

О.В. Гордійченко, аспірант
А.Г. Ткачук, к.т.н., доц.
О.О. Добржанський, к.т.н., доц.
Ю.В. Богоявленська, к.е.н., доц.
М.В. Богдановський, ст. викладач

Державний університет «Житомирська політехніка»

Роботизований комплекс для виготовлення взуттєвої устілки

У статті розглянуто нову розроблену систему машинного зору для поліпшення технологічних показників роботизованого комплексу поклейки взуттєвої устілки та її інтеграцію в існуючий роботизований технологічний комплекс (РТК). Приведено опис розробленої системи, існуючого технологічного процесу, виконаних поліпшень, оцінку впливу на продуктивність протягом використання. Реалізація у вигляді зовнішнього модуля дає низку переваг, а саме можливість швидкого переобладнання вже існуючих РТК, простоту в використанні і подальшому обслуговуванні, можливість подальшого масштабування. Комплекс системи машинного зору складається з декількох частин таких як: компактна шафа з одноплатним комп'ютером Raspberry PI (RPI) та блоком узгодження рівнів (у тестовій збірці блок реле), виносна usb-камера. Існуючий РТК було виконано на базі промислового робота Kawasaki FS006, проте інтерфейс реалізовано таким чином, що система може бути приєднана до обладнання і інших виробників, оскільки в поточній реалізації навіть не було потреби в модифікації програмної складової промислового робота. Система машинного зору взяла на себе роль зв'язуючої ланки між вже існуючими компонентами системи.

Ключові слова: *робототехніка; машинний зір; роботизований комплекс; РТК; робот Kawasaki; Raspberry PI; модернізація РТК; автоматизація виробництва; промислове обладнання.*

Актуальність теми. Підвищення продуктивності виробництва взуттєвої устілки як етапу складного та комплексного технологічного процесу виготовлення взуття набуває важливості в сучасних умовах ринкової конкуренції та зростаючих вимог до якості готової продукції. Система машинного зору працює незважаючи на параметри матеріалу, розміри та геометрію устілки, дозволяючи роботизованому комплексу досягати оптимальних результатів. Це сприяє не лише підвищенню швидкості та ефективності виробництва, а й забезпечує стабільну якість готової продукції, зменшення кількості нетехнологічних рухів робота при переналадженні.

Крім того, інтеграція системи машинного зору у роботизований комплекс може покращити процес планування виробництва шляхом збору та аналізу даних про продукцію в реальному часі. Це дозволяє оперативно відстежувати прогрес виконання виробничого завдання. Також дає можливість оперативно реагувати на простой чи сповільнення роботи устаткування, що в свою чергу підвищує загальну ефективність виробництва і дає змогу пришвидшити виявлення проблем, а отже виправити їх у роботі устаткування.

В умовах швидкого зростання конкуренції виробничі підприємства мають швидко та ефективно приймати бізнес-рішення для утримання власних позицій на ринку. Deep Tech дозволяє, за ефективного менеджменту, забезпечити динаміку інноваційної екосистеми, сприяти досягненню цілей, визначених Європейським Парламентом, програмами та проєктами. Оптиміальне використання актуальних технологій дозволить розвивати локальні та глобальні економіки, підсилити спроможність суб'єктів господарювання.

З огляду на викладене вище, інтеграція системи машинного зору з роботизованим комплексом є актуальною темою, оскільки вона відповідає потребам сучасного виробництва, підвищує продуктивність, конкурентоспроможності при помірних затратах на реалізацію.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Системи машинного зору є важливою частиною сучасних виробничих процесів, забезпечуючи підвищення якості та ефективності процесів виготовлення продукції. Нижче наведено детальний опис чотирьох статей, які підкреслюють важливість та різноманітність застосування машинного зору в різних галузях промисловості.

Робота [1] детально описує процес розробки та впровадження системи машинного зору для контролю якості у виробництві захисних масок для обличчя. Автори розробили систему, яка використовує глибоке навчання для виявлення аномалій у процесі виробництва. Система була протестована на реальному виробництві та показала високу ефективність у виявленні дефектів, що дозволило знизити відсоток браку та підвищити продуктивність.

У статті [2] пропонується систематичний підхід до інспекції на машині на основі машинного зору для поліпшення процесу контролю геометричних параметрів деталей, оброблених на ЧПУ. Автори описують, як їх метод дозволяє автоматизувати процес перевірки, зменшуючи кількість помилок та підвищуючи точність вимірювань. Дослідження показало, що використання машинного зору для інспекції на місці може значно скоротити час і витрати на контроль якості, а також підвищити продуктивність за рахунок зменшення простоїв обладнання.

