UNIVERZA V LJUBLJANI
EKONOMSKA FAKULTETA

DIPLOMSKO DELO

# RAZVOJ TRGA HUMANOIDNE ROBOTIKE IN ANALIZA MOŽNOSTI VPELJAVE V PROIZVODNJO

Ljubljana, junij 2026 LUKA KRAJNIK

# IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Luka Krajnik, študent Univerze v Ljubljani Ekonomske fakultete, avtor predloženega dela z naslovom Razvoj trga humanoidne robotike in analiza možnosti vpeljave v proizvodnjo, pripravljenega v sodelovanju z mentorjem red. prof. dr. Petrom Trkmanom

I Z J A V L J A M

1. da sem predloženo delo pripravil samostojno;

2. da je tiskana oblika predloženega dela istovetna njegovi elektronski obliki;

3. da je besedilo predloženega dela jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo pisnih del UL EF, kar pomeni, da sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam oziroma navajam v besedilu, citirana oziroma povzeta v skladu z Navodili za izdelavo pisnih del UL EF;

4. da se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku Republike Slovenije;

5. da se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predloženega dela dokazano plagiatorstvo lahko predstavljalo za moj status na Univerze v Ljubljani Ekonomski fakulteti v skladu z relevantnim pravilnikom;

6. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v predloženem delu in jih v njem jasno označil;

7. da sem pri pripravi predloženega dela ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

8. da soglašam, da se elektronska oblika predloženega dela uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

9. da na Univerzo v Ljubljani neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve predloženega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja predloženega dela na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija Univerze v Ljubljani;

10. da hkrati z objavo predloženega dela dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v njem in v tej izjavi;

11. da sem preveril verodostojnost informacij, ki izhajajo iz zapisov na podlagi uporabe orodij umetne inteligence.

V Ljubljani, dne 4. 6. 2026 Podpis študenta: Luka Krajnik

**POVZETEK**

V diplomskem delu je obravnavano področje humanoidne robotike, ki se uveljavlja kot eno najbolj dinamičnih in obetavnih področij sodobne tehnologije. Diplomsko delo sledi trem ciljem: i) opredeliti konceptualne in tehnološke temelje humanoidne robotike, ii) analizirati globalni trg ter iii) razviti okvir za oceno ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnih robotov v proizvodnjo. Razvita sta model celotnih stroškov lastništva in model prihrankov stroškov dela, združena v enoten simulacijski model neto sedanje vrednosti prihrankov zaradi uvedbe humanoidnega robota v proizvodnjo. S tem delo prispeva k bolj sistematični obravnavi stroškovne strukture in metodologije ocene ekonomske upravičenosti ter omogoča opredelitev točke preloma glede na različne scenarije tehnološkega razvoja in cenovne dinamike.

**KLJUČNE BESEDE:** humanoidna robotika, splošnonamenski sistemi, sodelovanje človek-robot, analiza stroškov in koristi, stroškovni model, model prihrankov, industrija 5.0

**CILJI TRAJNOSTNEGA RAZVOJA**




**ABSTRACT**

This thesis examines the field of humanoid robotics, which is emerging as one of the most dynamic and promising areas of modern technology. The thesis pursues three objectives: i) to define the conceptual and technological foundations of humanoid robotics, ii) to analyze the global market, and iii) to develop a framework for assessing the economic viability of introducing humanoid robots into manufacturing. A total cost of ownership model and a labor cost savings model are developed and combined into a unified simulation model of the net present value of savings resulting from the introduction of a humanoid robot into production. This thesis contributes to a more systematic examination of the cost structure and the methodology for assessing economic viability, and enables the determination of the break-even point based on various scenarios of technological development and price dynamics.

**KEY WORDS:** humanoid robotics, general-purpose systems, human-robot collaboration, cost-benefit analysis, cost model, savings model, Industry 5.0

**SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS**



# KAZALO

**1 UVOD ..... 1**

**2 KONCEPTUALNI IN TEHNOLOŠKI OKVIR HUMANOIDNE ROBOTIKE ..... 2**

**2.1 Opredelitev humanoidne robotike ..... 2**

2.1.1 Antropomorfizem kot funkcionalna zasnova ..... 2

2.1.2 Humanoidni roboti kot splošnonamenski sistemi ..... 3

**2.2 Tehnološki temelji ..... 4**

2.2.1 Aktuatorji ..... 4

2.2.2 Krmilniki ..... 5

2.2.3 Omejitve trenutne tehnologije in ocena tehnološke zrelosti industrije ..... 5

**2.3 Zgodovinski razvoj ..... 7**

2.3.1 Začetki razvoja humanoidne robotike ..... 7

2.3.2 Razvoj raziskovalnih platform in naprednejša testna okolja (2000–2010) ..... 7

2.3.3 Pospešen razvoj in postopna uvedba v sodobno okolje (2010–2020) ..... 8

2.3.4 Sistematično testiranje v realnih okoljih in prehod iz faze tehnološkega sprožilca v fazo pretiranih pričakovanj (2020–2025) ..... 8

2.3.5 Vloga humanoidne robotike na prehodu iz Industrije 4.0 v Industrijo 5.0 ..... 9

**3 PREDSTAVITEV GLOBALNEGA TRGA HUMANOIDNE ROBOTIKE ..... 12**

**3.1 Napovedi velikosti trga in rasti ..... 12**

**3.2 Dejavniki razvoja trga ..... 13**

3.2.1 Ključni dejavniki na strani ponudbe ..... 13

3.2.2 Ključni dejavniki na strani povpraševanja ..... 14

**3.3 Verige vrednosti in ključni akterji ..... 16**

3.3.1 Opis verige vrednosti humanoidne robotike ..... 16

3.3.2 Opis ključnih akterjev ..... 16

**4 OKVIR ZA OCENO EKONOMSKE UPRAVIČENOSTI UPORABE HUMANOIDNE ROBOTIKE ..... 18**

**4.1 Metode za oblikovanje stroškovnega modela ..... 18**

**4.2 Model celotnih stroškov lastništva ..... 19**

4.2.1 Metodologija ..... 20

**4.3 Model prihrankov stroškov dela ..... 20**

4.3.1 Metodologija ..... 21

**4.4 Ocena ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnega robota ..... 21**
4.4.1 Metodologija ..... 21
4.4.2 Rezultati ..... 24
**5 SKLEP ..... 26**
**SEZNAM KLJUČNE LITERATURE ..... 27**
**LITERATURA IN VIRI ..... 28**

# KAZALO TABEL

Tabela 1: Predvideni izzivi Industrije 5.0, povezani s konceptom sodelovanja človek-robot . 11
Tabela 2: Predstavitev ključnih akterjev na trgu humanoidne robotike ..... 17
Tabela 3: Predpostavke modela NPV prihrankov stroškov dela ..... 22
Tabela 4: Predpostavke modela NPV prihrankov stroškov dela (nad.) ..... 23
Tabela 5: NPV prihrankov stroškov dela (v EUR; T = 10 let) ..... 24
Tabela 6: NPV prihrankov stroškov dela (v EUR; T = 5 let) ..... 25

# KAZALO SLIK

Slika 1: Ocena tehnološke zrelosti humanoidnega robota. ..... 6
Slika 2: Gartnerjev model Hype Cycle ..... 9
Slika 3: Napovedi velikosti globalnega trga humanoidne robotike (2025–2050) ..... 12
Slika 4: Obseg investicij v humanoidno robotiko (2022–2025) ..... 14
Slika 5: Staranje prebivalstva ..... 15
Slika 6: Shematski prikaz modela celotnih stroškov lastništva humanoidnega robota ..... 19

# SEZNAM KRATIC

angl. – angleško

**CBA** – (angl. Cost-benefit Analysis); analiza stroškov in koristi

**HRP** – (angl. Humanoid Robotics Project); projekt humanoidne robotike

**IT** – (angl. Information Technology); informacijska tehnologija

**LiDAR** – (angl. Light Detection and Ranging); svetlobno zaznavanje in merjenje

**LLMs** – (angl. Large Language Models); veliki jezikovni modeli

**NPV** – (angl. Net Present Value); neto sedanja vrednost

**PV** – (angl. Present Value); sedanja vrednost

**TCO** – (angl. Total Cost of Ownership); celotni stroški lastništva

**UI** – umetna inteligenca

**VLA** – (angl. Vision-Learning-Action); vid-učenje-ukrepanje

# 1 UVOD

Humanoidna robotika (angl. humanoid robotics), ki zajema razvoj robotov, zasnovanih po vzoru človeka, se v zadnjih letih uveljavlja kot eno najbolj dinamičnih področij sodobne tehnologije. Za razliko od tradicionalnih industrijskih robotov, ki so namenjeni ponavljajočim se nalogam v strukturiranih okoljih, so humanoidni roboti zasnovani kot splošnonamenski sistemi za delovanje v človeškem okolju ter neposredno interakcijo z ljudmi tudi v nestrukturiranih okoljih (Gu in drugi, 2025; Bradley in drugi, 2024; Siufung in Li, 2025). Ta razlika proizvodnim podjetjem odpira priložnosti za povečanje produktivnosti, hkrati pa poleg tehnoloških izzivov postavlja vprašanje ekonomske upravičenosti uvedbe v proizvodno okolje.

Analize vodilnih finančnih institucij kažejo, da humanoidna robotika ni več le raziskovalno področje, temveč osrednji del globalnega trga industrijske avtomatizacije. Investicijska banka Goldman Sachs (2024) je v enem letu svojo napoved velikosti trga humanoidne robotike zvišala za šestkrat, na 38 milijard USD do leta 2035, medtem ko Morgan Stanley ocenjuje, da bo trg do leta 2050 dosegel 4,7 bilijona USD (Du in drugi, 2024; Zhong in drugi, 2025).

Takšne projekcije odražajo konvergenco več dejavnikov: izrazit padec stroškov ključnih komponent, eksponentni napredek umetne inteligence, znatno povečanje naložb v razvoj humanoidnih robotov ter vertikalno integracijo dobavnih verig. Kljub temu se industrija sooča s številnimi tehnološkimi izzivi, povezanimi z omejeno življenjsko dobo baterij, zanesljivostjo komponent in kompleksnostjo krmiljenja, hkrati pa tudi s potrebo po vzpostavitvi modelov za oceno ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnih robotov v proizvodno okolje.

