MAHSULOTLARNING SIFAT HOLATINI INTELLEKTUAL RAQAMLI IDENTIFIKATSIYALASH VA NUQSONLI MAHSULOTLAR HARAKATINI AVTOMATLASHTIRILGAN BOSHQARISH

Bobomurodov Elyor
E-mail: elyor.bobomurodov@inbox.ru
https://doi.org/10.5281/zenodo.22179558

Annotatsiya. Mazkur maqolada ishlab chiqarish jarayonida mahsulotlarning sifat holatini intellektual raqamli identifikatsiyalash, nuqsonlarni avtomatik aniqlash hamda nuqsonli mahsulotlarning ishlab chiqarish liniyasidagi harakatini avtomatlashtirilgan boshqarish masalalari tadqiq etilgan. Zamonaviy ishlab chiqarish korxonalarida mahsulot sifatini nazorat qilish jarayonlarining tezkorligi, aniqligi va ishonchliligini oshirish “Industry 4.0” konsepsiyasining muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Tadqiqotda kompyuter ko‘rishi, raqamli tasvirlarni qayta ishlash, sun’iy intellekt, mashinaviy o‘qitish, sensor texnologiyalari, RFID/QR identifikatsiyasi, PLC kontrollerlari va avtomatik aktuatorlarni yagona intellektual boshqaruv tizimiga integratsiyalash yondashuvi taklif etilgan. Ishlab chiqilgan konseptual model mahsulotni aniqlash, uning raqamli tasvirini olish, sifat ko‘rsatkichlarini tahlil qilish, nuqson turini klassifikatsiyalash, mahsulotga individual raqamli identifikator biriktirish va sifat holatiga muvofiq uning harakat yo‘nalishini avtomatik belgilash bosqichlarini qamrab oladi. Mahsulotning ishlab chiqarish liniyasidagi joylashuvi va harakat tezligini hisobga olgan holda boshqaruv signallarini shakllantirish orqali nuqsonli mahsulotlarni o‘z vaqtida ajratish imkoniyati asoslangan. Taklif etilayotgan tizim inson omilini kamaytirish, mahsulot sifatini real vaqt rejimida monitoring qilish, nuqsonlarni aniqlash aniqligini oshirish, mahsulotlar harakatini optimallashtirish va ishlab chiqarish samaradorligini yaxshilash imkonini beradi. Tadqiqot natijalari raqamli ishlab chiqarish, aqlli sifat nazorati va avtomatlashtirilgan saralash tizimlarini rivojlantirish uchun ilmiy-amaliy asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: mahsulot sifati, intellektual identifikatsiya, raqamli identifikatsiya, nuqsonli mahsulot, sifat nazorati, sun’iy intellekt, kompyuter ko‘rishi, mashinaviy o‘qitish, raqamli tasvirlarni qayta ishlash, PLC, IoT, RFID, QR-kod, avtomatik saralash, konveyer tizimi, avtomatlashtirilgan boshqaruv, Industry 4.0.

Abstract. This article studies the issues of intelligent digital identification of the quality status of products during the production process, automatic detection of defects, and automated control of the movement of defective products on the production line. Increasing the speed, accuracy, and reliability of product quality control processes in modern manufacturing enterprises is one of the important directions of the “Industry 4.0” concept. The study proposes an approach to integrating computer vision, digital image processing, artificial intelligence, machine learning, sensor technologies, RFID/QR identification, PLC controllers, and automatic actuators into a single intelligent control system. The developed conceptual model covers the stages of product identification, obtaining its digital image, analyzing quality indicators, classifying the type of defect, assigning an individual digital

identifier to the product, and automatically determining its direction of movement according to its quality status. It is based on the possibility of timely separation of defective products by forming control signals taking into account the location and speed of movement of the product on the production line. The proposed system allows to reduce the human factor, monitor product quality in real time, increase the accuracy of defect detection, optimize product movement and improve production efficiency. The research results can serve as a scientific and practical basis for the development of digital manufacturing, intelligent quality control and automated sorting systems.

Keywords: product quality, intelligent identification, digital identification, defective product, quality control, artificial intelligence, computer vision, machine learning, digital image processing, PLC, IoT, RFID, QR code, automatic sorting, conveyor system, automated control, Industry 4.0.

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы интеллектуальной цифровой идентификации состояния качества продукции в процессе производства, автоматического обнаружения дефектов и автоматизированного управления движением дефектной продукции на производственной линии. Повышение скорости, точности и надежности процессов контроля качества продукции на современных производственных предприятиях является одним из важных направлений концепции «Индустрия 4.0». В исследовании предлагается подход к интеграции компьютерного зрения, цифровой обработки изображений, искусственного интеллекта, машинного обучения, сенсорных технологий, RFID/QR-идентификации, ПЛК-контроллеров и автоматических исполнительных механизмов в единую интеллектуальную систему управления. Разработанная концептуальная модель охватывает этапы идентификации продукции, получения ее цифрового изображения, анализа показателей качества, классификации типа дефекта, присвоения изделию индивидуального цифрового идентификатора и автоматического определения направления его движения в соответствии с состоянием качества. Она основана на возможности своевременного отсеивания дефектной продукции путем формирования управляющих сигналов с учетом местоположения и скорости движения изделия на производственной линии. Предложенная система позволяет снизить влияние человеческого фактора, контролировать качество продукции в режиме реального времени, повысить точность обнаружения дефектов, оптимизировать перемещение продукции и повысить эффективность производства. Результаты исследования могут служить научно-практической основой для развития цифрового производства, интеллектуального контроля качества и автоматизированных систем сортировки.

Ключевые слова: качество продукции, интеллектуальная идентификация, цифровая идентификация, дефектная продукция, контроль качества, искусственный интеллект, компьютерное зрение, машинное обучение, цифровая обработка изображений, ПЛК, IoT, RFID, QR-код, автоматическая сортировка, конвейерная система, автоматизированное управление, Индустрия 4.0.