Робота [3] аналізує, як китайські компанії використовують технології машинного зору. Автори виявили чотири основні візуальні реєстри, які використовуються для артикуляції машинного зору. Ці реєстри відображають різні аспекти сприйняття та впровадження технологій машинного зору в промислових процесах, враховуючи їх здатність підвищувати ефективність і точність виробництва. Дослідження показує, як різні культурні та економічні контексти можуть впливати на розвиток і впровадження інноваційних технологій.

Стаття [4] розглядає сучасні методи машинного зору, які можуть виконувати 3D-вимірювання форми з високою точністю та роздільною здатністю. Автори описують різні методи вимірювання форми, їх переваги та недоліки, а також перспективи подальшого вдосконалення технік вимірювання форми на основі машинного зору. Дослідження також підкреслює важливість інтеграції цих методів у промислові процеси для покращення контролю якості та зниження витрат на виробництво.

Роботи [5–7] містить огляд сфер застосування систем машинного зору та методів обробки зображень на виробництві. Показано, що однією з головних передумов використання машинного зору є відсутність суб'єктивності оцінок контрольованих параметрів, яка виникає через людський фактор. Детально розглянуто основні компоненти систем машинного зору, наведено їх класифікацію.

Отже, системи машинного зору вже активно використовуються у різних галузях промисловості і мають великий потенціал для подальшого розвитку. Однак варто враховувати, що впровадження таких систем може вимагати значних зусиль та матеріальних ресурсів, а тому важливо ретельно планувати цей процес та вибирати найбільш ефективні рішення для конкретних потреб виробництва.

Метою статті є опис розробленої власної системи машинного зору, що інтегрована у виробничі процеси з метою поліпшення технологічних показників роботизованого комплексу для поклейки взуттєвої устілки.

Викладення основного матеріалу.

Опис існуючої системи. Роботизований технологічний комплекс складається з промислового робота Kawasaki FS 006, поворотного стола з попередньо встановленими формами, допоміжного обладнання стола, а також клейрки. До допоміжного обладнання стола належить прижимний прес, механізм фіксації стола в позиції зупинки, пластикові форми, які виготовляються на спеціальному верстаті з ЧПК. Відстань по центрах між місцем установки поролону та спілку на формі є фіксованим і становить 135 мм по ширині і 10 мм по вертикалі.

Технологічний процес починається з того, що оператор у попередньо заготовлену форму вкладає поролон та спілок. Далі стіл в автоматичному режимі повертається на одну позицію, і оператор повторює цю саму процедуру для наступної форми. Через дві позиції ця форма дістається до робота, який працює по завантаженій програмі і переходить в точку, яка знаходиться над поролоном. Далі робот опускається, доторкається до поролону, активує вакуумний схват. Таким чином за рахунок вакууму поролон присмоктується до схвату і фіксується на ньому.

Схвати використовуються 2-х типів розмірів, які адаптовані для жіночих моделей взуття та чоловічих. Вони відрізняються геометричними розмірами, кількістю отворів для присмоктування вакуумним схватом. Після того, як відбувся захват поролону, робот пересувається на точку, яка знаходиться перед валиком на клеєнамазувальній машині, після чого робот з певною невисокою швидкістю проїжджає над валиком цієї машини. Таким чином клей потрапляє на поролон, далі робот пересувається до точки, яка знаходиться над спілом, після чого відбувається опускання поролону на нього. Далі відбувається з'єднання поролону, який був попередньо промазаний клеєм, та спілку.

Робот не виконує силовий прижим, він лише легенько доторкається поролоном до спілку, вакуум відключається і подається стиснуте повітря через отвори у формі. Повітря необхідно для того, щоб за рахунок статичної сили відбувалася фіксація готової устілки на схваті, а готова устілка залишалася лежати на формі. Опісля робот переходить у свою початкову позицію, яка знаходиться над поролоном і на відстані 40 мм над формою, така відстань регламентована тим, щоб унеможливити колізію зі столом при повороті. Далі відбувається поворот стола. Таким чином ця форма потрапляє під прес. Це забезпечує стійке і міцне з'єднання, оскільки навіть короткочасного прижиму достатньо для того, аби клей мав гарну адгезію між матеріалами. Ще один поворот машини і вже готова устілка потрапляє до оператора, який дістає устілку з форми та встановлює на попередні спеціально заготовлені місця.

