причин аварій. Окрім того, це дешевше, ніж залучати гелікоптер та суттєво дешевше, ніж використання наземних бригад.

БПЛА, оснащені високошвидкісними відеокамерами, можуть здійснювати дистанційну інспекцію залізничних ліній, що рідко використовуються або простоюють, та запобігати крадіжкам елементів колії, а також діагностувати дефекти та пошкодження конструктивних елементів залізничних мостів і тунелів (в Україні є їх велика кількість). Окрім того, моніторинг за допомогою БПЛА не створює додаткових перешкод для руху поїздів та інших залізничних транспортних засобів, оскільки він не потребує вільної колії для збору даних, як інші засоби виявлення дефектів. Отже, моніторинг за допомогою БПЛА є значно ефективнішим та більш економічно вигідним.

Метод обстеження та аналізу стану залізничної колії за допомогою БПЛА є гнучким, оскільки дозволяє проводити відеореєстрацію на різних висотах і в умовах складного рельєфу, де інші методи обстеження не можуть бути використані (рис. 8). Таким чином, аерофотозйомка з БПЛА надає більше корисної інформації для аналізу.



Рис. 8. Розташування БПЛА над залізничною колією при аерофотозйомці [10-12]

Дані, отримані з БПЛА, проходять різні етапи попереднього та подальшого опрацювання. Основними етапами опрацювання є:

- 1) розрахунок відстані до наземних об'єктів;
- 2) виокремлення окремих кадрів з відеозапису;
- 3) гаусове згладжування для видалення шуму зображення;
- 4) виокремлення потрібних ділянок зображення кольором у кольоровому просторі HSV;
- 5) перетворення зображення з кольорового простору RGB у відтінки сірого;
- 6) виявлення границь і контурів ділянок колії при вимірюваннях геометричних параметрів колії за різних погодних умов і на різних висотах відеозйомки.

До недоліків моніторингу за допомогою БПЛА можна віднести обмежений час польоту через постійну необхідність додаткової підзарядки акумуляторів та обмежену кількість досвідчених операторів, які можуть керувати БПЛА.

Наразі безпілотні технології в Україні розвиваються дуже швидкими темпами. З часом БПЛА будуть ще ефективнішими у сфері безпеки, боротьбі з вандалізмом, обслуговуванні залізничної інфраструктури та діагностики її стану.

Залізничні системи моніторингу колій з використанням технологій машинного зору та нейронних мереж

Зараз у всьому світі спостерігається великий інтерес до систем машинного зору та пов'язаних із ними технологій. Основна перевага цих систем

полягає в тому, що вони можуть вирішувати багато рутинних завдань і автоматизувати ручну роботу [13-16].

Машинний зір – це сукупність інженерних методів, які дозволяють комп'ютерному обладнанню “бачити” за допомогою відеокамер. Сьогодні машинний зір є невід'ємною складовою багатьох автоматизованих процесів і використовується для контролю якості різної продукції та підвищення продуктивності багатьох виробничих процесів.

Одним із провідних світових виробників обладнання для машинного зору та промислової ідентифікації є американська компанія Cognex (рис. 9). Широкий асортимент продукції Cognex використовують провідні світові виробники та постачальники обладнання для систем машинного зору:

- 1) автономні системи машинного зору;
- 2) відеосенсори;
- 3) тривимірні системи машинного зору з декількома відеокамерами [13].



Рис. 9. Пристрої машинного зору Cognex [13]

Застосування машинного зору у транспортній сфері є дуже різноманітним: ідентифікація номерних знаків транспортних засобів; підрахунок кількості людей у транспортному засобі тощо. Відомі зарубіжні компанії, такі як Siemens, Rio Tinto і General Electric, беруть активну участь у впровадженні та розвитку систем машинного зору на залізничному транспорті. Ці компанії пропонують системи, що дозволяють здійснювати автоматичний візуальний контроль стану залізничної колії, моніторинг технічного стану залізничних систем в режимі реального часу та автоматизацію руху автономних локомотивів. Машинний зір також має велике значення для підвищення безпеки руху шляхом вдосконалення існуючих систем автоматичної локомотивної сигналізації. Оснащення тягових локомотивів технологією машинного зору дозволить їм “бачити” колійні сигнали, а методи візуального аналізу, засновані на технології нейронних мереж, зможуть визначати показання сигналів.

Основне завдання систем машинного зору – аналіз зображень і відеопотоків. У роботі систем машинного зору можна виокремити три основні операції:

- 1) отримання (захоплення) зображень;
- 2) опрацювання та аналіз зображень;
- 3) передача всіх результатів опрацювання в систему управління технологічним процесом.