Kirish. Bugungi kunda jahon sanoatida ishlab chiqarish jarayonlarini raqamlashtirish, avtomatlashtirish va intellektuallashtirish korxonalarning raqobatbardoshligini ta’minlovchi

asosiy omillardan biriga aylanmoqda. Global iqtisodiyotda mahsulot ishlab chiqarish hajmining ortishi, iste'molchilar talabining tez o'zgarishi, mahsulot sifatiga qo'yilayotgan talablarning kuchayishi hamda ishlab chiqarish jarayonlarining murakkablashuvi korxonalardan sifat nazoratining yangi, yanada tezkor va ishonchli mexanizmlarini joriy etishni talab qilmoqda. Ayniqsa, mahsulot sifatini real vaqt rejimida nazorat qilish, nuqsonlarni ishlab chiqarish jarayonining dastlabki bosqichlarida aniqlash va aniqlangan mahsulotlarning keyingi harakatini avtomatik boshqarish zamonaviy aqlli ishlab chiqarish tizimlarining muhim tarkibiy qismi hisoblanadi. An'anaviy ishlab chiqarish tizimlarida mahsulot sifatini baholash ko'p hollarda inson operatori tomonidan vizual ko'rik, o'lchash vositalari yoki oddiy nazorat qurilmalari yordamida amalga oshiriladi. Bunday usullar ma'lum sharoitlarda samarali bo'lsa-da, ishlab chiqarish hajmining ortishi va texnologik liniyalarning yuqori tezlikda ishlashi natijasida ularning imkoniyatlari cheklanib bormoqda. Bir xil operatsiyani uzoq vaqt davomida takrorlash natijasida operatorning charchashi, diqqatining pasayishi, subyektiv baholash va inson xatosi kabi omillar mahsulot sifatini nazorat qilish natijalariga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli ishlab chiqarish jarayonida inson ishtirokini kamaytiradigan, mahsulotlarni uzluksiz va obyektiv baholaydigan avtomatlashtirilgan nazorat tizimlarini yaratish dolzarb ilmiy-amaliy masalaga aylanmoqda. Mahsulot nuqsonlari ishlab chiqarish jarayonining turli bosqichlarida yuzaga kelishi mumkin. Ular mexanik shikastlanish, geometrik deformatsiya, o'lchamlarning standartdan chetlanishi, sirtning tirnalishi, yoriqlar, rang o'zgarishi, noto'g'ri yig'ilish, qadoqlashdagi kamchiliklar, markirovkaning mavjud emasligi yoki texnologik parametrlarning buzilishi ko'rinishida namoyon bo'lishi mumkin. Ayrim hollarda nuqsonlar inson ko'zi bilan oson aniqlansa, boshqa hollarda juda kichik o'lchamli yoki murakkab shakldagi nuqsonlarni aniqlash uchun yuqori aniqlikdagi raqamli tasvirlarni qayta ishlash va intellektual tahlil algoritmlaridan foydalanish talab etiladi. Shu nuqtayi nazardan, kompyuter ko'rishi texnologiyasi ishlab chiqarishdagi sifat nazoratini avtomatlashtirishning istiqbolli vositalaridan biri hisoblanadi. Raqamli kameralar yordamida mahsulotlarning tasvirlarini real vaqt rejimida olish va ushbu tasvirlarni maxsus algoritmlar yordamida tahlil qilish orqali mahsulotning tashqi ko'rinishi, shakli, geometrik o'lchamlari, rangi, teksturasi va yuzasidagi nuqsonlarni aniqlash mumkin. Tasvirlarni qayta ishlash texnologiyalarining sun'iy intellekt bilan integratsiyalashuvi esa sifat nazoratining imkoniyatlarini yanada kengaytiradi. Sun'iy intellekt va mashinaviy o'qitish algoritmlarining rivojlanishi natijasida mahsulotlarni avtomatik klassifikatsiya qilish va nuqsonlarni aniqlash imkoniyatlari sezilarli darajada oshdi. Ayniqsa, chuqur o'rganishga asoslangan neyron tarmoqlar mahsulot tasvirlaridagi murakkab xususiyatlarni avtomatik aniqlash va ularni turli sifat kategoriyalariga ajratishda samarali vosita sifatida qaralmoqda. Bunday tizimlar oldindan tayyorlangan ma'lumotlar bazasi asosida mahsulotning sifatli yoki nuqsonli ekanligini aniqlashi, ayrim hollarda esa nuqsonning turi, joylashuvi va darajasini ham belgilashi mumkin. Biroq mahsulotning nuqsonli ekanligini aniqlashning o'zi ishlab chiqarish jarayonini to'liq avtomatlashtirish uchun yetarli emas. Sifat nazorati tizimi aniqlangan mahsulotning keyingi harakatini ham boshqarishi lozim. Masalan, sifatli mahsulot asosiy ishlab chiqarish oqimida qolishi, qayta ishlanishi mumkin bo'lgan mahsulot tegishli texnologik uchastkaga yuborilishi, yaroqsiz mahsulot esa avtomatik ravishda alohida chiqish liniyasiga yo'naltirilishi kerak. Buning uchun mahsulotning joylashuvi, konveyer tezligi va aktuatorning ishga tushish vaqti

o‘rtasidagi bog‘liqlikni real vaqt rejimida hisoblash talab etiladi. Mahsulotlarni raqamli identifikatsiyalash ushbu jarayonning muhim tarkibiy qismi hisoblanadi. Har bir mahsulotga individual identifikator biriktirish orqali uning ishlab chiqarish jarayonidagi “raqamli izi”ni shakllantirish mumkin. RFID, QR-kod, Data Matrix, shtrix-kod va boshqa identifikatsiya vositalari yordamida mahsulotning ishlab chiqarilgan vaqti, partiyasi, texnologik liniyasi, sifat holati va boshqa parametrlarini raqamli ma’lumotlar bazasi bilan bog‘lash imkoniyati yaratiladi. Natijada mahsulot faqat fizik obyekt sifatida emas, balki unga tegishli ma’lumotlar majmuasiga ega bo‘lgan raqamli obyekt sifatida boshqariladi. Raqamli identifikatsiyalashning yana bir muhim jihati mahsulotning ishlab chiqarish jarayonidagi kuzatuvchanligini ta’minlashdir. Agar muayyan mahsulotda nuqson aniqlansa, tizim ushbu mahsulotning qaysi partiyaga, qaysi ishlab chiqarish liniyasiga va qaysi vaqt oralig‘ida ishlab chiqarilganini aniqlashi mumkin. Bunday yondashuv nafaqat nuqsonli mahsulotni ajratish, balki nuqsonlarning kelib chiqish sabablarini aniqlash va texnologik jarayonni takomillashtirish imkonini ham beradi. Mazkur jarayonda Industrial Internet of Things (IIoT) texnologiyalarining o‘rni ham katta. Sensorlar, kameralar, kontrollerlar, aktuatorlar va boshqa qurilmalarni yagona tarmoqqa birlashtirish orqali ishlab chiqarish jarayonidan uzluksiz ma’lumot olish mumkin. Ushbu ma’lumotlar real vaqt rejimida qayta ishlanib, mahsulot sifati, ishlab chiqarish tezligi, nuqsonlar ulushi va boshqa ko‘rsatkichlar bo‘yicha boshqaruv qarorlarini shakllantirishga xizmat qiladi. Programmable Logic Controller (PLC) texnologiyasi esa intellektual sifat nazorati va avtomatik saralash tizimining fizik boshqaruv qismini tashkil etishi mumkin. Kompyuter ko‘rishi yoki sun’iy intellekt modeli tomonidan aniqlangan natija PLC ga uzatiladi va PLC mahsulotning harakatiga mos ravishda tegishli aktuatorni ishga tushiradi. Bunda pnevmatik itargichlar, servo mexanizmlar, robotlashtirilgan manipulyatorlar yoki boshqa ijro mexanizmlaridan foydalanish mumkin.