Розглянемо також інші компоненти системи (рис. 1): для фіксації стола чітко в позиції існує спеціальний механізм (пневматична вилка), який захоплює стіл за спеціальний виступ, який існує на кожній позиції, де є форма, і фіксує за нього стіл, поки не завершиться цикл роботи робота. Оскільки

точність позиціонування, що забезпечується роботом, відповідає 0,05 міліметра, механізм фіксації стола забезпечує високу точність, а вакуумний тримач чітко тримає поролон протягом всього циклу проклейки, то можна розраховувати на високу ступінь повторюваності та очікувану якість операції з'єднання складових частин готової устілки.



Рис. 1. РТК виготовлення взуттєвої устілки

Розробка системи машинного зору. Ключовим аспектом необхідності інтеграції системи машинного зору в цей роботизований технологічний комплекс є те, що існуюча система має певні недоліки. Наприклад, через те, що завдання на поклейку мають фіксовану кількість одиниць виробу. Дві форми належать до моделі TR і вони є, наприклад, 37-го розміру, і завдання на цю позицію включає в себе 1000 пар устілок. Друга позиція завдання враховує поклейку 1050 пар устілок. На машині, оснащій чотирма позиціями, це може бути не дуже великою проблемою, але на виробництві є машини, які можуть одночасно клеїти до шести пар устілок, тобто вони мають 12 окремих позицій, оскільки пара складається з лівої та правої ноги. Таким чином, імовірна ситуація, коли через невелику різницю між завданнями в кількості пар може виникнути така ситуація, що одна з позицій буде вироблена повністю, але, оскільки на машині встановлено ще п'ять форм, які також скоро можуть вимагати заміни, оператор може прийняти рішення замінити всі форми разом. Також, якщо виникає певний брак у технологічному процесі поклейки устілки, оператор може доробляти пари, які були забраковані. Брак може бути лише однієї півпари. Оскільки матеріалом для устілки часто є шкіра, яка може мати різний малюнок, текстуру та колір, необхідним є парування устілок, тобто не можна клеїти підряд, наприклад, ліву ногу, а потім окремо праву без врахування фактора, що устілки мають бути виготовлені з одного і того самого шматка шкіри.

Таким чином, виникає ситуація, що на РТК можуть бути форми, куди не встановлюються устілка та поролон. Такі позиції можуть призводити до того, що робот виконує велику кількість зайвих рухів, що прискорює знос обладнання, збільшує електроспоживання. Враховуючи той факт, що обладнання може працювати три зміни на добу по вісім годин, фактично за винятком певних затримок, робот може працювати понад 20 годин на добу. Також не варто забувати, що працюючий робот споживає електроенергію. Оскільки поролон кріпиться до лапи за рахунок вакуумної присоски, можлива ситуація, коли без поролону вакуумна присоска, проходячи над валиком з гарячим клеєм, може всмоктувати клей, що призведе до небажаної приклеївки поролону або устілки до схвату через попереднє потрапляння клею. Це в свою чергу призведе до бракування устілок і затримок у роботі обладнання.

Запропонована система машинного зору складається з камери, що під'єднана через USB-інтерфейс до одноплатного комп'ютера Raspberry Pi. Оскільки програмний продукт написаний на мові програмування Python, дана система є кросплатформенною і може бути перенесена на будь-яке обладнання, будь то аналог Raspberry Pi на Arm процесорі або повноцінний комп'ютер на операційній системі Windows або Linux. Також, оскільки Raspberry Pi має порти вводу-виводу, які толерантні лише до напруги від нуля до 5 В, для узгодження з роботизованим комплексом необхідно зробити модуль гальванічної розв'язки. Він же виконує функцію узгодження рівнів. У тестовій моделі цю функцію виконував набір з блоку реле, оскільки цим комплексом на розглянутій машині керував повністю абсолютно робот.

Узгодження відбувалося таким чином: камера з Raspberry Pi була встановлена на одну позицію до робота. В середньому швидкість однієї обробки однієї секції при поклейці становить від 6 до 6,5 секунд. А час обробки зображення на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi – від 1,5 до 5 секунд залежно від того, опрацьовувалася пуста форма чи форма з поролоном, умов освітлення, оскільки це впливало на швидкість обробки зображення. Таким чином, з огляду на те, що швидкість обробки зображення швидша, ніж робочий напівок робота, можна стверджувати, що така система не буде сповільнювати існуючий технологічний комплекс, і Raspberry Pi, який був використаний на той час, є абсолютно задовільним для цього проекту.