V diplomskem delu si zastavljam tri raziskovalne cilje:

- opredeliti konceptualne in tehnološke temelje humanoidne robotike, vključno z njenim zgodovinskim razvojem in ključnimi tehnološkimi ozkimi grli;
- predstaviti globalni trg humanoidne robotike z analizo napovedi velikosti trga, ključnih dejavnikov na strani ponudbe in povpraševanja ter opisom verige vrednosti in akterjev;
- razviti okvir za oceno ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnih robotov v proizvodnjo, ki omogoča opredelitev pogojev, pri katerih naložba postane smiselna.

Metodološki pristop diplomskega dela temelji na kombinaciji kvalitativne analize strokovne in znanstvene literature ter mnenj izbranih strokovnjakov na področju humanoidne robotike. Za podporo pri slogovni dodelavi besedila ter strukturiranju virov v skladu s standardi APA si bom pomagal tudi z orodji generativne umetne inteligence (ChatGPT, Perplexity).

Struktura diplomskega dela je zasnovana tako, da predstavi konceptualni in tehnološki okvir humanoidne robotike, njen zgodovinski razvoj, vključno z umestitvijo v kontekst prehoda iz industrije 4.0 v industrijo 5.0, ter globalni trg humanoidne robotike. Osrednji del diplomskega dela predstavlja razvoj okvira za oceno ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnih robotov, vključno s pregledom metodoloških pristopov ter oceno neto sedanje vrednosti (angl. net

present value, v nadaljevanju NPV) prihrankov, ki izhajajo iz njihove uvedbe. Diplomsko delo se zaključi s sklepom, ki povzema ključne ugotovitve.

# 2 KONCEPTUALNI IN TEHNOLOŠKI OKVIR HUMANOIDNE ROBOTIKE

## 2.1 Opredelitev humanoidne robotike

Koncept humanoidne robotike v strokovni literaturi nima povsem enotne definicije, saj se je njegov pomen skozi čas razvijal skupaj s tehnološkim napredkom in širitvijo področij uporabe. Ta odsotnost enotne definicije ni zgolj odraz nezrelosti področja, temveč nakazuje tudi na večplastnost samega koncepta, ki ga je težko zajeti z enoznačno opredelitvijo. Kljub temu avtorji soglašajo, da gre v splošnem za robotske sisteme, ki so zasnovani za delovanje v okoljih (in pogojih), ki jih je človek ustvaril zase, ter za izvajanje raznolikih fizičnih nalog ob neposredni interakciji z ljudmi (Nenchev in drugi, 2019; Sadaf in drugi, 2018; Yamane in Murai, 2018). Pri tem je ključno, da humanoidnost ne predstavlja cilja samega po sebi, temveč pristop, ki omogoča čim bolj neposreden prenos človeških sposobnosti na robotske sisteme.

Tovrstni roboti so torej v osnovi namenjeni samostojnemu delovanju v širokem spektru okolij, od proizvodnih obratov do gospodinjstev, storitvenih dejavnosti in celo območij naravnih nesreč, kjer naj bi opravljali kompleksne fizične naloge, ki vključujejo zaznavanje okolice ter uporabo orodij. Ne gre torej zgolj za nadomeščanje človeka, temveč za prevzemanje tistih vidikov njegovega delovanja, ki so v danih razmerah fizično naporni, nevarni ali ponavljajoči. Ključni cilj je doseči ali preseči produktivnost, primerljivo s človeško, ob hkratnem zagotavljanju varnega in učinkovitega sodelovanja z ljudmi, brez potrebe po obsežnem prilagajanju okolja (npr. proizvodnega procesa) robotu (Nenchev in drugi, 2019; Sheng in drugi, 2025; Gu in drugi, 2025). To pomeni, da se breme prilagajanja praviloma prenaša na humanoidnega robota, ne pa na okolico ali človeškega sodelavca, kar je tudi ena od ključnih prednosti humanoidnega robota pred specializiranimi robotskimi sistemi, zlasti v manj standardiziranih okoljih. Vendar se v prihodnosti, predvsem v bolj zaprtih oziroma standardiziranih okoljih, lahko pričakuje večja stopnja prilagajanja tudi na strani okolja.

### 2.1.1 Antropomorfizem kot funkcionalna zasnova

Obstoj specializiranih oblik, kot so robotske roke (angl. robotic arms) ali roboti na kolesih (angl. wheeled robots), odpira vprašanje o smiselnosti človeške oblike robota (Hong in drugi, 2025). Odgovor izhaja iz dejstva, da je svet zasnovan za ljudi (Hanbury in drugi, 2025); kot poudarja Jensen Huang, izvršni direktor podjetja NVIDIA, se ravno humanoidni roboti najlažje prilagajajo tem okoljem (Hong in drugi, 2025). Pri tem cilj ni posnemanje človeka v celoti, temveč selektivno prenašanje funkcionalno smiselnih vidikov, ki omogočajo učinkovito delovanje v okolju (Fitzpatrick in drugi, 2008). Antropomorfizem torej ni cilj sam po sebi,

temveč sredstvo, saj človeško obliko uporabljamo tam, kjer izboljšuje funkcionalnost in prilagodljivost robota, ne pa kot ideološko izhodišče.

Z vidika konstrukcije humanoidni roboti praviloma posnemajo anatomijo človeškega telesa, tj. imajo trup, glavo, oči, dve roki in dve nogi, pogosto tudi z gibljivimi prsti na dlaneh (Guang Yi Lu, 2011; Gu in drugi, 2025). Takšna sestava ni zgolj estetska izbira, temveč je funkcionalno pogojena s tremi ključnimi zahtevami: i) premikanjem v okolju, zasnovanem za človeške telesne mere in načine gibanja (npr. hoja po stopnicah), ii) uporabo orodij, oblikovanih za človeško roko in iii) izvajanjem kompleksnih nalog v dinamičnem, nestrukturiranem okolju (Guang Yi Lu, 2011; Fitzpatrick in drugi, 2008). Te tri zahteve skupaj nakazujejo, da humanoidna oblika postane smiselna predvsem takrat, ko želimo robota vključiti v obstoječe, že delujoče sisteme (stavbe, orodja, delovne procese), ne da bi jih morali predhodno prilagajati robotu.

Pri tem se postavlja vprašanje, kje poteka meja med funkcionalno upravičenim in nefunkcionalnim (zgolj estetskim) antropomorfizmom. Nekatere človeške lastnosti, kot je obraz, lahko služijo komunikaciji z ljudmi, druge, kot je na primer dvonožnost, pa niso nujno vedno funkcionalno smiselne (npr. pri premikanju po ravnih površinah) in so lahko celo manj učinkovite od koles. Humanoidna oblika torej ni nujno vedno optimalna, je pa ravno zaradi svoje zasnove v človeških merah in načinih delovanja najbolj univerzalno prilagodljiva. Prav ta univerzalnost predstavlja njeno ključno vrednost in hkrati enega osrednjih izzivov pri razvoju in komercializaciji takšnih robotov.

### 2.1.2 Humanoidni roboti kot splošnonamenski sistemi

Sodobne opredelitve umeščajo humanoidno robotiko v kontekst programabilnih splošnonamenskih sistemov (angl. programmable general-purpose systems), ki jih ločujejo od tradicionalnih industrijskih robotov. Slednji so stacionarni in specializirani za ponavljajoče se naloge v strukturiranih okoljih, medtem ko so humanoidni roboti prilagodljivi raznolikim nalogam tudi v nestrukturiranih okoljih (Gu in drugi, 2025; Bradley in drugi, 2024). Ta premik pomeni prehod od razvoja tehnologij za specifične probleme k razvoju sistemov, ki s svojimi zmožnostmi posnemajo človeka in tako obvladujejo vrsto različnih nalog (Siufung in Li, 2025). Vendar pa bistvo splošne namenskosti lahko razumemo ne le kot splošno univerzalnost sistema (tj. da bi robot opravljal vse naloge), temveč kot to, da ni vnaprej omejen na eno samo nalogo.

Ključna prednost splošnonamenskih sistemov je njihova vsestranskost. Humanoidni roboti ponujajo bistveno večjo prilagodljivost v primerjavi s specializiranimi rešitvami. Človeku podobna zasnova olajša usposabljanje in vključevanje v obstoječe delovne procese brez obsežnih prenov, hkrati pa je smotrno pričakovati, da bodo humanoidni roboti, tako kot tradicionalni roboti, lahko delovali 24 ur na dan (Siufung in Li, 2025; Hanbury in drugi, 2025).

Po drugi strani imajo splošne, za specifične naloge neopredeljene rešitve jasne pomanjkljivosti. Pogosto so manj učinkovite od specializiranih robotov, zlasti pri nalogah, ki zahtevajo visoko

natančnost in hitrost (Siufung in Li, 2025). Pri tem gre za temeljno omejitev, saj sta vsestranskost in učinkovitost pri izvajanju posamezne naloge praviloma v obratnem sorazmerju. Poleg tega razvoj in integracija humanoidnih robotov predstavljata pomembne tehnološke izzive ter lahko podaljšata čas komercializacije. Hkrati se odpirajo tudi etična vprašanja, predvsem glede zasebnosti in varstva podatkov, varnosti na delu in odgovornosti ter nadomeščanja oziroma izpodrivanja človeške delovne sile (Siufung in Li, 2025).

## 2.2 Tehnološki temelji

Za razumevanje delovanja humanoidnih robotov je ključen vpogled v njihovo tehnološko sestavo, saj ta določa njihove zmogljivosti in hkrati razkriva omejitve, s katerimi se soočajo pri delovanju v realnih okoljih. Čeprav se zasnove teh robotov v zadnjih letih močno razlikujejo, predvsem zaradi potrebe po zadovoljevanju različnih zahtev uporabe v razdrobljenih scenarijih končnih uporabnikov, je pri rešitvah na področju strojne opreme mogoče opaziti težnjo k visoki integraciji, zmanjšanju teže in inteligentnemu krmiljenju (Zhong in drugi, 2025).

Siufung in Li (2025) opredeljujeta štiri ključne komponente: možgane (angl. brain), senzorje (angl. sensors), telesne dele (angl. body parts) in napajanje (angl. power supply). Možgane sestavljajo strojna oprema in programski modeli umetne inteligence, senzorji (kamere, LiDAR, tipala) omogočajo zaznavanje okolja, telesni deli predstavljajo mehansko strukturo, ki omogoča gibanje, sistem napajanja pa zagotavlja energijo. Čeprav gre za shematično delitev, je z analitičnega vidika smiselna, saj omogoča ločeno obravnavo sklepanja, zaznavanja, mehanskega delovanja in napajanja.