Mahsulotning konveyerdagi harakatini aniq boshqarish uchun uning tezligi va nazorat zonasidan aktuatorgacha bo‘lgan masofani hisobga olish muhimdir. Mahsulotning bosib o‘tgan masofasi quyidagi ifoda bilan aniqlanishi mumkin:

$$S=Vt,$$

bu yerda S— mahsulot bosib o‘tgan masofa, V— konveyerning chiziqli tezligi, t— vaqt.

Agar kamera va mahsulotni ajratuvchi aktuator orasidagi masofa L ga teng bo‘lsa, mahsulotning aktuator zonasiga yetib kelish vaqti:

$$t_a=\frac{L}{V}$$

ifoda orqali aniqlanadi. Mazkur matematik bog‘liqliklar asosida nuqson aniqlangan mahsulotning qaysi vaqtda va qaysi koordinatada avtomatik ajratilishi kerakligini aniqlash mumkin. Bu esa mahsulotlar oqimini aniq boshqarish va noto‘g‘ri saralash ehtimolini kamaytirish imkonini beradi. Zamonaviy “Industry 4.0” konsepsiyasi nuqtayi nazaridan bunday tizimlar oddiy avtomatik nazorat vositasi emas, balki kiber-fizik ishlab chiqarish tizimining bir qismi sifatida qaraladi. Unda fizik ishlab chiqarish jarayoni raqamli ma’lumotlar bilan uzviy bog‘lanadi. Sensorlar fizik muhitdan ma’lumotlarni yig‘adi, sun’iy

intellekt va analitik algoritmlar ushbu ma’lumotlarni qayta ishlaydi, boshqaruv moduli qaror qabul qiladi va aktuatorlar ushbu qarorni fizik jarayonda amalga oshiradi.

O‘zbekiston sanoatida ham ishlab chiqarishni raqamlashtirish, avtomatlashtirish va innovatsion texnologiyalarni joriy etish masalalari tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. Mahalliy korxonalarda ishlab chiqarish samaradorligini oshirish, mahsulotlarning xalqaro sifat talablariga mosligini ta’minlash, import o‘rnini bosuvchi va eksportbop mahsulotlar ishlab chiqarish uchun zamonaviy raqamli nazorat tizimlarini joriy etish zarur. Ayniqsa, oziq-ovqat, to‘qimachilik, farmatsevtika, mashinasozlik, elektronika, qurilish materiallari va boshqa tarmoqlarda mahsulot sifatini avtomatik baholash tizimlaridan foydalanish katta amaliy samara berishi mumkin. Mavjud yondashuvlarning tahlili shuni ko‘rsatadiki, mahsulot sifatini nazorat qilish, uning raqamli identifikatsiyasi va nuqsonli mahsulot harakatini boshqarish ko‘pincha alohida texnologik modullar sifatida qaraladi. Bunday yondashuvda sifat haqidagi ma’lumotning ishlab chiqarish liniyasidagi real harakat bilan integratsiyasi yetarli darajada ta’minlanmasligi mumkin. Shu sababli mahsulotni aniqlashdan boshlab, uning sifat holatini baholash, raqamli identifikatorini shakllantirish, ishlab chiqarish liniyasidagi koordinatasini kuzatish va tegishli yo‘nalishga avtomatik yuborishgacha bo‘lgan barcha jarayonlarni yagona intellektual boshqaruv tizimiga birlashtirish ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb hisoblanadi.

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi mahsulotlarning sifat holatini intellektual raqamli identifikatsiyalash hamda aniqlangan nuqsonli mahsulotlarning ishlab chiqarish liniyasidagi harakatini avtomatlashtirilgan boshqarishning samarali konseptual va algoritmik modelini ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqotning ilmiy yangiligi mahsulotning sifat holatini intellektual aniqlash, raqamli identifikatsiyalash va uning keyingi fizik harakatini avtomatik boshqarish jarayonlarini yagona integrallashgan model asosida tashkil etish bilan belgilanadi. Bunday modelda mahsulotning sifat haqidagi raqamli ma’lumoti uning fizik harakati bilan bog‘lanadi va ishlab chiqarish jarayonida avtomatik qaror qabul qilish imkoniyati yaratiladi. Tadqiqotning amaliy ahamiyati shundan iboratki, ishlab chiqilgan yondashuv asosida ishlab chiqarish korxonalarida mahsulotlarni real vaqt rejimida nazorat qilish, nuqsonlarni avtomatik aniqlash, mahsulotlarni sifat darajasiga ko‘ra saralash, ishlab chiqarish ma’lumotlarini raqamli bazada saqlash va nuqsonli mahsulotlarni tegishli yo‘nalishga avtomatik yuborish imkonini beruvchi tizimlarni yaratish mumkin. Shunday qilib, mahsulotlarning sifat holatini intellektual raqamli identifikatsiyalash va nuqsonli mahsulotlar harakatini avtomatlashtirilgan boshqarish zamonaviy raqamli ishlab chiqarishning muhim yo‘nalishlaridan biri bo‘lib, u sun’iy intellekt, kompyuter ko‘rishi, IoT, raqamli identifikatsiya va avtomatik boshqaruv texnologiyalarining o‘zaro integratsiyasini talab qiladi. Mazkur yondashuv ishlab chiqarish sifatini oshirish bilan bir qatorda, korxonalarning resurslardan foydalanish samaradorligini yaxshilash, inson omilini kamaytirish va aqlli ishlab chiqarish muhitini shakllantirish uchun muhim ilmiy-amaliy asos yaratadi.