Визначення наявності устілки виконувалося таким чином: під секцією, куди повинен був вкладатися поролон, був вкладений спеціальний малюнок, який був попередньо заламінований пластиком. Малюнок мав структуру шахматної дошки, тобто це був набір квадратиків чорного та білого кольору. На Raspberry Pi був зразок фотографії малюнку шахматної дошки. Таким чином, програмний продукт завдяки бібліотеці OpenCV виконував порівняння фотографії та пошук семплу на цій фотографії.

Попередньо перед тим, як перейти до такого підходу, розглядалися інші варіанти. Зокрема, як правило, устілка відрізняється елементами, які різняться за кольором та формою. Форма є білою, а поролон, як правило, темного кольору. Таким чином, можна було визначати наявність устілки просто за рахунок кольору. Також можна було задіяти оптичні датчики з попередньою поклейкою світловідбивного елемента. Але оскільки в процесі роботи можлива така ситуація, що буде приклейка устілки, на яку випадково потрапив клей на форму, і таким чином відбувається забруднення форми клеєм, це може внести схибні спрацювання в систему, оснащену світловідбивним елементом або іншим датчиком. Тож метод з пошуком частини зображення на фотографії форми виглядає цілком доцільним.

На наступному етапі розробки також було прийнято рішення дооснастити форму QR-кодом. На QR-коді зашифрована спеціальна інформація, яка зберігається в базі даних. Таким чином, можна побачити, скільки разів конкретна форма проїжджала під камерою. Також, якщо на цій формі були знайдені всі елементи устілки, ми приймаємо, що вона була виготовлена. Ця устілка записується в базу даних. Таким чином, це дає змогу в перспективі оцінювати швидкість роботи машини та автоматично записувати цю інформацію в базу даних, надаючи спеціальному відділу планування більшу гнучкість та прогнозування процесу виробництва.

Безпосереднє поєднання такої модульної системи виконується на базі одноплатного комп'ютера доволі просто. Оскільки робот під'єднаний до модуля узгодження, Raspberry Pi має безпосередню змогу взаємодіяти з вхідними та вихідними сигналами робота Kawasaki. На вхід Raspberry Pi заведено сигнал від датчика, який свідчить про те, що стіл зупинився в позиції, та перемикача автоматичного режиму, який вмикає або вимикає систему машинного зору. Під час виникнення неполадок у роботі обладнання ця система може бути деактивована, і робота може бути продовжена в штатному режимі. Вихідним сигналом на Raspberry Pi є сигнал повороту стола. Цей сигнал переривається від робота Kawasaki до системи керування столом за рахунок реле з нормально відкритим контактом. Це зроблено для того, щоб уникнути колізій, якщо процес обробки та порівняння зображення буде тривати довше, ніж процес обробки напівпари роботом. Якщо Raspberry Pi не отримує команду на обробку наступної позиції, а отримує сигнал на поворот стола, це свідчить про те, що така форма є пустою, і роботу не потрібно проводити на цій позиції.

При інтеграції в таку систему мало місце кілька важливих моментів. Зокрема, при будь-яких змінах у роботі обладнання необхідно провести навчання робочого персоналу. Людина, що виконує монотонну роботу, звикає до неї та діє в напіваавтоматичному режимі. Це зайняло певний час, щоб привчити людей працювати разом з такою системою.

Наступним викликом був доволі складний процес пусконаладження цього обладнання. Оскільки цей досвід інтеграції подібної системи був першим, такі речі, як вибір оптимального місця розміщення камери та забезпечення певних умов освітлення, були ключовими. Ці умови давали змогу пришвидшити процес обробки зображення та отримання постійно стабільного та якісного результату.

Також процес розробки цієї системи містив певну кількість дослідницьких робіт. Наприклад, потрібно було з'ясувати оптимальний метод визначення наявності устілки. Система повинна бути стійкою до непередбачуваних ситуацій, таких як відсутність форми на машині, наявність посторонніх предметів на формі, або забрудненість форми клеєм, пилом чи іншими речами. Крім того, така система не має сповільнювати існуючий технологічний комплекс, оскільки швидкість роботи обладнання разом з якістю є ключовими пріоритетами. Також важливо, щоб система не порушувала загальний алгоритм роботи, оскільки це потребувало б більшого часу на навчання операторів.