Ključna tehnološka temelja sta aktuator in krmilnik. Medtem ko zaznavanje in napajanje predstavljata predvsem tehnološke izzive, aktuator in krmilnik skupaj določata temeljno razmerje med fizičnim gibanjem in njegovim nadzorom.

### 2.2.1 Aktuatorji

Aktuatorji (angl. actuators) so naprave, ki pretvarjajo električno energijo v mehansko (Hong in drugi, 2025; Uršič, 2009). Za razliko od tradicionalnih industrijskih robotov, ki uporabljajo od 3 do 6 aktuatorjev, humanoidni roboti potrebujejo od 18 do več kot 75 aktuatorjev, da posnemajo kompleksnost človeških sklepov (Hong in drugi, 2025).

Poznamo dve glavni vrsti aktuatorjev: linearne in rotacijske. Linearni aktuatorji ustvarjajo potisne ali vlečne gibe z enosmernim linearnim gibanjem in se uporabljajo v sklepih, ki zahtevajo linearno gibanje, kot so komolci in kolena. Rotacijski aktuatorji ustvarjajo rotacijski gib in se uporabljajo v humanoidnih robotih za dele, ki zahtevajo velik kot rotacije, kot so ramena, boki in trup (Hong in drugi, 2025).

### 2.2.2 Krmilniki

Krmilniki (angl. controllers) so elektronski ali programski sistemi, ki obdelujejo vhodne podatke in pošiljajo ukaze aktuatorjem. Njihovo delovanje je mogoče primerjati z možgani in živčnim sistemom, saj na podlagi senzorskih podatkov in vnaprej določenih algoritmov odločajo o tem, kdaj in kako se mora posamezni del robota premakniti. Za stabilno in natančno gibanje skrbijo povratne zanke (angl. feedback loops), ki v realnem času prilagajajo ravnotežje in silo (Hong in drugi, 2025).

Število krmilnikov v humanoidnem robotu je odvisno od njegove kompleksnosti in velikosti. Običajno ga sestavlja več vrst (Hong in drugi, 2025):

- glavni krmilnik (1–2 enoti), ki deluje kot osrednji možgani,
- motorni krmilniki (5–10 enot), ki upravljajo posamezne aktuatorje (sklepe, roke, noge),
- senzorski krmilniki (5–20 enot), ki obdelujejo podatke iz kamer in drugih senzorjev,
- komunikacijski krmilniki (1–2 enoti), ki skrbijo za izmenjavo podatkov med notranjimi in zunanjimi sistemi.

Ta hierarhična razdelitev krmiljenja odraža temeljno načelo sodobne robotike, in sicer decentralizirano obdelavo informacij, kjer višji nivoji določajo, kaj naj se zgodi glede na okolje in kontekst, nižji pa, kako to izvesti.

### 2.2.3 Omejitve trenutne tehnologije in ocena tehnološke zrelosti industrije

Kljub hitremu napredku je za širšo uveljavitev humanoidnih robotov treba nasloviti več ključnih tehnoloških izzivov (Zheng in drugi, 2025). Izzivi niso le tehnične narave, temveč so med seboj pogosto povezani, zato napredek na enem področju lahko hkrati omogoči ali omeji razvoj na drugem (npr. izboljšanje baterijske tehnologije lahko omogoči daljše delovanje robota, hkrati pa lahko poveča težo sistema, kar oteži funkcionalnost aktuatorjev in s tem poslabša gibljivost).

Baterije predstavljajo eno ključnih omejitev pri razvoju robotov. Po mnenju strokovnjakov trenutna življenjska doba baterij pogosto znaša okoli dve uri, vendar je ta močno odvisna od vrste robota in zahtevnosti nalog, ki jih opravlja. Pri energetsko intenzivnih opravilih je takšna zmogljivost praviloma nezadostna za učinkovito izvajanje dejanskih delovnih procesov. Poleg tega roboti trenutno večinoma še ne zmorejo popolnoma samostojnega polnjenja, kar dodatno omejuje njihovo uporabnost. Strokovnjaki ocenjujejo, da bodo bolj napredne rešitve na tem področju na voljo šele čez pet ali več let (Zheng in drugi, 2025).

V zvezi z aktuatorji se razvijalci soočajo z dvema glavnima izzivoma: kratko življenjsko dobo, sploh v primerjavi s tradicionalnimi industrijskimi roboti (približno dve leti) in visokimi stroški. Po navedbah Deutsche Bank (2025) pri trenutni ocenjeni ceni humanoidnega robota v višini približno 83.500 USD aktuatorji predstavljajo kar 80 % vrednosti. Vendar pa zaradi hitrega povečevanja proizvodnih zmogljivosti dobaviteljev komponent na Kitajskem strokovnjaki pričakujejo strmo znižanje stroškov v naslednjih dveh letih (Zheng in drugi, 2025).

Krmilniki so zaradi kompleksnosti humanoidnih robotov zahtevnejši od sistemov samovozečih avtomobilov. Medtem ko ima avtomobil štiri kolesa (tj. štiri prostostne stopnje), ima humanoidni robot 20–30 prostostnih stopenj (angl. degrees of freedom) (Zheng in drugi, 2025).

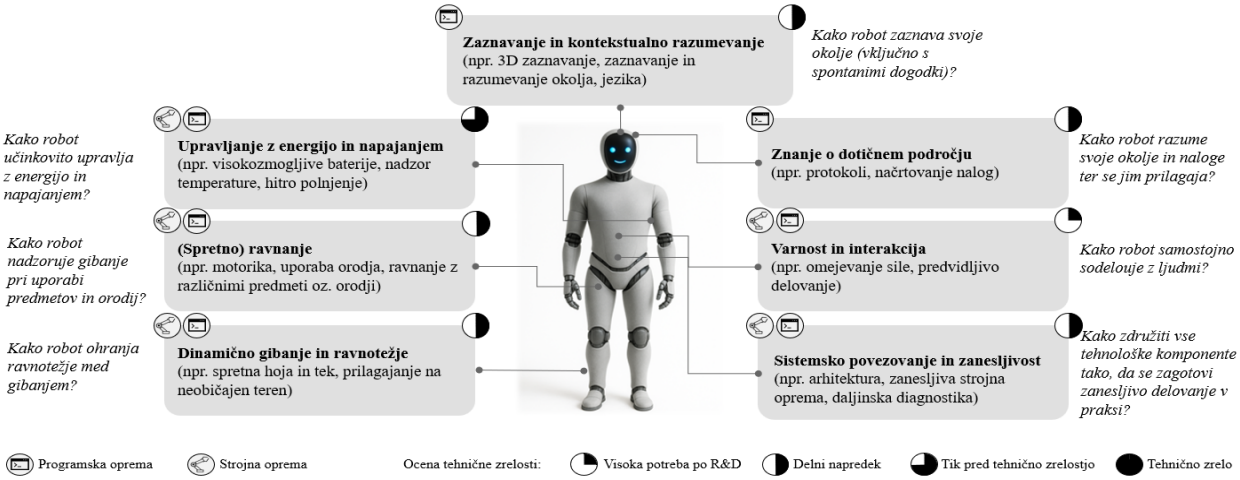
Veliki jezikovni modeli (angl. large language models) predstavljajo eno največjih ozkih grl. Čeprav se vedno pogosteje uporablja model vid-učenje-ukrepanje (angl. vision-language-action, v nadaljevanju VLA), ki združuje vid, jezik in dejanje, to ni dokončna rešitev. Model VLA namreč deluje tako, da vizualni vnos pretvori v jezik, nato pa veliki jezikovni model določi gib robota. Prav tako so sedanji veliki jezikovni modeli bolj prilagojeni dvodimenzionalnemu okolju (Zheng in drugi, 2025).

Ustrezni podatki so ključnega pomena za učenje modelov, vendar se ob tem pojavljata dva problema. Prvi je vrzel med simulacijo in resničnostjo. Roboti pogosto dosegajo dobre rezultate v simuliranem ali skrbno vnaprej pripravljenem okolju, medtem ko v resničnem svetu, kjer so razmere bolj nepredvidljive, pogosto ne delujejo enako zanesljivo oziroma odpovejo. Drugi problem je pomanjkanje kakovostnih podatkov iz resničnega sveta. Čeprav zbiranje podatkov prek daljinskega upravljanja izboljšuje uspešnost posameznih nalog, ne odpravlja temeljne težave omejenega posploševanja (Zheng in drugi, 2025).

Ta dva problema skupaj razkrivata širšo metodološko dilemo pri razvoju humanoidnih robotov. Na eni strani simulacije omogočajo hitro učenje, vendar pogosto ne zajamejo kompleksnosti okolja. Po drugi strani so podatki iz resničnega sveta bolj reprezentativni, a hkrati dragi, redki in težko standardizirani (Zheng in drugi, 2025).

V širšem smislu lahko ključne tehnološke izzive povzamemo v sedmih kategorijah: i) zaznavanje in kontekstualno razumevanje, ii) znanje o dotičnem področju, iii) varnost ter interakcije z ljudmi in predmeti, iv) sistemsko povezovanje in zanesljivost, v) dinamično gibanje in ravnotežje, vi) spretno ravnanje in vii) upravljanje z energijo in napajanjem. Slika 1 prikazuje oceno, kakšno stopnjo tehnološke zrelosti dosega vsaka od navedenih kategorij.

*Slika 1: Ocena tehnološke zrelosti humanoidnega robota*




*Vir: lastno delo na podlagi Sheng in drugi (2025); Zheng in drugi (2025); Du in drugi (2024); Tong in drugi (2024).*

## 2.3 Zgodovinski razvoj

Zgodovinski razvoj humanoidne robotike je mogoče razdeliti na več ključnih faz, ki odražajo prehod od raziskav v zaprtih akademskih laboratorijih h komercialno usmerjenim podjetjem, ki prek svojih platform testirajo uporabo humanoidnih robotov v različnih realnih okoljih. Ta prehod jasno odraža spremembo v razumevanju, čemu naj humanoidni roboti sploh služijo, in sicer od dokazovanja koncepta k reševanju konkretnih problemov (Pacucci, 2025).