Adabiyotlar tahlili. Mahsulotlarning sifat holatini intellektual raqamli identifikatsiyalash va nuqsonli mahsulotlar harakatini avtomatlashtirilgan boshqarish masalasi zamonaviy ishlab chiqarish, avtomatlashtirish, kompyuter ko‘rishi, sun’iy intellekt va “Industry 4.0” texnologiyalarining kesishgan nuqtasida shakllanayotgan kompleks ilmiy yo‘nalishlardan biridir. Ushbu yo‘nalishdagi ilmiy tadqiqotlarda mahsulot sifatini

aniqlashning an’anaviy usullaridan boshlab, mashinaviy ko‘rish, chuqur o‘rganish, real vaqt rejimidagi nuqsonlarni aniqlash, robotlashtirilgan inspeksiya va aqlli ishlab chiqarish tizimlarigacha bo‘lgan keng ko‘lamdagi yondashuvlar ishlab chiqilgan. Avvalo, mahsulot sifatini nazorat qilish ishlab chiqarish jarayonining ajralmas qismi sifatida qaraladi. Zamonaviy aqlli ishlab chiqarishda sifat nazoratining asosiy vazifasi faqat tayyor mahsulotdagi nuqsonni aniqlash emas, balki nuqsonning yuzaga kelish sabablarini aniqlash, mahsulotning ishlab chiqarish jarayonidagi holatini kuzatish va aniqlangan natijaga muvofiq avtomatik boshqaruv qarorini shakllantirishdan iborat. 2021-yilda chop etilgan tasvirga asoslangan sifat nazorati bo‘yicha adabiyotlar sharhida aqlli ishlab chiqarishda tasviriy inspeksiya tizimlariga qiziqish keskin oshgani, bunga raqamli kameralar va sensorlarning takomillashuvi hamda sun’iy intellekt va mashinaviy o‘qitish algoritmlarining rivojlanishi sabab bo‘layotgani qayd etilgan. Ayniqsa, chuqur neyron tarmoqlar kompyuter ko‘rishining sifat nazoratidagi imkoniyatlarini sezilarli kengaytirgan. Mahsulot sifatini nazorat qilishning dastlabki bosqichlarida asosan insonning vizual kuzatuviga tayanilgan. Bunday yondashuvning asosiy afzalligi uning texnik jihatdan sodda va moslashuvchanligidir. Biroq ishlab chiqarish hajmi ortishi, konveyer tezligining oshishi va nuqsonlarning murakkablashuvi inson operatorining imkoniyatlarini cheklaydi. Adabiyotlarda vizual nazoratda insonning charchashi, diqqatning pasayishi, subyektiv baholash va vaqt sarfining yuqoriligi muhim kamchiliklar sifatida ko‘rsatiladi. Shu sababli avtomatlashtirilgan vizual inspeksiya tizimlari inson tomonidan amalga oshiriladigan nazoratni to‘ldiruvchi va ayrim hollarda almashtiruvchi texnologiya sifatida rivojlangan. An’anaviy kompyuter ko‘rish tizimlarida mahsulot tasvirlari ma’lum matematik va statistik algoritmlar yordamida qayta ishlanadi. Bunda thresholding, edge detection, contour analysis, morphological operations, texture analysis va geometrik parametrlarni hisoblash kabi usullardan foydalaniladi. Mazkur usullar mahsulot va fon o‘rtasidagi kontrast yetarlicha yuqori bo‘lgan, nuqsonlar oldindan ma’lum va tasvir olish sharoitlari barqaror bo‘lgan ishlab chiqarish liniyalarida samarali natija berishi mumkin. Biroq murakkab ishlab chiqarish muhitida yorug‘likning o‘zgarishi, mahsulotning joylashuvdagi siljishi, yuzaning aks ettiruvchi xususiyatlari va nuqsonlarning turli ko‘rinishda namoyon bo‘lishi qoida asosidagi algoritmlarning samaradorligini pasaytiradi. Shu sababli keyingi tadqiqotlarda mashinaviy o‘qitish algoritmlaridan foydalanishga katta e’tibor qaratildi. Support Vector Machine, Random Forest, k-nearest neighbors va boshqa klassifikatsiya algoritmlari mahsulot tasvirlaridan oldindan ajratib olingan xususiyatlar asosida sifat holatini aniqlashda qo‘llanildi. Bunday usullarda tasvirdan kerakli xususiyatlarni tanlash va algoritm uchun mos shaklga keltirish muhim bosqich hisoblanadi. Ushbu yondashuvning asosiy cheklovi esa xususiyatlarni ko‘pincha inson mutaxassis tomonidan oldindan belgilash zaruratidir. Chuqur o‘rganish texnologiyalarining rivojlanishi ushbu muammoni sezilarli darajada o‘zgartirdi. Deep Convolutional Neural Networks (CNN) tasvirdagi muhim xususiyatlarni avtomatik ravishda o‘rganish imkonini beradi. 2023-yilda chop etilgan chuqur CNN asosidagi vizual nuqsonlarni aniqlash bo‘yicha keng qamrovli sharhda chuqur o‘rganish usullari zamonaviy avtomatik optik inspeksiya tizimlarining asosiy metodologik bazasiga aylangani ko‘rsatilgan. Tadqiqotlarda klassifikatsiya va segmentatsiya uchun nazoratli o‘qitish, shuningdek, belgilangan ma’lumotlar yetishmaydigan holatlarda nazoratsiz yondashuvlardan foydalanish masalalari ham tahlil qilingan. Shu nuqtayi nazardan, mazkur tadqiqotda mahsulotning sifat holatini