Набір завдань, що вирішуються системами машинного зору, можна розділити на чотири групи (рис. 10):

1) *розпізнавання положення* – визначення просторового положення об'єкта за зовнішньою системою координат або за внутрішньою системою координат, пов'язаною зі статичним об'єктом (початок координат знаходиться всередині об'єкта), і передача інформації про положення об'єкта і його просторову орієнтацію в систему управління та зберігання даних;

2) *вимірювання* – відеокамера вимірює різні фізичні параметри об'єкта (лінійний розмір, діаметр, кривизна, площа, висота, кількість тощо);

3) *інспекція* – підтвердження або спростування певних характеристик об'єкта (наприклад, наявність дефектів на його поверхні чи всередині);

4) *ідентифікація* – зчитування різних кодів (наприклад, штрих-кодів, 2D-кодів, тощо) за допомогою відеокамери та їх розпізнавання або визначення різних буквено-цифрових позначень. Крім того, до завдань цієї групи відносяться безпекові: ідентифікація осіб, техніки та обладнання, визначення руху тощо.



Рис. 10. Завдання, які розв'язуються системами машинного зору [14-16]

У системах машинного зору при вирішенні вищевказаних завдань, використовуються такі методи опрацювання зображень [13-16]:

- *лічильник пікселів*: підраховується кількість світлих і темних пікселів зображення;

- *виокремлення зв'язних областей*: зв'язні області зображення є, з одного боку, типом об'єкта, дуже тісно пов'язаного з растровим зображенням, і, в той же час, самостійною одиницею, що дозволяє проводити геометричний, логічний, топологічний та будь-який інший аналіз зображення;

- *бінаризація*: перетворює зображення у відтінках сірого у бінарне (містить лише білі та чорні пікселі);

- *гістограмування*: характеризує частоту пікселів однакової яскравості на зображенні;

- *сегментація*: використовується для пошуку та підрахунку деталей на зображенні шляхом його поділу на різні за певною ознакою області. Вважається, що область відповідає реальному об'єкту або його частині, а межі області відповідають межах об'єкта;

- *зчитування штрих-коду*: декодування одномірних або двомірних кодів, призначених для автоматичного зчитування або сканування;

- *оптичне розпізнавання символів*: автоматичне зчитування тексту, наприклад, транспортних серійних номерів;

- *вимірювання розміру об'єкта* в дюймах або міліметрах;

- *зіставлення шаблонів*: пошук, зіставлення та підрахунок певних шаблонів;

- *інваріантні алгоритми виявлення та співставлення особливостей точок* на зображенні;

- *методи ідентифікації особи* за райдужною оболонкою ока або відбитками пальців;

- *різні методи відновлення форми об'єкта* за зображенням.

У багатьох випадках системи машинного зору комбінують ці методи обробки у певній послідовності, щоб виконати повну перевірку чи низку завдань.

Типова залізнична система машинного зору повинна складатися з однієї чи декількох цифрових або аналогових відеокамер (чорно-білих або кольорових) з відповідною оптикою для отримання відеозображення, системи освітлення об'єкта або цілі (рис. 11) та додаткових пристроїв введення/виведення або каналів зв'язку для генерації і передачі отриманих результатів (не зображені на рисунку). Для формування, опрацювання та аналізу отриманих відеозображень використовується спеціалізоване програмне забезпечення [13-16].

Матриця фоточутливих елементів у сучасних відеокамерах призначена для створення цифрового відеозображення. До її складу входять аналого-цифрові перетворювачі, які перетворюють величину інтенсивності світлового потоку від кожного елемента матриці у цифрове значення (CCD, CMOS). За способом просторової візуалізації зображення, отриманого камерою, розрізняють такі типи камер: однорядкові камери (1D); двовимірні монохромні чи кольорові для формування кадру зображення (2D); для формування тривимірного зображення об'єкта або цілі (3D).

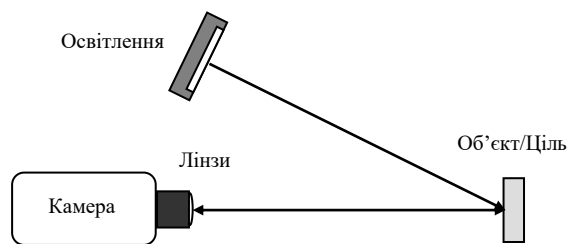


Рис. 11. Типова структура залізничної системи машинного зору [14-16]

Об'єктив забезпечує фокусування відеокамери на певній відстані і отримання чіткого зображення контрольованого об'єкта. Якщо контрольований об'єкт розташований за межами фокусної відстані, зображення буде розмитим (нечітким), а можливість його опрацювання погіршиться.