Оцінка впливу на продуктивність проводилася протягом тижневого тестування. За цей час було виконано порівняння швидкодії системи зі встановленими засобами технічного зору та без них. Процес оцінки впливу має певні складнощі, оскільки дана машина може виконувати різні завдання відповідно до специфіки матеріалів.

Упродовж тестування було виявлено, що швидкодія такого комплексу може варіюватися через додавання допоміжних пауз, адаптацію швидкості процесу проходження над клеєнамазкою, режиму пресу та процесу захоплення устілки за допомогою вакуумного схвату. Також під час виготовлення певних моделей устілки необхідним є проведення намазки клеєм, щоб забезпечити більший рівень клею, оскільки поролон може мати великі можливості в поглинанні рідкого клею.

Також важливим є людський фактор, оскільки обладнання працює зазвичай у три зміни, і можуть бути різні оператори з різною швидкістю роботи. Поняття часу доби, а також його розподіл (початок, середина, кінець зміни) безпосередньо впливають на швидкість оператора.

Процес підвищення швидкодії РТК досягається не за рахунок пришвидшення циклу обробки, а за рахунок зменшення затримок на підрахунок виготовлених пар та на час переналагодження.

Максимально теоретична швидкодія машини за зміну становить близько 1800 пар, але практика показує, що залежно від моделі виготовлення устілок реальна продуктивність варіюється від 1000 до 1500 пар за зміну.

Таблиця 1

Продуктивність РТК до модернізації, пар за зміну

Зміна	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця	Субота
Зміна 1	1300	1225	1275	1350	1330	1290
Зміна 2	1175	1200	1150	1215	1220	1205
Зміна 3	1010	1075	1095	1080	1040	1025

Таблиця 2

Продуктивність РТК після модернізації, пар за зміну

Зміна	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця	Субота
Зміна 1	1370	1280	1300	1370	1390	1365
Зміна 2	1225	1260	1190	1250	1285	1235
Зміна 3	1085	1100	1125	1395	1115	1070

Виміряти реальний вплив від впровадження поточної системи є досить складним завданням. Оскільки має місце людський фактор, який складно виміряти відповідно до поточних даних, прослідковується цікава закономірність: люди мають певну зміну продуктивності, яка залежить від дня тижня та часу доби. Зокрема, чітко простежується закономірність, що найменша продуктивність припадає на третю зміну, це час, коли людина зазвичай відпочиває.

Для максимальної об'єктивності поточних замірів, на першу, другу та третю зміну були зафіксовані одні й ті самі оператори. Люди проходили стажування з використанням поточної системи протягом певного часу, а також працювали в звичайному режимі з системою машинного зору. Це було зроблено для того, щоб уникнути впливу часу звикання оператора до машини та певних часових затримок, викликаних цим фактором.

Таблиця 3

Зміна продуктивності РТК після модернізації (%)

День	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3
Понеділок	5,38	4,26	7,43
Вівторок	4,49	5,00	2,33
Середа	1,96	3,48	2,74
Четвер	1,48	2,88	29,17
П'ятниця	4,51	5,33	7,21
Субота	5,81	2,49	4,39

Споживання електроенергії РТК становить приблизно 5 кВт год, з яких 2,2 кВт є сталим споживанням і можуть варіюватися в межах плюс-мінус 10 % залежно від температури навколишнього середовища, в процесі розігріву клею. Далі коли РТК виходить на усталений режим роботи, споживання може бути значно зменшеним.

Таблиця 4

Енергоспоживання РТК до модернізації (кВт · год)

Зміна	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця	Субота
Зміна 1	17,75	17,75	17,75	16,72	17,75	16,72
Зміна 2	16,72	17,75	16,72	16,72	17,23	16,72
Зміна 3	17,75	17,23	17,23	17,75	17,75	17,75

Таблиця 5

Енергоспоживання РТК після модернізації (кВт · год)

Зміна	Понеділок	Вівторок	Середа	Четвер	П'ятниця	Субота
Зміна 1	16,72	17,75	16,72	17,75	16,72	16,72
Зміна 2	17,75	17,23	17,75	17,23	17,23	17,75
Зміна 3	16,72	17,75	17,23	17,23	17,75	17,23