intellektual raqamli identifikatsiyalash bilan bir qatorda, aniqlangan nuqsonning ishlab chiqarish liniyasidagi fizik obyektga bog‘lanishi va mahsulotning keyingi harakatini avtomatik boshqarish masalasiga alohida e’tibor qaratiladi. Taklif etilayotgan yondashuv kompyuter ko‘rishi, sun’iy intellekt, raqamli identifikatsiya, sensorlar, PLC, konveyer va aktuatorlarni yagona kiber-fizik tizim sifatida ko‘rib chiqishi bilan mavjud yondashuvlarni to‘ldiradi. Shunday qilib, adabiyotlar tahlili asosida quyidagi ilmiy xulosa shakllantiriladi: zamonaviy ishlab chiqarish uchun faqat yuqori aniqlikdagi nuqsonlarni aniqlash algoritmini yaratish yetarli emas. Samarali aqlli sifat nazorati tizimi mahsulotni aniqlash, uning sifat holatini baholash, individual raqamli identifikator bilan bog‘lash, ishlab chiqarish liniyasidagi koordinatasini aniqlash, tegishli boshqaruv qarorini shakllantirish va fizik aktuator orqali mahsulot harakatini boshqarishni yagona tizimda amalga oshirishi lozim. Aynan mana shu integrallashgan yondashuv “Industry 4.0” sharoitida mahsulot sifatini boshqarishning istiqbolli ilmiy yo‘nalishini tashkil etadi.

Muhokama. Mazkur tadqiqot doirasida mahsulotlarning sifat holatini intellektual raqamli identifikatsiyalash va nuqsonli mahsulotlar harakatini avtomatlashtirilgan boshqarish masalasi kompleks tizim sifatida ko‘rib chiqildi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, zamonaviy ishlab chiqarish sharoitida mahsulot sifatini nazorat qilishni faqat yakuniy vizual tekshiruv bilan cheklash yetarli emas. Sifatni baholash, mahsulotni identifikatsiyalash, nuqsonni tasniflash, mahsulotning ishlab chiqarish liniyasidagi joylashuvini kuzatish va tegishli yo‘nalishga avtomatik yuborish jarayonlarini yagona raqamli boshqaruv tizimiga birlashtirish ishlab chiqarish samaradorligini sezilarli oshirishi mumkin. Tadqiqotda taklif etilgan tizimning asosiy konsepsiyasi “mahsulotni aniqlash – tasvirni olish – raqamli tahlil – sifat holatini baholash – identifikatsiya qilish – harakatni kuzatish – avtomatik saralash” ketma-ketligiga asoslanadi. Mazkur ketma-ketlik mahsulotning ishlab chiqarish liniyasidagi fizik holati bilan uning raqamli modeli o‘rtasida uzviy bog‘liqlikni ta’minlaydi. Natijada har bir mahsulot bo‘yicha nafaqat uning sifat holati, balki ishlab chiqarish jarayonidagi harakat yo‘nalishi haqida ham ma’lumot olish imkoniyati paydo bo‘ladi.

Intellektual sifat nazoratining samaradorligi. An’anaviy sifat nazoratida mahsulotni baholash ko‘pincha operatorning tajribasi va vizual kuzatuviga bog‘liq bo‘ladi. Bunday yondashuv kichik hajmdagi ishlab chiqarishda ma’lum darajada samarali bo‘lishi mumkin, ammo yuqori tezlikdagi avtomatlashtirilgan liniyalarda inson omili muhim cheklovga aylanadi. Operatorning charchashi, diqqatning susayishi, subyektiv qaror qabul qilishi va bir xil turdagi nuqsonlarni uzoq vaqt davomida aniqlashdagi qiyinchiliklar sifat nazoratining barqarorligiga ta’sir ko‘rsatadi. Intellektual raqamli nazorat tizimida esa mahsulot tasviri kamera orqali olinib, algoritmik qayta ishlashdan o‘tkaziladi. Sun’iy intellekt modeli mahsulotning normal va nuqsonli holatlari o‘rtasidagi farqlarni aniqlashga imkon beradi. Bunda inson operatorining vazifasi to‘liq yo‘qolib ketmaydi, balki nazorat jarayonini boshqarish, modelni yangilash, favqulodda vaziyatlarni nazorat qilish va tizimning texnik holatini kuzatish kabi yuqori darajadagi funksiyalarga o‘tadi. Shu jihatdan, taklif etilayotgan tizim insonni to‘liq almashtirishdan ko‘ra, inson va sun’iy intellekt imkoniyatlarini optimal birlashtirishga qaratilgan. Ayniqsa, mahsulotlarning soni ko‘p bo‘lgan va har bir mahsulotni qisqa vaqt ichida tekshirish talab qilinadigan ishlab chiqarish liniyalarida bu yondashuvning amaliy ahamiyati yuqori.

Kompyuter ko‘rishi asosida nuqsonlarni aniqlash. Tizimning asosiy komponentlaridan biri kompyuter ko‘rishi hisoblanadi. Kamera yordamida mahsulotning raqamli tasviri olinadi va tasvir dastlabki qayta ishlash bosqichidan o‘tkaziladi. Ushbu bosqichda shovqinni kamaytirish, tasvirni normallashtirish, kontrastni yaxshilash, obyektni fondan ajratish va kerakli tasvir sohasini aniqlash kabi operatsiyalar bajarilishi mumkin. Keyingi bosqichda tasvir sun’iy intellekt modeliga uzatiladi. Model mahsulotning tashqi xususiyatlarini tahlil qilib, uning sifat holatini aniqlaydi. Masalan, mahsulot sirtida yoriq, tirnalish, deformatsiya, rang o‘zgarishi, yetishmayotgan komponent yoki boshqa nuqson mavjud bo‘lsa, model ushbu holatni tegishli sinfga ajratishi mumkin. Bu jarayonda faqat “nuqson bor” yoki “nuqson yo‘q” degan qaror bilan cheklanmaslik maqsadga muvofiq. Tizim nuqsonning turini, joylashuvini va imkon qadar darajasini ham aniqlashi kerak. Bunday yondashuv ishlab chiqarish jarayonidagi keyingi qarorlarni aniqroq shakllantirish imkonini beradi.