Освітлення – ще одна важлива частина системи машинного зору. Використання різних методів освітлення дозволяє системам машинного зору значно розширити спектр виконуваних ними завдань. Існуючий рівень розвитку світлодіодних технологій гарантує тривалий термін служби і низьке енергоспоживання системи машинного зору при високій яскравості освітлення.

Зображення, сформовані відеокамерою чи відеокамерами, надсилаються на пристрій захоплення кадрів або в пам'ять комп'ютера. Пристрій захоплення кадрів – це пристрій, який перетворює вихідний сигнал з відеокамери в цифровий формат (зазвичай, двовимірний масив чисел), що дозволяє зберігати зображення в пам'яті комп'ютера і опрацьовувати їх за допомогою спеціального програмного забезпечення для машинного зору.

Зазвичай, програмне забезпечення виконує кілька етапів обробки зображень. У багатьох випадках зображення спочатку опрацьовується для видалення або зменшення шуму чи перетворення його відтінків сірого на просту комбінацію чорного та білого (бінаризація). Після первинного опрацювання програмне забезпечення обчислює, вимірює та ідентифікує об'єкти, розміри, дефекти та інші характеристики на зображенні. На завершальному етапі програма робить остаточний висновок про наявність або відсутність дефектів у досліджуваному об'єкті і надсилає оператору попереджувальний сигнал. Більшість залізничних систем машинного зору базуються на використанні чорно-білих відеокамер, але використання кольорових відеокамер також набуває поширення. Крім того, системи машинного зору все частіше застосовують цифрові відеокамери прямого підімкнення без пристрою захоплення кадрів, що знижує витрати і спрощує систему.

Прикладами реальних працюючих систем машинного зору на залізниці є низка дослідницьких проєктів, реалізованих

Університетом штату Іллінойс в Урбана-Шампейн (UIUC) у співпраці з Асоціацією американських залізниць (AAR), компанією BNSF Railway, центром NEXTRANS та науково-дослідною радою з питань транспорту (TRB) у рамках програми розвитку високошвидкісних залізниць IDEA [17].

Використання технологій нейронних мереж у дефектоскопії залізничних колій є актуальним напрямком досліджень та розробок [18, 19]. Нейронні мережі можна використати для автоматичного візуального виявлення та відеоаналізу серій зображень дефектів на залізничних рейках, що дозволяє забезпечити швидше та точніше виявлення проблемних ділянок (рис. 12).



Рис. 12. Автоматизований відеоаналіз отриманих серій зображень залізничної колії та рухомого складу вагона [17]

Основним завданням дефектоскопії залізничних колій є виявлення тріщин, пошкоджень, зламів, зношеності та відсутності окремих елементів колій, що може суттєво вплинути на безпеку руху поїздів. Найбільш поширені методи дефектоскопії, такі як магнітний контроль, ультразвуковий контроль, звичайний візуально-оптичний контроль та інші, є дуже витратними з точки зору часу та праці операторів, а також суб'єктивними залежно від досвіду оператора. Застосування нейронних мереж дозволить забезпечити автоматизацію процесу виявлення дефектів і покращити його ефективність. Нейронні мережі можуть бути навчені розпізнавати шаблони дефектів на основі великої кількості вхідних даних, таких як зображення та відповідні сигнали, зібрані з різних давачів. Процес навчання повинен містити такі кроки:

1) збір навчального набору даних, для чого необхідно зібрати велику кількість зображень рейок, які містять різні типи дефектів і бездефектні ділянки. Ці зображення слід анутовати, тобто вказати точне місце розташування та тип кожного дефекту на зображенні;

2) попереднє опрацювання даних, при якому всі зображення можуть бути піддані попередньому опрацюванню, такому як зменшення розміру, нормалізація кольорів, фільтрація шуму тощо, щоб покращити якість вхідних даних для нейронної мережі;

3) вибір необхідної архітектури нейронної мережі, яка буде ефективно працювати з візуальними даними. Наприклад, можливе

використання згорткової нейронної мережі (Convolutional Neural Network – CNN), яка добре зарекомендувала себе у завданнях опрацювання зображень [18, 19];

4) навчання моделі нейронної мережі за допомогою навчального набору даних. Це включає передавання вхідних зображень через цю мережу, обчислення вихідних значень та порівняння їх з правильними результатами. При цьому застосовуються різні алгоритми оптимізації, такі як зворотне поширення помилки (Backpropagation), для оновлення вагових коефіцієнтів моделі;

5) валідація та тестування моделі після навчання перевіряє її ефективність за допомогою валідаційного набору даних. Потім можна протестувати модель на нових невикористаних раніше зображеннях рейок, щоб оцінити її загальну точність та продуктивність.