### 2.3.1 Začetki razvoja humanoidne robotike

Zametki razvoja humanoidne robotike segajo v 50. leta 20. stoletja, ko so pionirji, kot sta George Devol in Isaac Asimov, oblikovali prve teoretične zasnove strojev, ki posnemajo človeško vedenje (Siufung in Li, 2025). Pomemben mejnik je bil leta 1969, ko je Ichiro Kato na japonski univerzi Waseda razvil prvega dvonožnega robota, leta 1973 pa model WABOT-1, ki velja za prvega humanoidnega robota polne velikosti z osnovnimi zmožnostmi zaznavanja, gibanja in komunikacije (Pacucci, 2025). Čeprav so bile njegove zmožnosti po današnjih merilih precej omejene, je WABOT-1 dokazal, da je humanoidna oblika tehnično uresničljiva.

Leta 1984 je bil predstavljen WABOT-2, namenjen igranju klavirja pevcu. Nekaj let kasneje so raziskave podjetja Honda pripeljale do razvoja modela P2, ki je imel 30 prostostnih stopenj in je dosegal hitrost hoje do 2 km/h (1986). V istem obdobju je pomemben napredek doseglo tudi podjetje Boston Dynamics, ki ima korenine na ameriški univerzi MIT, in sicer z razvojem koncepta dinamičnega krmiljenja ravnotežja (Pacucci, 2025; Siufung in Li, 2025).

V 90. letih 20. stoletja je bil dosežen tudi pomemben napredek na področju umetne inteligence in strojnega učenja, kar je robotom omogočilo učenje neposredno iz okolja ter izvajanje vse kompleksnejših nalog. Med pomembnejšimi dosežki izstopa Hondin ASIMO (2000), ki je pokazal napredne zmožnosti gibanja in interakcije. Ti preboji so po mnenju strokovnjakov pomembno prispevali k izboljšanju funkcionalnosti humanoidnih robotov (Siufung in Li, 2025).

### 2.3.2 Razvoj raziskovalnih platform in naprednejša testna okolja (2000–2010)

Do leta 2005 je robot ASIMO dosegel hitrost hoje 2 km/h in teka 6 km/h (Pacucci, 2025). Vzporedno se je pojavil tudi HRP-2 Promet (2002–2003), ki je bil visok približno 1,54 m, tehtal 58 kg in imel 30 prostostnih stopenj. Zaradi svoje zasnove se je lahko samostojno dvignil po padcu. HRP-2 ni bil namenjen komercializaciji, temveč je služil kot raziskovalna platforma za univerze in laboratorije (Pacucci, 2025; Kaneko in drugi, 2002).

V tem obdobju so se razmahnile tudi druge standardizirane platforme za raziskave in usposabljanje. Med njimi izstopa NAO, ki sta ga razvili podjetji Aldebaran in SoftBank (2010), saj je postal pomembno testno okolje za zaznavanje in načrtovanje prijema predmetov humanoidnih robotov (Pacucci, 2025; Müller in drugi, 2012). Poleg tega so se raziskave

razširile tudi na področje zdravstva, kjer so roboti začeli pomagati pri rehabilitaciji in oskrbi starejših (Siufung in Li, 2025).

### 2.3.3 Pospešen razvoj in postopna uvedba v sodobno okolje (2010–2020)

Od leta 2010 naprej smo priča hitremu napredku na področju mehanske robotike, umetne inteligence in senzorske tehnologije. Razvoj se osredotoča na ustvarjanje robotov, kot so opredeljeni v uvodnem poglavju, torej robotov, ki se lahko prilagajajo in učinkovito sodelujejo v človeških okoljih, s čimer prispevajo k večji splošni produktivnosti (Siufung in Li, 2025).

Pri Boston Dynamics so leta 2009 začeli raziskave humanoidnih robotov z razvojem robota Petman, namenjenega testiranju vojaških kemičnih oblek. Po neuspehu robotov pri opravljanju nalog med jedrsko nesrečo v Fukušimi so leta 2013 predstavili robota Atlas, zasnovanega za reševanje ob nesrečah in posebne (nevarne) operacije, z zmogljivostjo stabilne hoje po ruševinah. V naslednjem desetletju so pri Boston Dynamics izboljšali dinamično gibanje Atlasa, predvsem na področju krmiljenja, kar je omogočilo izvajanje kompleksnejših nalog (Siufung in Li, 2025).

Podjetje SoftBank je leta 2014 predstavilo robota Pepper, ki je bil zasnovan kot socialni robot za interakcijo s strankami v trgovinah. Pepper je bil sposoben prepoznavanja čustev prek analize obraza in tona glasu (Pacucci, 2025; Giaretta in drugi, 2018).

Razvoj se je nadaljeval tudi pri predhodno omenjenem Hondinem robotu ASIMO. V obdobju med letoma 2005 in 2018 so se namreč njegove zmožnosti dodatno izboljšale, vključno s skakanjem na eni in dveh nogah, premikanjem po stopnicah ter integracijo komponent za zaznavanje, manipulacijo in interakcijo (Sheng in drugi, 2025). ASIMO je bil sposoben izvajati različne naloge, kot so brcanje žoge, odpiranje steklenic, točenje vode, postrežba čaja in sledenje ljudem. Kljub tem dosežkom je bil projekt leta 2018 ukinjen zaradi visokih proizvodnih stroškov in omejenih možnosti širše uporabe (Siufung in Li, 2025).

### 2.3.4 Sistematično testiranje v realnih okoljih in prehod iz faze tehnološkega sprožilca v fazo pretiranih pričakovanj (2020–2025)

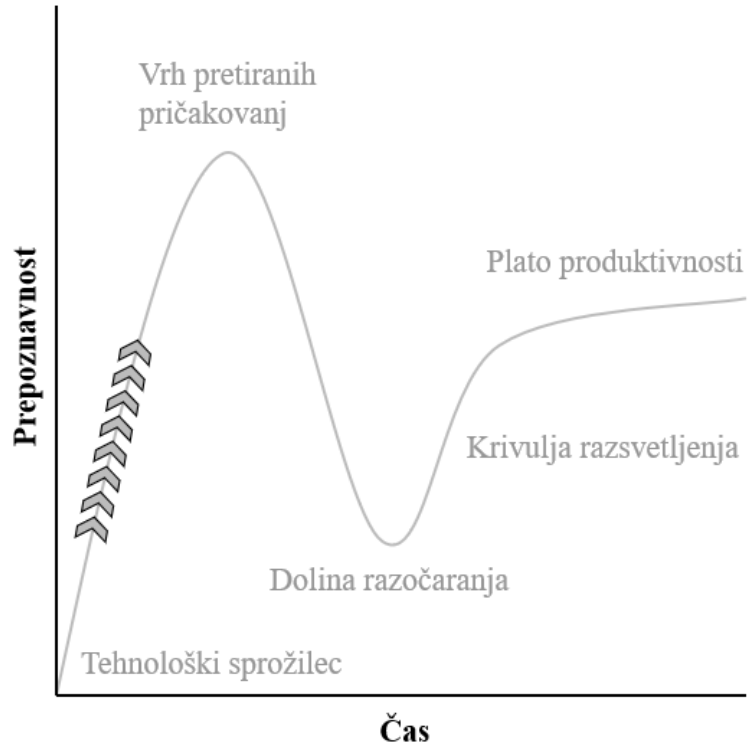
V obdobju 2020–2025 se je področje humanoidne robotike premaknilo v fazo sistematičnega testiranja robotov v realnih okoljih, kot so skladišča, proizvodne linije in logistični centri. Ključni premik predstavlja prehod od dokazovanja koncepta k preverjanju uporabnosti, zanesljivosti in ekonomske upravičenosti humanoidnih robotov v dejanskih delovnih procesih.

Poleg obstoječih akterjev, kot so Boston Dynamics, Unitree Robotics, Apptronik, 1X Technologies in UBtech, velja izpostaviti ustanovitev podjetja Figure AI leta 2022, ki se je hitro uveljavilo kot eden pomembnejših igralcev na trgu, ter napoved programa Tesla Optimus leta 2021. Humanoidni roboti se sistematično uvajajo v pilotne projekte z industrijskimi partnerji,

kot so BMW, Mercedes-Benz, Tesla, BYD in Geely v avtomobilski industriji in DHL, GXO Logistics, Arvato in Gap Inc. v logistiki.

V okviru Gartnerjevega modela Hype Cycle humanoidna robotika v tem obdobju prehaja iz faze tehnološkega sprožilca (angl. innovation trigger) v fazo pretiranih pričakovanj (angl. peak of inflated expectations), kot je razvidno iz slike 2 (Gartner, 2026a; Gartner 2026b; Gartner 2024). Ta premik je mogoče pripisati predvsem hitremu povečanju naložb v razvoj, intenzivni medijski izpostavljenosti in nerealističnim napovedim o skorajšnji široki komercialni uporabi humanoidnih robotov. Hkrati se že nakazuje naslednja faza, tj. dolina razočaranja (angl. trough of disillusionment), saj se izkazuje, da je implementacija humanoidnih robotov v kompleksna in nestrukturirana okolja bistveno zahtevnejša od prvotnih pričakovanj.

*Slika 2: Gartnerjev model Hype Cycle*




*Vir: lastno delo na podlagi Gartner (2026a) in Gartner (2026b).*

### 2.3.5 Vloga humanoidne robotike na prehodu iz Industrije 4.0 v Industrijo 5.0

Razvoj humanoidne robotike predstavlja prehod iz Industrije 4.0, ki temelji predvsem na digitalizaciji in avtomatizaciji proizvodnih procesov, v Industrijo 5.0, ki poudarja tesnejše sodelovanje med človekom in robotom ter postavlja človeka v središče delovnega okolja. Industrija 5.0 tako nadgrajuje obstoječe pristope Industrije 4.0 in usmerja razvoj v smer, kjer usposobljeni delavci in avtomatizirani sistemi delujejo skupaj za izboljšanje učinkovitosti in zmogljivosti (Yitmen in Almusaed, 2024; Müller, 2020).

V tem okviru se ponavljajoča, težka in monotona dela postopoma prenašajo na avtonomne sisteme, kot so humanoidni roboti, ki se lahko prilagajajo delovnim pogojem, medtem ko človek prevzema nadzorno, upravljavsko in ustvarjalno vlogo (Yitmen in Almusaed, 2024; Roveda, 2024; Evropska komisija; 2026).