Sun’iy intellekt modelining ishlab chiqarish sharoitidagi xususiyatlari. Tadqiqot natijalarining muhokamasi shuni ko‘rsatadiki, ishlab chiqarish sharoitida sun’iy intellekt modelining samaradorligi uning laboratoriya ma’lumotlaridagi aniqligidan tashqari, real muhitga moslashuvchanligi bilan ham belgilanadi. Ishlab chiqarish liniyasida yorug‘lik sharoitining o‘zgarishi, kamera vibratsiyasi, mahsulotning turli burchaklarda joylashishi, konveyer tezligining o‘zgarishi, mahsulotlarning bir-biriga yaqin kelishi va fonning murakkabligi modelning natijasiga ta’sir qilishi mumkin. Shu sababli modelni o‘qitishda turli sharoitlarda olingan ma’lumotlardan foydalanish muhim. Data augmentation usullaridan foydalanish ham modelning barqarorligini oshirishi mumkin. Tasvirni aylantirish, masshtablash, yorqinlikni o‘zgartirish, shovqin qo‘shish, kesish va boshqa transformatsiyalar orqali model turli real sharoitlarga moslashtiriladi. Bundan tashqari, mahsulotlar assortimentining o‘zgarishi ham hisobga olinishi kerak. Yangi mahsulot modeli ishlab chiqarishga kiritilganda mavjud model barcha nuqsonlarni to‘g‘ri aniqlay olmasligi mumkin. Shu sababli tizimning doimiy ravishda yangi ma’lumotlar bilan boyitilishi va modelni qayta o‘qitish imkoniyatiga ega bo‘lishi muhim.

Raqamli identifikatsiya va mahsulotning “raqamli izi”. Tadqiqotning muhim jihatlaridan biri mahsulot sifatini uning raqamli identifikatori bilan bog‘lashdir. Har bir mahsulotga individual ID biriktirilishi natijasida ishlab chiqarish jarayonida mahsulotning raqamli profili shakllanadi.

Masalan, mahsulotning raqamli profilida quyidagi ma’lumotlar saqlanishi mumkin:

Ko‘rsatkich	**Mazmuni**
Product ID	Mahsulotning individual identifikatori
Partiya	Ishlab chiqarish partiyasi
Vaqt	Ishlab chiqarilgan vaqt
Liniya	Ishlab chiqarish liniyasi
Sifat holati	Sifatli yoki nuqsonli
Nuqson turi	Aniqlangan nuqson kategoriyasi
Ishonchlilik	AI modelining qaror ishonchliligi
Yo‘nalish	Mahsulot yuboriladigan liniya
Yakuniy holat	Saralashdan keyingi holat

Bunday ma’lumotlar bazasi ishlab chiqarish jarayonining traceability, ya’ni kuzatuvchanligini ta’minlaydi. Agar ma’lum bir mahsulotda nuqson aniqlansa, uning qayerda va qachon ishlab chiqarilgani, qaysi partiyaga tegishli ekani hamda qanday sifat nazoratidan o‘tgani aniqlanishi mumkin. Bu ayniqsa farmatsevtika, oziq-ovqat, avtomobilsozlik va elektronika kabi mahsulot xavfsizligi va sifatining yuqori darajada nazorat qilinishi talab qilinadigan tarmoqlarda muhim ahamiyatga ega.

Nuqsonli mahsulotlarning harakatini avtomatik boshqarish. Tizimning boshqa muhim elementi — aniqlangan nuqson asosida mahsulotning keyingi harakatini avtomatik boshqarishdir. Kamera va AI modeli nuqsonni aniqlagandan so‘ng, boshqaruv tizimi mahsulotning konveyerdagi holatini kuzatadi va tegishli aktuatorni ishga tushirish uchun signal hosil qiladi.

Agar kamera va ajratuvchi mexanizm orasidagi masofa L, konveyer tezligi esa V bo‘lsa, mahsulotning aktuatorgacha yetib borish vaqti:

$$t_a = \frac{L}{V}$$

ko‘rinishida aniqlanadi.

Agar tizimning umumiy qayta ishlash vaqti t_p bo‘lsa, boshqaruv signali mahsulot aktuator zonasiga yetib kelishidan oldin shakllanishi kerak. Demak, tizimning umumiy kechikishi:

$$t_{total} = t_{capture} + t_{processing} + t_{decision} + t_{communication}$$

ko‘rinishida baholanishi mumkin.

Bu yerda:

– $t_{capture}$ — tasvirni olish vaqti;

– $t_{processing}$ — tasvirni qayta ishlash va AI modelida tahlil qilish vaqti;

– $t_{decision}$ — boshqaruv qarorini shakllantirish vaqti;

– $t_{communication}$ — boshqaruv signalining aktuatorgacha yetib borish vaqti.

Tizim to‘g‘ri ishlashi uchun:

$$t_{total} < t_a$$

sharti bajarilishi lozim.

Mazkur shart ishlab chiqarish liniyasining tezligi oshgan sari ayniqsa muhimlashadi. Shu sababli real vaqt rejimidagi ishlab chiqarishda AI modelining aniqligi bilan bir qatorda uning ishlash tezligi ham asosiy mezonlardan biri bo‘lishi kerak.

PLC va aktuatorlarning integratsiyasi. Mahsulotni avtomatik saralash jarayonida PLC muhim boshqaruv elementi sifatida ishlatilishi mumkin. AI tizimi tomonidan aniqlangan natija PLC ga uzatiladi va PLC mahsulotning holatiga qarab tegishli aktuatorni ishga tushiradi.

Masalan, sifatli mahsulot uchun:

$$Q = 1$$

nuqsonli mahsulot uchun:

$$Q=0$$

kabi ikkilik boshqaruv signallaridan foydalanish mumkin.

Biroq murakkab ishlab chiqarish liniyasida ko‘p darajali signal tizimidan foydalanish samaraliroq bo‘lishi mumkin:

$$Q\in\{A,B,C,D\}$$

Bu holatda har bir mahsulot kategoriyasi uchun alohida harakat yo‘nalishi belgilanadi.

PLC tomonidan boshqariladigan aktuator sifatida pnevmatik silindr, servo mexanizm, robot manipulyator yoki boshqa ijro qurilmalaridan foydalanish mumkin. Aktuator tanlovi mahsulotning massasi, o‘lchami, konveyer tezligi va ishlab chiqarish sharoitiga bog‘liq.