Після навчання відповідна нейронна мережа може бути використана для аналізу нових зображень або сигналів і автоматичного виявлення дефектів. Такий підхід може значно полегшити та пришвидшити процес візуальної діагностики дефектів залізничних колій, зокрема і телевізійними методами, забезпечуючи більш об'єктивний та ефективний аналіз даних. При цьому нейронну мережу можна програмно інтегрувати з дефектоскопічними пристроями або можна використовувати окремо для опрацювання зібраних раніше даних. Це дозволить забезпечити швидку та об'єктивну комплексну оцінку стану залізничних колій.

Основні переваги використання нейронних мереж у телевізійній дефектоскопії залізничних колій:

1) автоматизація процесу виявлення дефектів, що зменшує залежність від оператора та сприяє забезпеченню стабільно високої якості оцінки дефектів;

2) висока швидкість опрацювання даних, що дозволяє здійснювати аналіз стану залізничних колій навіть у реальному часі;

3) покращена точність виявлення дефектів завдяки використанню глибоких нейронних мереж, які можуть виявляти складні шаблони та аномалії;

4) можливість інтеграції з іншими системами моніторингу та управління залізницею, що сприяє підвищенню рівня безпеки руху та оптимізації планування обслуговування залізничних колій.

Хоча використання нейронних мереж у телевізійній дефектоскопії залізничних колій має багато переваг, воно потребує належного навчання та валідації моделей, а також інтеграції з існуючими системами та процедурами дефектоскопії. Проте з розвитком технологій машинного навчання та зростання доступності даних, цей напрямок має великий потенціал для

підвищення ефективності та безпеки залізничного транспорту.

Висновки

Підвищення попиту на ефективний високошвидкісний моніторинг залізничної інфраструктури змусило розробників вдосконалювати відомі системи діагностики та розробляти принципово нові, до яких, зокрема, відносяться телевізійні системи моніторингу на основі комп'ютерного та машинного зору з використанням нейронних мереж. Роздільна здатність сучасних телевізійних систем дозволяє отримати не тільки панорамне зображення усєї досліджуваної ділянки залізничної колії, але й деталізоване зображення окремих її структурних елементів (анкери, костилі, стяжні пластини, стрілкові переводи, рейкові стики тощо), що забезпечує їх розрізнення та ідентифікацію.

Можливість збору, збереження, упорядкування та архівування великих обсягів візуальних даних, їх довільного зчитування з пам'яті у будь-який момент часу для подальшого комп'ютерного опрацювання та аналізу зображень, зокрема з отриманням кількісної оцінки, дозволяє визначати не тільки наявні дефекти, але й тенденції зміни стану залізничної колії та її інфраструктури у часі, на відміну від традиційних методів дефектоскопії.

Список використаних джерел

1. Нічога В. Результати розроблення та дослідження інформаційно-діагностичної системи для магнітодинамічної дефектоскопії рейок / Віталій Нічога, Володимир Сторож, Юрій Матієшин // Вісник НУ "Львівська політехніка" – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2019. – № 914. – С. 65-74.
2. [Vitalij Nichoha](#), [Volodymyr Storozh](#) and [Yurij Matiieshyn](#). "Results of the development and research of information-diagnostic system for the magnetic flux leakage defectoscopy of rails", 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2020), Proceedings of the International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, February 2020, pp. 852-857, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235557.
3. [Vitalij Nichoha](#), [Volodymyr Storozh](#) and [Yurij Matiieshyn](#). "Results of research of the eight-channel sensor for the defectoscopy of railway rails", Proceedings of SPIE 11442, Radioelectronic Systems Conference 2019, 114421A (11 February 2020); URL: <https://doi.org/10.1117/12.2565748> (09.07.2024).
4. Y. Matiieshyn, V. Minziuk, and S. Mankovskyy. "Algorithmic support of the television scanning optical microscope in the study of microobjects", 2019 IEEE IVth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 9-13 September 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165398.
5. I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko and S. Fabirovskyy. "Sub-pixel Based Forming of High-Resolution Images", *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 7, 2015, pp. 45-48, doi: 10.15199/48.2015.07.15.
6. A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko and S. Fabirovskyy. "Methods of multispectral image fusion at the pixel level", 2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2018), Proceedings of the International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, February 2018, pp. 102-107, doi: 10.1109/TCSET.2018.8336165.
7. INNOTRACK (Innovative Track Systems) D4.4.1 – Rail Inspection Technologies [Text], Integrated Project no. TIP5-CT-2006-031415, University of Birmingham (Great Britain), 2008, 42 p.
8. Sperry Rail Inc., 2023. SPERRY [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sperryrail.com/> (09.07.2024).
9. Simmons-Boardman Publishing Inc., 2023. Railway Age [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.railwayage.com/cs/aurora-the-next-generation/> (09.07.2024).
10. F. Flammini, C. Pragliola and G. Smarra. "Railway infrastructure monitoring by drones", International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC'2016), Proceedings of the International Conference, Toulouse, France, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841398.
11. O.I. Chumachenko, A.V. Gilevoy. "Image processing in UAV", 2013 IEEE 2nd International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments (APUAVD'2013), Proceedings of the International Conference, Kiev, Ukraine, 2013, pp. 75-76. doi: 10.1109/APUAVD.2013.6705287.
12. A.K. Singh, A. Swarup, A. Agarwal, D. Singh. "Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery", *ICT Express*, 2019, vol. 5, issue 4, pp. 250-255.
13. COGNEX, 2023. Products [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.cognex.com/ru/ru/products> (09.07.2024).