Osrednji koncept tega prehoda je sodelovanje med človekom in robotom (angl. human–robot collaboration), ki predstavlja ključen element Industrije 5.0 (Demir in drugi, 2019; Yitmen in Almusaed, 2024). V proizvodnem okolju sodelovanje človek-robot označuje situacijo, v kateri človek in robot hkrati opravljata naloge v skupnem delovnem prostoru, pri čemer se združujejo njune komplementarne sposobnosti z namenom povečanja produktivnosti. Baratta in drugi (2023) pri tem razlikujejo več oblik interakcije med človekom in robotom, od sobivanja v istem delovnem okolju brez neposrednega sodelovanja do neposrednega sodelovanja, pri katerem človek in robot naloge izvajata usklajeno, sočasno in medsebojno odvisno.

Za učinkovito implementacijo Industrije 5.0 je ključno razviti napredne oblike interakcije med človekom in robotom, kar vključuje intuitivne načine komunikacije ter sposobnost robotov, da se prilagajajo okolju in zahtevam operaterja (Yitmen in Almusaed, 2024).

Humanoidni roboti imajo pri tem posebno vlogo, saj njihova oblika in funkcionalnost omogočata naravno vključevanje v obstoječa delovna okolja in uporabo standardnih orodij. S tem podpirajo razvoj t. i. kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov (angl. cyber-physical production systems), ki veljajo za ključno komponento Industrije 4.0 in kjer so fizični procesi povezani z digitalnimi tehnologijami, ki omogočajo sprotno zbiranje podatkov, analitiko in prilagajanje delovanja v realnem času, kar povečuje prilagodljivost, učinkovitost in odzivnost proizvodnje (Monostori, 2015; Yitmen in Almusaed, 2024). Humanoidni roboti predstavljajo pomemben povezovalni element med človekom in tovrstnimi sistemi. Zaradi svoje zasnove lahko delujejo v okoljih in z orodji, ki so bila prvotno zasnovana za človeka. Hkrati so opremljeni s senzorji in programsko opremo, ki jim omogočajo zaznavanje okolja, učenje ter prilagajanje nalogam v realnem času, zato ne delujejo zgolj kot izvajalci vnaprej določenih operacij, temveč kot aktivni del kibernetsko-fizičnega proizvodnega sistema.

Kljub tem prednostim uvedba humanoidnih robotov in širšega koncepta sodelovanja človek–robot odpira številna organizacijska, etična in družbena vprašanja. Med ključnimi izzivi so sprejemanje robotov v delovnem okolju, etična vprašanja ter prilagoditev organizacijskih struktur in izobraževalnih sistemov, kot je povzeto v tabeli 1 (Demir in drugi, 2019).

*Tabela 1: Predvideni izzivi Industrije 5.0, povezani s konceptom sodelovanja človek-robot*

| **Izzivi** | **Opis** |
|---|---|
| Pravna in regulativna vprašanja | Manjka enotna pravna definicija (humanoidnega) robota, saj obstoječe (znanstvene) definicije niso zavezujoče za podjetja. Potrebna je jasna razmejitev robotov od drugih avtomatiziranih sistemov ter opredelitev njihovih vlog, odgovornosti, dovoljenih odločitev o ljudeh, odgovornosti pri okvarah in mehanizmih certificiranja. |
| Osebne preference glede dela z roboti | Pričakovati je, da se bo odnos do robotov med posamezniki močno razlikoval. Ker sodelovanje človek-robot še ni dovolj razširjeno, te preference oblikujejo predvsem mediji, ne pa neposredne izkušnje. V skladu s tem gre poudariti, da negativen odnos zaposlenih lahko bistveno oteži (prepreči) uvedbo robotov v delovnem okolju. |
| Psihološke posledice sodelovanja človek-robot | Delo z roboti lahko povzroči nove psihološke učinke, vključno z morebitno »robofobijo«. Vpliv na posameznike in organizacijsko klimo bo nedvomno raziskovalna tema organizacijske robotike. |
| Socialne posledice sodelovanja človek–robot | Uvajanje robotov lahko zmanjša število človeških interakcij in spremeni socialno dinamiko na delovnem mestu. Posebej problematično je vprašanje socialnih norm do robotov. |
| Spreminjajoča se vloga kadrovskih oddelkov (HR) | HR oddelki bodo poleg obstoječih nalog odločali tudi o razporejanju nalog med ljudi in robote, kar povečuje kompleksnost njihove vloge in lahko vodi v organizacijsko preoblikovanje. |
| Spreminjajoča se vloga IT oddelkov in nastanek robotskih oddelkov | IT oddelki bodo sprva odgovorni za uvedbo in vzdrževanje robotov, kasneje pa se lahko oblikujejo specializirani robotski oddelki. Ključni izzivi bodo kibernetska varnost, upravljanje podatkov in zasebnost. |
| Etična vprašanja in status robotov | Robotizacija lahko spremeni razumevanje delovne etike, saj so roboti brez človeških omejitev. To odpira vprašanja njihovega etičnega statusa in oblikovanja novih norm vedenja v sodelovanju človek–robot. |
| Preference glede vrste robotov | Treba bo sprejeti kompromis med roboti z zmogljivostmi strojnega učenja in posledično bolj avtonomnim, a manj predvidljivim vedenjem ter na pravilih temelječimi roboti, ki so bolj predvidljivi, vendar omejeni. |
| Negativni odnos zaradi izgube delovnih mest | Strah pred izgubo delovnih mest lahko vodi v negativen odnos (odpor) do robotov, kljub temu da avtomatizacija zgodovinsko ustvarja nova delovna mesta. Prehod za vse skupine zaposlenih ni enostaven. |
| Tekmovanje ljudi z roboti ali dopolnjevanje ljudi z roboti | Obstajata dva pristopa: Roboti lahko delujejo kot dopolnitev ali kot konkurenca človeku. Prvi pristop razbremenjuje rutinska dela, drugi pa povečuje kompleksnost upravljanja in organizacijskih odnosov. |

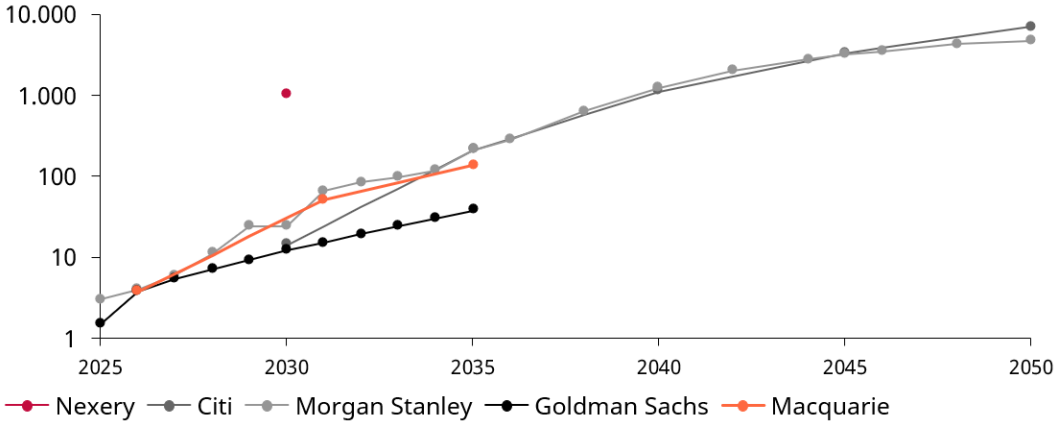
*Vir: prirejeno po Demir in drugi (2019).*

# 3 PREDSTAVITEV GLOBALNEGA TRGA HUMANOIDNE ROBOTIKE

## 3.1 Napovedi velikosti trga in rasti

Slika 3 prikazuje primerjalni pregled napovedi o velikosti trga humanoidne robotike za obdobje 2025–2050. Napovedi se med institucijami pomembno razlikujejo tako v absolutnih zneskih kot v časovni dinamiki rasti. Kljub temu večina projekcij nakazuje izrazito rast, pri čemer naj bi trg do leta 2035 dosegel med približno 40 in 200 milijard USD, do leta 2050 pa več bilijonov USD, odvisno od metodologije in scenarija posameznih institucij. Slika 3 razkriva tudi, da se razlike med napovedmi s časom povečujejo, krajši rok (2025–2030) je relativno skladen, medtem ko dolgoročne projekcije (2040–2050) kažejo izjemno širok razpon vrednosti.

*Slika 3: Napovedi velikosti globalnega trga humanoidne robotike (2025–2050); mrd. USD*




*Vir: Bock (2025); Garlick in drugi (2024); Zhong in drugi (2025); Du in drugi (2024); Hong in drugi (2025).*

Obstoječe napovedi o velikosti trga humanoidnih robotov se med institucijami pomembno razlikujejo predvsem zaradi različnih metodoloških pristopov in ključnih predpostavk. Goldman Sachs uporablja pristop od spodaj navzgor (angl. bottom-up), kjer napoved temelji na projekciji števila prodanih enot in pričakovane cene. Njihova nedavna revizija napovedi (z 6 mrd USD na 38 mrd USD do 2035) odraža napredek na področju umetne inteligence, vendar ostajajo previdni glede časovnega okvira, v katerem bo prišlo do pospešene komercialne uvedbe humanoidne robotike.

Morgan Stanley uporablja širši pristop, ki temelji na substituciji dela, pri čemer izhaja iz globalnega trga dela in ocenjuje potencialni naslovljivi trg na skoraj 5 bilijonov USD v letu 2050. Model predvideva zmerno začetno komercializacijo z izrazitim pospeškom po letu 2030. Podoben okvir uporablja tudi Citi, ki z modelom penetracijskih stopenj po sektorjih in regijah izpostavlja substitucijo dela kot ključen dejavnik rasti. Pri teh pristopih velja opozoriti, da

substitucija dela ni zgolj tehnično vprašanje, temveč nanjo vplivajo tudi regulativa, socialni dialog in družbeni odpor, kar tovrstni modeli praviloma težko zajamejo.

Macquarie in Nexery imata bolj agresiven pogled na kratkoročno dinamiko. Macquarie svojo napoved utemeljuje na analizi dobavnih verig ter pričakovani rasti proizvodnje ključnih akterjev v obdobju 2025–2026, medtem ko Nexery, podobno kot Goldman Sachs, uporablja pristop od spodaj navzgor, vendar z agresivnejšimi predpostavkami o zgodnji komercializaciji.

Tovrstne napovedi odražajo različne ocene o tem, kdaj bodo preseženi ključni tehnološki in ekonomski pragovi upravičenosti robotov v realnih okoljih (npr. cena na ravni človeškega delavca ter raven učinkovitosti in zanesljivosti pri opravljanju delovnih nalog). Zgornje napovedi je zato smiselno obravnavati kot scenarije, ki osvetljujejo območje možnega razvoja. Dejanska pot bo odvisna od tega, kako hitro bodo naslovljene omejitve, opisane v poglavju 2.2.3, ter kako se bodo razvijali dejavniki na strani ponudbe in povpraševanja.