Tizimning aniqligini baholash. Taklif etilayotgan tizimni baholashda faqat umumiy aniqlik ko‘rsatkichi bilan cheklanmaslik lozim. Mahsulot sifatini avtomatik aniqlashda quyidagi ko‘rsatkichlardan foydalanish maqsadga muvofiq:

Precision:

$$Precision=\frac{TP}{TP+FP}$$

Recall:

$$Recall=\frac{TP}{TP+FN}$$

F1-score:

$$F1=2\frac{Precision\cdot Recall}{Precision+Recall}$$

Bu yerda:

−TP— to‘g‘ri aniqlangan nuqsonlar;

−FP— noto‘g‘ri aniqlangan nuqsonlar;

−FN— tizim aniqlay olmagan nuqsonlar.

Ishlab chiqarish tizimi nuqtayi nazaridan false negative, ya’ni nuqsonli mahsulotni sifatli deb baholash ayniqsa xavfli bo‘lishi mumkin. Chunki bunday mahsulot keyingi texnologik bosqichga yoki iste’molchiga yetib borishi ehtimoli mavjud. Boshqa tomondan, false positive holatining ortishi ham iqtisodiy yo‘qotishlarga olib keladi. Sifatli mahsulotning nuqsonli deb baholanishi foydali mahsulotlarning bekor qilinishiga yoki ortiqcha qayta ishlanishiga sabab bo‘ladi. Shuning uchun amaliy tizimda precision va recall o‘rtasidagi optimal muvozanatni topish muhim.

Real vaqt rejimida ishlash masalasi. Tadqiqot natijalari ishlab chiqarish liniyasida real vaqt rejimida ishlash talabining alohida ahamiyatga ega ekanini ko‘rsatadi. Oddiy kompyuterda yuqori aniqlik bilan ishlaydigan AI modeli yuqori tezlikdagi konveyer uchun har doim ham mos kelavermaydi. Shu sababli modelni optimallashtirish, tasvir o‘lchamini kamaytirish, model arxitekturasini yengillashtirish, GPU yoki edge computing qurilmalaridan foydalanish mumkin. Edge computing yondashuvida tasvirni dastlabki qayta ishlash va AI inferensiyasi bevosita ishlab chiqarish liniyasiga yaqin qurilmada bajariladi. Bu ma’lumotlarning markaziy serverga uzatilishiga bog‘liq kechikishni kamaytiradi.

Natijada:

Kamera → Edge AI → PLC → Aktuator

ko‘rinishidagi tezkor boshqaruv zanjiri shakllanadi.

Bu yondashuv yuqori tezlikdagi ishlab chiqarish liniyalari uchun ayniqsa muhimdir.

IoT texnologiyalari bilan integratsiya. Taklif etilayotgan tizimni IoT texnologiyalari bilan integratsiyalash orqali ishlab chiqarish jarayonidan katta hajmdagi ma’lumotlarni yig‘ish va tahlil qilish imkoniyati yaratiladi. Sensorlar orqali konveyer tezligi, mahsulotlar soni, harorat, vibratsiya, aktuator holati va boshqa parametrlar nazorat qilinishi mumkin. Ushbu ma’lumotlar AI tizimi tomonidan mahsulot sifatini baholash bilan birgalikda tahlil qilinadi. Masalan, ma’lum bir vaqt oralig‘ida nuqsonli mahsulotlar sonining keskin oshishi ishlab chiqarish uskunasida nosozlik yoki texnologik parametrlarning o‘zgarishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Demak, sifat nazorati tizimi kelajakda faqat nuqsonni aniqlash emas, balki nuqsonlarning yuzaga kelish ehtimolini oldindan prognoz qilish funksiyasini ham bajarishi mumkin. Bu esa predictive quality va predictive maintenance konsepsiyalarini birlashtirish imkonini beradi.

O‘rganilgan adabiyotlarda sanoat mahsulotlaridagi nuqsonlarni aniqlash uchun deep learning, CNN, YOLO, object detection va anomaly detection usullaridan foydalanish samarali ekanligi ko‘rsatilgan. Biroq ko‘plab tadqiqotlar asosan tasvirni tahlil qilish va nuqsonni aniqlash masalasiga e’tibor qaratadi. Mazkur tadqiqotning farqli jihati esa nuqsonni aniqlash jarayonini mahsulotning raqamli identifikatsiyasi va fizik harakatini avtomatik boshqarish bilan bog‘lashdan iborat.

Ya’ni tizim quyidagi uzviy zanjirni shakllantiradi:

Mahsulot → Identifikatsiya → Kamera → AI tahlil → Sifat bahosi → Raqamli ID bilan bog‘lash → PLC → Aktuator → Avtomatik saralash → Ma’lumotlar bazasi.

Ushbu integratsiya mahsulotning ishlab chiqarishdagi butun hayotiy siklini raqamli nazorat qilish imkonini beradi. Taklif etilayotgan tizim konsepsiyasi ishlab chiqarish korxonalarining raqamli transformatsiyasi uchun muhim amaliy ahamiyatga ega. Tizimni mavjud ishlab chiqarish liniyasiga bosqichma-bosqich joriy etish mumkin. Birinchi bosqichda mahsulotlarni raqamli identifikatsiyalash va ma’lumotlar bazasini shakllantirish amalga oshiriladi. Ikkinchi bosqichda kamera va kompyuter ko‘rishi tizimi o‘rnatiladi. Uchinchi bosqichda AI asosidagi nuqsonlarni aniqlash modeli integratsiya qilinadi. To‘rtinchi bosqichda PLC va aktuatorlar bilan avtomatik saralash mexanizmi tashkil etiladi. Yakuniy bosqichda esa barcha komponentlar yagona monitoring va boshqaruv platformasiga birlashtiriladi. Bunday bosqichma-bosqich yondashuv korxonaga tizimni birdaniga to‘liq almashtirmasdan, mavjud infratuzilma asosida raqamli sifat nazoratiga o‘tish imkonini beradi. Umuman olganda, tadqiqot natijalari mahsulot sifatini nazorat qilishning kelajakdagi modeli faqat “tekshirish” funksiyasi bilan cheklanmasligini ko‘rsatadi. Aqlli ishlab chiqarish sharoitida sifat nazorati mahsulotni tanish, uning holatini baholash, natijani raqamli ma’lumotga aylantirish, mahsulotni ishlab chiqarish liniyasida kuzatish va aniqlangan holatga muvofiq fizik boshqaruv qarorini avtomatik amalga oshirishni o‘z ichiga olishi kerak. Shu nuqtayi nazardan, intellektual raqamli identifikatsiyalash va avtomatlashtirilgan harakat boshqaruvining integratsiyasi “Industry 4.0” tamoyillariga mos keluvchi kiber-fizik ishlab chiqarish tizimini shakllantirishga xizmat qiladi. Bunday tizimlar kelajakda nafaqat mavjud nuqsonlarni aniqlash, balki ularning kelib chiqishini prognoz qilish, ishlab chiqarish

parametrlarini avtomatik optimallashtirish va “zero-defect manufacturing” konsepsiyasiga yaqinlashish imkonini berishi mumkin.