Таблиця 6

Відсоткова різниця між показниками електроспоживання РТК до та після модернізації (%)

День	Перша зміна	Друга зміна	Третя зміна
Понеділок	-5,8	+6,2	-5,8
Вівторок	0,0	-2,9	+3,0
Середа	-5,8	+6,2	0,0
Четвер	+6,2	+3,1	-2,9
П'ятниця	-5,8	0,0	0,0
Субота	0,0	+6,2	-2,9

Варто розуміти, що аналіз електроспоживання, враховуючи різні фактори, такі як зміна температури, витрати клею, температура навколишнього середовища, може бути складним. Зважаючи на це, важливо враховувати, що є сталим елементом у кількості спожитої електроенергії – це клеєнамазувальна машина. Ця машина працює постійно, а кількість обертів стола є фіксованою та прив'язаною до кількості виготовлених пар. Плюс споживання електроенергії може зменшуватися внаслідок того, що робота відпрацьовує менше циклів. Таким чином, для аналізу електроспоживання варто брати до уваги ці фактори, а також розуміти, що навіть при зміні температури або типу поролону, є тенденція до зниження споживання електроенергії внаслідок меншої кількості циклів роботи.

Переваги реалізації системи у вигляді зовнішнього модуля. Оскільки простота встановлення системи машинного зору є значною перевагою, то це означає, що будь-яка з машин або роботизованих комплексів поклейки устілки може бути переобладнана для використання такої системи. Оскільки виробництво використовує різні моделі технологічних комплексів з різними характеристиками, важливо мати універсальну систему, яка може пристосуватися до різних умов.

Однак під час встановлення такої системи може бути необхідно внести певні зміни в схему з'єднання та алгоритм керування, щоб вона працювала оптимально в конкретному середовищі. Це може враховувати адаптацію до різних типів столів, інтерфейсів керування та інших факторів. Однак зазвичай ці зміни не є складними і не вимагають значних зусиль.

Загальні висновки з розглянутих досліджень та розробки. Впровадження системи машинного зору дозволяє підвищити продуктивність роботизованих комплексів поклейки устілки. Система демонструє стабільне функціонування незалежно від моделі машин, що використовуються на виробництві. Простота встановлення й універсальність системи дозволяють її застосовувати на різних типах обладнання з мінімальними змінами в схемі з'єднання та алгоритмах керування.

Встановлено, що система машинного зору мінімально впливає на загальне електроспоживання комплексу. Стале електроспоживання класнамазувальної машини залишається важливим фактором, що впливає на загальні показники споживання електроенергії. Впровадження системи знизить споживання електроенергії завдяки оптимізації циклів роботи та зменшенню простоїв.

Перспективи подальшої модернізації та впровадження системи машинного зору в інші технологічні процеси. Систему машинного зору можна адаптувати для використання в інших виробничих процесах, де підвищення рівня автоматизації позитивно впливатиме на технологічний процес. Наприклад, у виробництві електроніки або харчовій галузі, де важлива точність та контроль якості продукції. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на підвищенні точності та швидкості системи машинного зору, а також на розробці більш універсальних інтерфейсів керування, що дозволить швидко адаптувати систему до різних типів обладнання.

Рекомендації для майбутніх досліджень та розвитку технологій. Необхідно здійснити поглиблену інтеграцію системи з виробничими відділами, зокрема в аспекті планування. Розробка методів аналізу продуктивності обладнання повинна бути узгоджена з характеристиками продукції, що виготовляється. Також важливо проводити оцінку професійної придатності оператора, оскільки це може значно впливати на швидкодію системи в цілому.

Подальше дослідження може бути спрямоване на вивчення можливостей використання системи машинного зору в умовах змінної освітленості та інших змінних факторів, таких як запиленість. Розробка адаптивних алгоритмів керування, які автоматично налаштовуються на оптимальні параметри роботи залежно від умов виробництва, також є важливим напрямом. Впровадження алгоритмів машинного навчання може суттєво підвищити точність та ефективність системи. Продовження тестування системи на різних виробництвах дозволить виявити додаткові можливості її оптимізації. Важливо також впроваджувати систему на нових підприємствах з метою розширення сфери її застосування та збору даних для подальших досліджень. Ці висновки та рекомендації сприятимуть подальшому розвитку та вдосконаленню системи машинного зору, підвищуючи ефективність виробничих процесів та забезпечуючи вищий рівень автоматизації.