## 3.2 Dejavniki razvoja trga

### 3.2.1 Ključni dejavniki na strani ponudbe

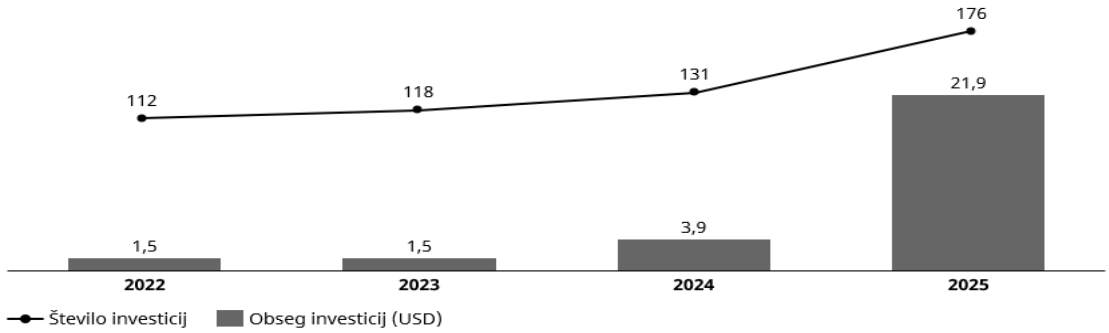
Na strani ponudbe razvoj trga humanoidne robotike v veliki meri poganja **izrazit padec stroškov ključnih komponent**, ki predstavlja temeljni ekonomski vzvod za širšo komercializacijo. Po ocenah Goldman Sachs (Du in drugi, 2024) so se ocenjeni proizvodni stroški humanoidnih robotov v obdobju enega leta znižali za približno 40 %, in sicer z razpona 50–250 tisoč USD na 30–150 tisoč USD na enoto. Takšna dinamika je rezultat konvergence več dejavnikov, med katerimi izstopajo tehnološki napredek v proizvodnji komponent, ekonomije obsega ter intenzivnejša cenovna konkurenca, zlasti s strani kitajskih proizvajalcev.

Pomemben dejavnik je tudi **napredek na področju umetne inteligence**, zlasti razvoj velikih jezikovnih modelov za robotiko (angl. robotic LLMs). Ključen cilj razvoja je omogočiti robotom, da se učijo postopno ter na podlagi omejenega števila primerov, namesto da bi zahtevali obsežno, vnaprej definirano programiranje za posamezne naloge. Takšen način učenja omogoča izvajanje kompleksnejših in nestrukturiranih nalog, kar bistveno povečuje uporabnost humanoidnih robotov in odpira možnost njihove širše komercialne uporabe v realnih proizvodnih okoljih (Du in drugi, 2024).

**Obseg investicij v humanoidno robotiko se je v zadnjih letih izrazito povečal**, kar dodatno krepi ponudbeno stran trga. Razpoložljivi podatki tveganega kapitala in tržnih analiz, prikazani na sliki 4, kažejo na večkratno rast skupnega zbranega kapitala med letoma 2021 in 2025, pri čemer humanoidna robotika izstopa kot eden najhitreje rastočih segmentov znotraj širšega področja robotike (CB Insights, 2026). Na Kitajskem država aktivno podpira razvoj domačih podjetij prek nacionalnih in lokalnih razvojnih skladov, davčnih spodbud ter usmerjenih industrijskih politik, ki humanoidne robote umeščajo med strateške prihodnje tehnologije. V

ZDA kapital zagotavljajo predvsem institucionalni in zasebni vlagatelji. Zgovoren primer je investicijski krog podjetja Figure AI ob koncu leta 2025 v višini približno 1 milijarde USD, pri katerem so sodelovala vodilna tehnološka podjetja, kot so Microsoft, NVIDIA in OpenAI.

*Slika 4: Obseg investicij v humanoidno robotiko (2022–2025); mrd. USD*




*Vir: CB Insights (2026).*

Pomemben strukturni dejavnik na strani ponudbe je tudi **pospešen prenos znanja iz sorodnih panog** (angl. knowledge spillover), predvsem iz avtomobilske industrije in razvoja električnih vozil. Podjetja, kot sta Tesla in Hyundai, izkoriščajo izkušnje na področjih masovne proizvodnje, baterijskih sistemov, elektromotorjev, pogonskih sistemov in programske opreme. Humanoidni roboti in električna vozila uporabljajo vrsto sorodnih komponent, kar omogoča učinkovitejšo rabo obstoječih dobavnih verig, proizvodne infrastrukture in organizacijskega znanja. To podjetjem z izkušnjami v avtomobilski industriji zagotavlja pomembno stroškovno in izvedbeno prednost pri vstopu na trg humanoidne robotike (Du in drugi, 2024).

Nazadnje ima pomembno vlogo tudi **vertikalna integracija**, torej razvoj in proizvodnja ključnih komponent znotraj posameznega podjetja. Vodilni akterji, kot so Tesla, Figure AI in Apptronik, vse pogosteje sami razvijajo ključne komponente, kot so aktuatorji, kar omogoča boljši nadzor nad stroški in kakovostjo, zmanjšuje odvisnost od ozkih grl v dobavnih verigah ter zagotavlja neposreden dostop do podatkov, ki so ključni za nadaljnji razvoj in izboljšave sistemov (Kelkar in drugi, 2025). Pomembno je, da vertikalna integracija prav tako omogoča hitrejše iteracije v razvoju, saj podjetja, ki proizvajajo humanoidne robote, niso pretirano odvisna od zunanjih dobaviteljev pri vsaki spremembi zasnove.

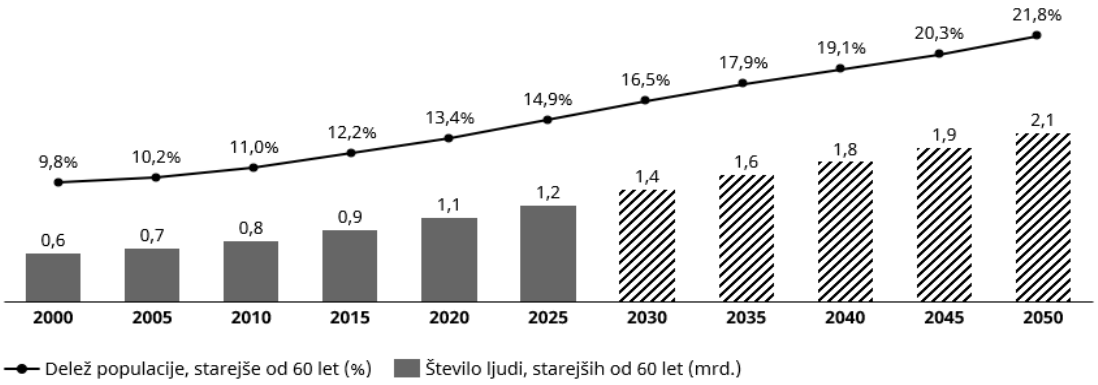
Ključno je razumeti, da padec stroškov povečuje investicijsko privlačnost, investicije in prenos znanja iz sorodnih panog omogočajo učinkovito vertikalno integracijo, le-ta pa še dodatno znižuje stroške. Skupaj tvorijo povratno zanko, ki pospešuje razvoj ponudbene strani trga.

### 3.2.2 Ključni dejavniki na strani povpraševanja

Na strani povpraševanja ima osrednjo vlogo demografski razvoj, predvsem **staranje prebivalstva v razvitih gospodarstvih**. Kot je razvidno iz slike 5, se delež starejšega prebivalstva v zadnjih 20 letih izrazito povečuje. Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije bo do leta 2050 na svetu več kot 2,1 milijarde ljudi (22 % celotnega prebivalstva),

starejših od 60 let (World Health Organization, 2025). To pomeni postopno zmanjševanje delovno sposobnega prebivalstva, zlasti v državah, kot so Japonska, Južna Koreja, Nemčija in Italija, kjer je ta trend že izrazit.

*Slika 5: Staranje prebivalstva*




*Vir: World Health Organization (2026).*

**Pomanjkanje delavcev v proizvodnji** dodatno spodbuja zanimanje za avtomatizacijo. Po podatkih Mednarodne federacije za robotiko je bilo leta 2024 po svetu nameščenih 542.000 industrijskih robotov, pri čemer se za leto 2025 napoveduje nadaljnja, približno 6-odstotna rast (Heer, 2025). To še posebej velja za naloge, ki so nevarne ali zdravju škodljive, saj jih je zaradi nestrukturiranih in nepredvidljivih razmer pogosto težko učinkovito avtomatizirati s tradicionalnimi industrijskimi roboti, pri čemer humanoidni roboti ponujajo prednost večje prilagodljivosti (Malik in drugi, 2024; Shamsuddoha in drugi, 2025).

Dodaten dejavnik je **naraščajoča kompleksnost industrijske proizvodnje in ciljno povečanje učinkovitosti**. Analize Svetovnega gospodarskega foruma in Boston Consulting Group poudarjajo, da kombinacija umetne inteligence, napredne avtomatizacije in robotike predstavlja enega ključnih vzvodov za dolgoročno rast produktivnosti v predelovalnih dejavnostih. Dober ilustrativen primer je avtomobilska industrija in proizvodnja električnih vozil, kjer napredni robotski sistemi omogočajo naprednejše zaznavanje napak, optimizacijo procesov ter hitrejše prilagajanje spremembam.

Vzporedno z zgoraj opisanim strmim upadom stroškov komponent je pričakovati **zniževanje cen humanoidnih robotov**. Pri tem velja opozoriti, da sama nizka cena še ne zagotavlja povpraševanja, saj je zahtevana učinkovitost visoka. Prav tako je pomembno, kako je ta cena strukturirana. Pomembno vlogo ima lahko poslovni model, ki zmanjšuje začetne stroške za podjetja. Novonastajajoči model najema robotov (angl. robot as a service), pri katerem podjetje plačuje redno uporabo namesto enkratnega nakupa, omogoča dostop do tehnologije tudi manjšim podjetjem. V takšen model so običajno vključeni tudi vzdrževanje, posodobitve programske opreme in druge podporne storitve. Nekatera podjetja, kot so Agility Robotics, Apptronik in 1X Technologies, že ponujajo tovrstne rešitve.