14. Минаков В.А. Технология машинного зрения на локомотивах для идентификации путевых сигналов / В.А. Минаков, В.К. Фоменко // Мир транспорта. – 2019. – т. 17. – № 6. – С. 62-72.
15. Хабр, 2018. Машинное зрение [Электронный ресурс] – URL: <https://habr.com/ru/articles/350918/> (09.07.2024).
16. Лысенко О. Машинное зрение от SICK/IVP // Компоненты и технологии. – 2007. – № 1.
17. Machine Vision Inspection of Railroad Track // USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report (NEXTRANS Project No. 0281Y02). – University of Illinois at Urbana Champaign and Purdue University, January 10, 2011.
18. Saturn Cloud, 2023. A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks – the ELI5 way [Электронный ресурс]. – URL: <https://saturncloud.io/blog/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way/> (09.07.2024).
19. Коц И.Н., Лысенко И.Е., Полякова В.В., Ковалев А.В. Методы диагностики инженерных объектов на основе нейросетей // ИВД. 2020, №8 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-diagnosticski-inzhenernyh-obektov-na-osnove-neyrosetey> (09.07.2024).

Storozh Volodymyr, Nykolyshyn Myron, Matiieshyn Yuriy, Mankovskyy Spartak. Use of Television Methods in Rapid Diagnostics of Defects of the Railway Tracks

Abstract. The work carried out a detailed analysis of foreign and domestic information sources on issues related to the use of television visually measuring systems, means and methods for rapid diagnosis of railway tracks defects, as well as assessment of the state of the relevant railway infrastructure. A comparative analysis of the main technical parameters and characteristics of considered systems was carried out. The concept of automated television visually measuring systems is based on the use of a high-speed video camera capable of capturing video images of the rail track as the vehicle moves over it. Captured images are then automatically analysed using dedicated image analysis software. The software analysis is based on the identification of objects or defects detected using cross-correlation and wavelet transform mathematical methods. Special attention is paid to the use of machine vision technologies and neural networks to increase the automation of obtaining and processing the results of diagnostics of railway tracks defects by television methods. Neural networks can be used for automatic visual detection and video analysis of series of images of defects on railway tracks, allowing for faster and more accurate detection of problem areas. Training a neural network

model using a training dataset involves feeding input images through the network, calculating output values, and comparing them to the correct results. Various optimization algorithms, such as backpropagation, are used to update the model's weights. Validation and testing of the model after training checks its performance using a validation dataset. The model can then be tested on new, previously unused rail images to assess its overall accuracy and performance. After training, the corresponding neural network can be used to analyse new images or signals and automatically detect defects.

Keywords: Television Methods; Defectoscopy; Railway Track.

Сторож Володимир Георгійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: volodymyr.h.storozh@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4776-2729>.

Николишин Мирон Йосипович, кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: myron.y.nykolyshyn@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3526-6728>.

Матиєшин Юрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: yurii.m.matiieshyn@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8498-3398>.

Маньковський Спартак Вікторович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: spartak.v.mankovskiy@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5217-6290>.

Storozh Volodymyr Georgiyovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: volodymyr.h.storozh@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4776-2729>.

Nykolyshyn Myron Yosypovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems,

Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: myron.y.nykolyshyn@lpnu.ua.

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3526-6728>.

***Matiieshyn Yuriy Mykolayovych**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail:*

yurii.m.matiieshyn@lpnu.ua.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8498-3398>.

***Mankovskyi Spartak Viktorovych**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail:*

spartak.v.mankovskyi@lpnu.ua.

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5217-6290>.