References:

1. Minwoo, P. and Jongpil, J. (2022), «Design and Implementation of Machine Vision-Based Quality Inspection System in Mask Manufacturing Process», *Sustainability*, Vol. 14, Issue 10, doi: 10.3390/su14106009.
2. Taatali, A., Sadaoui, S.E., Louar, M.A. and Mahiddini, B. (2024), «On-machine dimensional inspection: machine vision-based approach», *The International Journal of Advanced Manufacturing, Technology*, Vol. 131, pp. 393–407, doi: 10.1007/s00170-024-13081-1.
3. De Seta, G. and Shchetvina, A. (2023), «Imagining machine vision: Four visual registers from the Chinese AI industry», *AI & SOCIETY*, doi: 10.1007/s00146-023-01733-x.
4. Zhang, G., Yang, S., Hu, P. and Deng, H. (2022), «Advances and Prospects of Vision-Based 3D Shape Measurement Methods», *Machines*, Vol. 10, Issue 2, doi: 10.3390/machines10020124.
5. Bezvesilna, O.M., Tsiрук, V.H., Diachenko, V.P. and Tkachuk, A.H. (2014), «Zastosuvannya mashynnoho zoru ta metodiv obrobky zobrazhennia na vyrobnytstvi», *Tekhnolohichniy audyt ta rezervy vyrobnytstva*, No. 3/4 (17), pp. 18–23.
6. *Global Markets for Machine Vision Technologies* (2013), Report IAS010C, BCC Research, [Online], available at: <http://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensors/machine-vision-technologies-ias010d.html>
7. Cheng, Y. and Jafari, M. (2008), «Vision-based online process control in manufacturing applications», *IEEE Transactions on Automation science and engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 140–153.

Гордійченко Олег Володимирович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- промислова робототехніка;
- інформаційно-вимірювальні системи;
- обробка відеозображень.

Ткачук Андрій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2466-6299>.

Наукові інтереси:

- автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи;
- мобільні роботизовані платформи;
- системи стабілізації озброєння.

Добржанський Олександр Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4330-0287>.

Наукові інтереси:

- автоматизоване управління виробничими процесами;
- гіроскопічні гравіметри;
- розробка програмного забезпечення для промислових та бізнес-процесів (C, C++, C#, VBA, JS/HTML/CSS, Python, Lua);
- програмування PLC та SCADA (LD, FBD, SFC, IL, ST);
- 3D-моделювання в технологіях Unity, VR;
- дистанційно керовані мобільні платформи.

Богоявленська Юлія Вячеславівна – кандидат економічних наук, доцент, докторант кафедри фінансів та цифрової економіки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-4101-7127>.

Наукові інтереси:

- проєктний менеджмент;
- міжнародні проєкти;
- цифрова економіка;
- фінанси.

Богдановський Мартін Віталійович – старший викладач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2870-4248>.

Наукові інтереси:

- інтелектуальні мехатронні системи;
- автоматизація технологічної підготовки механоскладального машино- та приладобудівного автоматизованого виробництва;
- системи навігації рухомих об'єктів.

Hordiichenko O.V., Tkachuk A.H., Dobrzhanskyi O.O., Bogoyavlenska Yu.V., Bohdanovskyi M.V.

A robotic complex for the production of shoe insoles

The article discusses the development of a proprietary machine vision system to improve the technological performance of a robotic complex for shoe insole gluing and its integration into the existing robot workcell. It provides a description of the developed system, the existing technological process, implemented improvements, and an assessment of its impact on productivity during usage. Implementation in the form of an external module offers several advantages, including the ability to quickly retrofit existing robot workcells, ease of use and maintenance, and scalability. The machine vision system consists of several components: a compact cabinet with a single-board Raspberry PI computer and a level matching unit (in the test assembly, a relay block), and an external USB camera. The existing robot workcell was based on an industrial Kawasaki FS006 robot, but the interface was implemented in such a way that the system can be connected to equipment from other manufacturers, as there was no need for modification of the industrial robot's software component in the current implementation. The machine vision system took on the role of a linking element between the existing components of the system.

Keywords: robotics; machine vision; robotic complex; robot workcell; Kawasaki robot; Raspberry PI; robot workcell modernization; production automation; industrial equipment.

The paper «A robotic complex for the production of shoe insoles» has been developed within the framework of the project «Widen performance in research and innovation capacity and competence Across EU» / «WIDE AcrossEU» 101 158 561 Horizon Europe program. Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Research Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.