## 3.3 Verige vrednosti in ključni akterji

### 3.3.1 Opis verige vrednosti humanoidne robotike

Vrednostna veriga humanoidne robotike se po poročilu Morgan Stanley Humanoid 100 (2025) deli na tri osnovne sklope: i) programsko in strojno opremo, ii) fizične komponente (t. i. telo robota) in iii) končne proizvajalce (t. i. integratorje) (Jonas in drugi, 2025).

Prvi sklop zajema programsko opremo in čipe, ki robotu omogočajo zaznavanje okolja, obdelavo podatkov in sprejemanje odločitev. Sem sodijo modeli umetne inteligence, programska orodja za obdelavo podatkov ter polprevodniki za računanje in shranjevanje podatkov. Gre za segment z visoko stopnjo vstopnih ovir, kjer imajo ključno vlogo podjetja z dolgoletnim razvojnim in kapitalskim zaledjem. Med ključnimi podjetji v tem segmentu so NVIDIA, Microsoft in Alphabet.

Drugi sklop vključuje vse fizične komponente robota. To zajema motorje in druge mehanske dele, ki omogočajo gibanje (npr. aktuatorje), različne senzorje (npr. kamere), baterije ter elektronske komponente za napajanje in upravljanje. Ta del verige je močno razdrobljen, saj vključuje veliko število dobaviteljev iz različnih (sorodnih) industrij (Jonas in drugi, 2025). Prav ta razdrobljenost hkrati pomeni nižje vstopne ovire za specializirane dobavitelje, a višje koordinacijske stroške za končne proizvajalce.

Tretji sklop predstavljajo integratorji, torej podjetja, ki združijo programsko opremo in fizične komponente v delujočega humanoidnega robota. Njihove naloge vključujejo oblikovanje celotnega sistema, usklajevanje delovanja posameznih delov ter v nekaterih primerih tudi razvoj ključnih komponent v kontekstu prej omenjene vertikalne integracije (Jonas in drugi, 2025). Med pomembnejšimi akterji so Figure AI, Tesla, Boston Dynamics, Unitree Robotics, Apptronik, 1X Technologies, UBtech, AgiBot in Agility Robotics.

Geografsko je veriga močno koncentrirana v Aziji, kjer se nahaja približno 73 % relevantnih podjetij. Pri tem ima Kitajska posebej pomembno vlogo v segmentu fizičnih komponent, kar odraža njeno močno industrijsko bazo, primerljivo z njeno vlogo v proizvodnji (električnih) avtomobilov (Jonas in drugi, 2025).

### 3.3.2 Opis ključnih akterjev

V tabeli 2 so predstavljeni ključni akterji, ki sooblikujejo razvoj globalnega trga humanoidne robotike. Večina jih je osredotočena na trge ZDA in Azije, v manjši meri pa tudi Evrope. Ključna področja uporabe vključujejo predvsem proizvodnjo in logistiko, nekatera podjetja pa širijo uporabo tudi v gospodinjstva. V skladu s tem aktivno izvajajo testiranja humanoidnih robotov v realnih okoljih, zlasti v avtomobilski industriji in logistiki.

*Tabela 2: Predstavitev ključnih akterjev na trgu humanoidne robotike*

| | **Figure AI** | **Tesla (Optimus)** | **Boston Dynamics** | **Unitree Robotics** | **Apptronik** | **1X Technologies** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sedež in ustanovitev | San Jose, Kalifornija, ZDA (2022) | Austin, Teksas, ZDA (2021) | Waltham, Massachusetts, ZDA (1992) | Hangzhou, Kitajska (2016) | Austin, Teksas, ZDA (2016) | Palo Alto, Kalifornija, ZDA (2014) |
| Geografska usmeritev | ZDA in Evropa | ZDA | ZDA, Evropa, Azija | Azija in Evropa | ZDA in Evropa | ZDA in Evropa |
| Področje aplikacij | Proizvodnja in logistika | Proizvodnja, logistika in gospodinjstva | Proizvodnja in logistika | Proizvodnja in logistika | Proizvodnja in logistika | Proizvodnja, logistika in gospodinjstva |
| Vrednotenje podjetja (2025) | 34,7 mrd. EUR (39 mrd. USD) | - | 4,5 mrd. EUR (5 mrd. USD) | 5,3 mrd. EUR (43,2 mrd. CNY) | 4,5 mrd. EUR (5 mrd. USD) | 8,9 mrd. EUR (10 mrd. USD) |
| Komercialna partnerstva | Skupina BMW | Ni javno dostopno | DHL, Gap, Arvato, Otto Group, Cargill in Hyundai | Ni javno dostopno | Mercedez-Benz in GXO Logistics | Ni javno dostopno |
| Modeli robotov | Figure 01, Figure 02 in Figure 03 | Optimus (Tesla Bot) | Atlas | H1 / H1-2, H2, R1 in G1 | Apollo | NEO, NEO Beta in NEO Gamma |
| Dobavljeni roboti (2025) | 150 | 150 | Ni javno dostopno | 4,200 | Ni javno dostopno | Ni javno dostopno |

*Vir: Lastna analiza na podlagi javno dostopnih virov.*

# 4 OKVIR ZA OCENO EKONOMSKE UPRAVIČENOSTI UPORABE HUMANOIDNE ROBOTIKE

Za oceno ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidne robotike v proizvodna okolja je potreben sistematičen analitični okvir analize stroškov in koristi (CBA). Bistven metodološki izziv pri tem je, da gre za tehnologijo, ki še ni dosegla faze množične razširjenosti, zato klasični (deterministični) pristopi niso neposredno uporabni. Namesto tega je potrebno zgraditi model, ki eksplicitno obravnava negotovost in omogoča analizo občutljivosti na ključne parametre.

## 4.1 Metode za oblikovanje stroškovnega modela

Zaradi kompleksnosti tovrstnih sistemov, ki vključujejo več faz življenjskega cikla in različne vire stroškov, je nujen sistematičen in strukturiran pristop k njihovemu vrednotenju. Treba je upoštevati, da različni pristopi dajejo prednost različnim vidikom, nekateri so natančnejši, a časovno intenzivnejši, drugi pa manj natančni, a hitreje izvedljivi. Izbira pristopa zato odraža tudi razpoložljive vire in naravo odločitve, ki jo model podpira. V literaturi je opredeljenih pet temeljnih pristopov (Dietz, 2018):

- **Procesno usmerjen pristop (angl. process-oriented approach)** temelji na podrobnem modeliranju vseh relevantnih delovnih procesov, ki potekajo v različnih fazah življenjskega cikla robotskega sistema. Stroški se pri tem ocenjujejo na ravni posameznih aktivnosti. Takšni stroškovni modeli omogočajo natančno oceno stroškov, ki jih povzroča vsak posamezen proces, s čimer se doseže poglobljeno razumevanje nastanka stroškov. Ključni omejitvi sta predvsem časovna zahtevnost analize ter potreba po visokokakovostnih in kredibilnih podatkih, zlasti pri novih robotskih sistemih, za katere še ni na voljo operativnih izkušenj.
- **Pristop, temelječ na strokovnem znanju (angl. expert-based approach)**, izhaja iz izkušenj strokovnjakov, ki podajajo ocene stroškov za posamezne faze ali komponente robotskega sistema. Ta pristop se lahko izvaja na dva načina. Prvi vključuje mrežo strokovnjakov (angl. expert network), kjer se naloga ocenjevanja razdeli na več področnih podnalog, ki jih obravnavajo posamezni strokovnjaki, njihove ocene pa se nato združijo v končno oceno. Drugi način temelji na uporabi baze znanja (angl. knowledge base), v kateri so shranjene splošne strokovne ocene. Takšen pristop omogoča pridobivanje informacij brez potrebe po izrecnem modeliranju. Ob tem pomanjkljivost ostaja morebitna pristranskost strokovnjakov.
- **Pristop, temelječ na analogijah (angl. analogy-based approach)**, izhaja iz primerjave z že izvedenimi projekti. Pri tem je pogosto potrebno sodelovanje strokovnjakov, ki so seznanjeni s preteklimi projekti in lahko ustrezno presodijo stopnjo primerljivosti. Kombinacija pristopov tako omogoča učinkovito uporabo referenčnih podatkov iz preteklih projektov. V kontekstu novih robotskih sistemov ta pristop vendarle ni nujno najbolj uporaben, saj neposredno ustreznih analogij pogosto ni na voljo.

- **Pristop, temelječ na podatkovni analitiki in metodah umetne inteligence (angl. data analytics and deep learning approach)**, skuša iz podatkov preteklih projektov prepoznati vzorce, ki omogočajo stroškovno modeliranje. Gre za nadgradnjo pristopa, temelječega na analogijah, saj poleg primerjave vključuje tudi napredne metode obdelave podatkov. Prednost tega pristopa je v sposobnosti obdelave kompleksnih podatkovnih struktur. Njegova uporaba v kontekstu humanoidne robotike za zdaj ostaja bolj teoretična, saj primanjkuje zadostnih količin zanesljivih zgodovinskih podatkov.
- **Pristop, temelječ na modelu pribitka na strojno opremo (angl. hardware overhead approach)**, ocenjuje skupne stroške kot funkcijo investicije v strojno opremo. Predpostavlja, da so določeni stroški, kot so integracija, vzdrževanje in obratovanje, sorazmerni s ceno posameznih komponent. Na tej osnovi se stroški ocenjujejo kot določen odstotek njihove vrednosti. Izhodiščni predpostavki sta, da komponente povzročajo te stroške in le-ti pa so povezani z njihovo ceno. To pomeni, da so na primer stroški vzdrževanja dražjih komponent praviloma višji, prav tako pa zahtevnejši sistemi pogosto povzročajo višje stroške integracije.