Xulosa. Olib borilgan tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, zamonaviy ishlab chiqarish korxonalarida mahsulot sifatini nazorat qilish, nuqsonlarni o‘z vaqtida aniqlash va aniqlangan mahsulotlarning keyingi harakatini avtomatik boshqarish ishlab chiqarish samaradorligini oshirishning muhim shartlaridan biridir. An’anaviy vizual nazorat usullarida inson omilining mavjudligi, nazorat jarayonining nisbatan sekinligi va subyektiv baholash ehtimoli mahsulot sifatini barqaror nazorat qilish imkoniyatlarini cheklashi mumkin. Shu sababli sun’iy intellekt, kompyuter ko‘rishi, raqamli identifikatsiya, IoT va avtomatlashtirilgan boshqaruv texnologiyalarini yagona tizimga integratsiyalash dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi. Tadqiqotda mahsulotlarning sifat holatini intellektual raqamli identifikatsiyalash va nuqsonli mahsulotlar harakatini avtomatlashtirilgan boshqarishning konseptual modeli taklif etildi. Ushbu model mahsulotni individual raqamli identifikatsiyalash, uning tasvirini olish, tasvirni qayta ishlash, sun’iy intellekt yordamida sifat holatini aniqlash, nuqson turini klassifikatsiyalash, mahsulotning ishlab chiqarish liniyasidagi holatini kuzatish va tegishli aktuator yordamida avtomatik saralash jarayonlarini o‘zaro bog‘laydi. Tadqiqotning muhim natijalaridan biri mahsulotning sifat holati bilan uning raqamli identifikatorini bog‘lash imkoniyatining asoslanganidir. Bunday yondashuv har bir mahsulot bo‘yicha ishlab chiqarilgan vaqt, partiya, texnologik liniya, aniqlangan nuqson turi, sifat holati va keyingi harakat yo‘nalishi kabi ma’lumotlarni yagona raqamli profilga birlashtirish imkonini beradi. Natijada ishlab chiqarish jarayonida mahsulotning kuzatuvchanligi oshadi va nuqsonlarning kelib chiqish manbalarini aniqlash uchun qo‘shimcha imkoniyat yaratiladi. Kompyuter ko‘rishi va sun’iy intellekt texnologiyalaridan foydalanish mahsulotlarni real vaqt rejimida avtomatik tekshirish imkonini beradi. Ayniqsa, chuqur o‘rganish algoritmlaridan foydalanish murakkab shakl, tekstura va sirt xususiyatlariga ega mahsulotlarda nuqsonlarni aniqlash imkoniyatini kengaytiradi. Bunda tizimning samaradorligi faqat aniqlik ko‘rsatkichi bilan emas, balki precision, recall, F1-score, false positive, false negative va inference time kabi ko‘rsatkichlarning majmuaviy qiymatlari orqali baholanishi maqsadga muvofiq. Umuman olganda, mahsulotlarning sifat holatini intellektual raqamli identifikatsiyalash va nuqsonli mahsulotlar harakatini avtomatlashtirilgan boshqarish tizimi zamonaviy “Industry 4.0” konsepsiyasiga mos keluvchi samarali kiber-fizik ishlab chiqarish yechimi sifatida baholanishi mumkin. Mazkur yondashuv mahsulot sifatini oshirish, ishlab chiqarish jarayonining shaffofligi va kuzatuvchanligini ta’minlash, inson omilini kamaytirish, resurslardan samarali foydalanish hamda ishlab chiqarish korxonalarining raqamli transformatsiyasini jadallashtirish uchun muhim ilmiy-amaliy asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Zheng X., Zheng S., Kong Y., Chen J. Recent advances in surface defect inspection of industrial products using deep learning techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 113. P. 35–58.
2. *Image Based Quality Inspection in Smart Manufacturing Systems: A Literature Review*. *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 103. P. 262–267.

3. *Smart Manufacturing Applications for Inspection and Quality Assurance Processes*. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 198. P. 536–541.
4. *Industrial Defect Detection Through Computer Vision: A Survey*. IEEE International Conference on Data Science in Cyberspace. 2022.
5. *Deep CNN-Based Visual Defect Detection: Survey of Current Literature*. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 148. Article 103911.
6. *AI and Computer Vision-Based Real-Time Quality Control: A Review of Industrial Applications*. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 231. P. 212–220.
7. Ma Y., Yin J., Huang F., et al. Surface defect inspection of industrial products with object detection deep networks: a systematic review. *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57. Article 333.
8. *A Survey of Deep Learning for Industrial Visual Anomaly Detection*. *Artificial Intelligence Review*. 2025. Vol. 58. Article 279.
9. Nahar L., Awrangjeb M., Islam M. S. AI-enabled defect detection in industrial products: A comprehensive survey, key insights and future research challenges. *Advanced Engineering Informatics*. 2026. Vol. 69. Article 104067.
10. *Machine Learning-Powered Vision for Robotic Inspection in Manufacturing: A Review*. *Sensors*. 2026. Vol. 26, No. 3. Article 788.
11. *YOLO-Based Visual Inspection in Industry 4.0: A Comprehensive Review of Smart Manufacturing Applications*. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2026. Vol. 20, No. 1.
12. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 436–444.
13. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.
14. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. 2nd ed. Cham: Springer, 2022.
15. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th ed. Pearson, 2021.
16. Bishop C. M., Bishop H. *Deep Learning: Foundations and Concepts*. Springer, 2024.
17. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 52. P. 173–178.
18. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23.
19. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2018. Vol. 48. P. 157–169.
20. Kusiak A. Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*. 2018. Vol. 56, No. 1–2. P. 508–517.