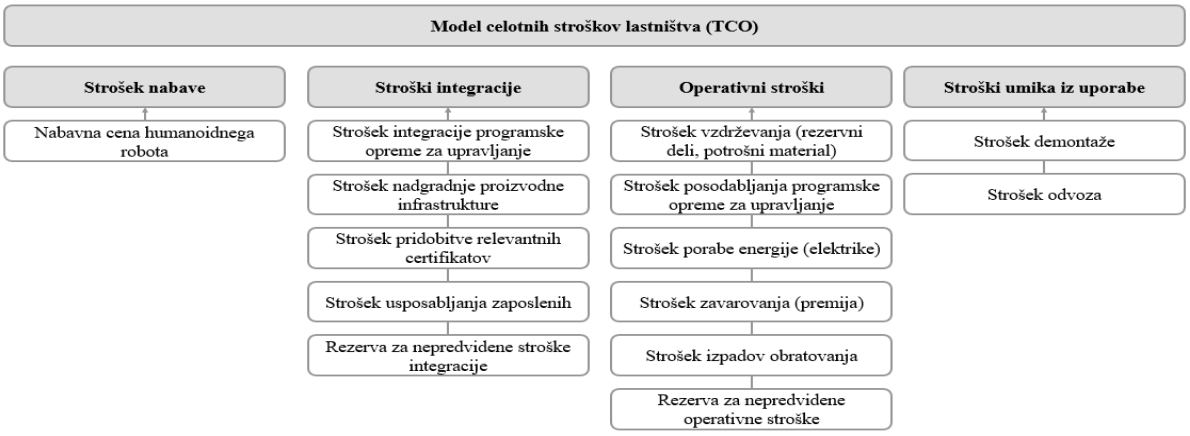
## 4.2 Model celotnih stroškov lastništva

Na podlagi procesno usmerjenega pristopa razvijam model celotnih stroškov lastništva (angl. Total Cost of Ownership, v nadaljevanju TCO), ki zajema stroške skozi celoten življenjski cikel humanoidnega robota, od nabave, integracije v proizvodnjo, uporabe in do umika iz procesov.

Empirične analize kažejo, da se lahko TCO skozi celotno življenjsko dobo opreme povzpne na dvajset- do dvestokratnik začetne nabavne vrednosti (Landscheidt in Kans, 2016). Ta ugotovitev dodatno potrjuje, da odločanje zgolj na podlagi nabavne vrednosti sistematično podcenjuje dejansko ekonomsko upravičenost uvedbe robota v proizvodni proces.

V skladu s tem je TCO mogoče razčleniti v štiri temeljne skupine stroškov, ki odražajo tako tehnično kot organizacijsko kompleksnost implementacije, kot prikazuje slika 6.

*Slika 6: Shematski prikaz modela celotnih stroškov lastništva humanoidnega robota*




*Vir: lastno delo na podlagi Nentwich in Daub (2022); Dietz (2018); Khalid in drugi (2024); Zhi in Yong (2020); Sivakumar (2018); Kim in drugi (2010); Landscheidt in Kans (2016).*

### 4.2.1 Metodologija

Poenostavljeni okvir modela TCO za oceno sedanje vrednosti (PV) stroškov celotnega življenjskega cikla humanoidnega robota v proizvodnem procesu je zapisan kot:

$$TCO = \sum_{t=0}^{T} \frac{C_t^{operativni}}{(1+r)^t} + C^{nabava} + C^{integracija} + \frac{C_t^{umik}}{(1+r)^T} \quad (1)$$

kjer je $C_t^{operativni}$ vsota operativnih stroškov, $C_t^{nabava}$ strošek nabave humanoidnega robota, $C_t^{integracija}$ strošek integracije robota v proizvodni proces, $C_t^{umik}$ strošek umika robota iz proizvodnega procesa, $r$ diskontna stopnja in T življenjska doba robota. Kot je razvidno iz enačbe (1), so stroški nabave in integracije obravnavani kot začetni izdatki, vezani na uvedbo robotskega sistema. Stroški umika nastanejo ob koncu življenjske dobe in so temu ustrezno diskontirani. Operativni stroški pa so razporejeni skozi celotno življenjsko obdobje robota in so prav tako ustrezno diskontirani.

Operativni stroški so opredeljeni kot:

$$C_t^{operativni} = (C_t^{vzdrževanje} + C_t^{energija} + C_t^{zavarovanje} + C_t^{izpadi}) * (1 + R_t) \quad (1.1)$$

kjer $R_t$ predstavlja rezervo za nepredvidene operativne stroške. Uvedba rezerve je nujna posledica dejstva, da humanoidna robotika še ni dosegla faze množične razširjenosti, in deluje kot vgrajen varnostni mehanizem modela, ki eksplicitno priznava njegovo nepopolnost.

Stroški integracije so izračunani kot:

$$C^{integracija} = \left(C^{oprema} + C^{infrastruktura} + C^{certifikati} + C^{usposabljanje}\right) * (1 + R_t) \quad (1.2)$$

kjer $R_t$ predstavlja rezervo za nepredvidene stroške integracije.

Stroški umika iz proizvodnega procesa so izračunani kot:

$$C_t^{umik} = C_t^{demontaža} + C_t^{odvoz} \quad (1.3)$$

## 4.3 Model prihrankov stroškov dela

Za celovito oceno ekonomske upravičenosti uvedbe je treba upoštevati tudi prihranke, ki jih prinaša uvedba humanoidnega robota v proizvodni proces. Glede na to, da humanoidna robotika še ni dosegla faze množične razširjenosti in njena produktivnost še ni empirično ovrednotena, je prihranke smiselno ocenjevati scenarijsko.

### 4.3.1 Metodologija

Sedanja vrednost (v nadaljevanju PV) prihrankov iz naslova znižanja stroškov dela je tako opredeljena kot:

$$B = \sum_{t=0}^{T} \frac{p * (C^{delo} * (1+g)^t)}{(1+r)^t} \quad (2)$$

kjer $p$ predstavlja delež prihranka stroškov dela zaradi povečane produktivnosti, $C^{delo}$ letni strošek proizvodnega delavca, $g$ letno prilagoditev stroškov dela zaradi rasti življenjskih stroškov, $r$ diskontno stopnjo in $T$ življenjsko dobo robota. Enačba (2) tako združuje projekcijo stroškov dela skozi čas prek izraza $C^{delo} * (1+g)^t$ in oceno deleža teh stroškov, ki jih uvedba robota prihrani, prek parametra $p$.

Prihranki z uvedbo humanoidnega robota izhajajo iz več medsebojno povezanih mehanizmov:

- **Neposredni prihranki** izhajajo iz zmanjšanja potrebe po človeškem delu, predvsem pri ponavljajočih se in fizično zahtevnih nalogah z nižjo dodano vrednostjo. To vključuje nadomeščanje obstoječih zaposlenih, zmanjšanje potrebe po novih zaposlitvah ter znižanje stroškov nadurnega dela.
- **Posredni prihranki** se odražajo v večji operativni učinkovitosti, zlasti skozi zmanjšano odvisnost od zunanjih izvajalcev (ki praviloma vključujejo višje stroške dela), standardizacijo delovnih procesov ter izboljšanje kakovosti izvedbe. Dodatno lahko uvedba robota, zlasti pri prevzemanju fizično zahtevnih in nevarnejših nalog, prispeva tudi k znižanju stroškov, povezanih z varnostjo pri delu.
- **Stabilizacijski učinki** izhajajo iz večje predvidljivosti in kontinuitete proizvodnega procesa. Robot zagotavlja stabilno proizvodno kapaciteto, neodvisno od bolniških odsotnosti, dopustov ali fluktuacije zaposlenih. Poleg tega sposobnost učenja in prilagajanja zmanjšuje potrebo po rezervnih kapacitetah, kot so nadomeščanja, dodatne izmene ali uvajanje novih delavcev.

## 4.4 Ocena ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnega robota

### 4.4.1 Metodologija

Za oceno ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnega robota v proizvodnjo na podlagi enačb (1) in (2) združujem model TCO in model prihrankov stroškov dela (B) v enoten okvir NPV. Ta omogoča primerjavo diskontiranih koristi in stroškov skozi življenjsko dobo robota. Model NPV je opredeljen kot razlika med prihranki iz naslova stroškov dela in stroški uvedbe:

$$NPV = B - TCO \quad (3)$$

Oziroma razširjeno:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \frac{p * (C^{delo} * (1+g)^t)}{(1+r)^t} - \left( \sum_{t=0}^{T} \frac{C_t{}^{operativni}}{(1+r)^t} + C^{nabava} + C^{integracija} + \frac{C_t{}^{umik}}{(1+r)^T} \right) (4)$$

V nadaljevanju je bil iz modela zaradi poenostavitve izvzet strošek umika iz proizvodnje, saj ne predstavlja pomembnega stroška, ki bi bistveno vplival na ekonomsko upravičenost. Ker humanoidna robotika še ni dovolj komercialno razširjena in obstajajo velike vrzeli v empiričnih podatkih glede možnih prihrankov in stroškov obratovanja, model temelji na simulaciji različnih scenarijev ključnih parametrov.

NPV prihrankov stroškov dela bo izračunana kot:

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \left( \frac{p * (C^{delo} * (1+g)^t) - C_t{}^{operativni}}{(1+r)^t} \right) - C^{nabava} - C^{integracija} \quad (5)$$

Parametri p, T in $C^{nabava}$ so modelirani scenarijsko, saj odražajo negotovost glede tehnološkega napredka, tako v kontekstu zmožnosti ustvarjanja prihrankov pri stroških dela zaradi povečane produktivnosti ($p$) kot tudi v kontekstu predvidene življenjske dobe robota (T) in cenovne dinamike skozi čas ($C^{nabava}$). Glede na vrednost slednjega parametra se dinamično prilagajata tudi operativni stroški ($C_t{}^{operativni}$) in stroški integracije ($C^{integracija}$).

Parametri in pripadajoče vrednosti, uporabljene v modelu, so povzeti v tabeli 3.

*Tabela 3: Predpostavke modela NPV prihrankov stroškov dela*

| **Parameter** | **Oznaka** | **Vrednost** | **Vir** | **Opombe** |
|---|---|---|---|---|
| Delež prihranka stroškov dela | $p$ | 1 %–400 % | Korus (2024) | Na podlagi razpona učinkov povečanja produktivnosti humanoidnih robotov v literaturi, pri čemer je uporabljen širok interval zaradi visoke negotovosti tehnološkega napredka. |
| Letni strošek proizvodnega delavca | $C^{delo}$ | 20.760 EUR | Služba Vlade Republike Slovenije za zakonodajo (2026) | Izračunan na podlagi predpostavke, da letni strošek delavca za delodajalca ustreza zakonsko določeni minimalni bruto plači in pribitkom prispevkov v Sloveniji za leto 2026 (strošek delodajalca × 12). |
| Diskontna stopnja | $r$ | 8,99 % | Damodaran (2026) | Privzeta kot strošek kapital (WACC) na osnovi literature. |

*se nadaljuje*

*Tabela 4: Predpostavke modela NPV prihrankov stroškov dela (nad.)*

| **Parameter** | **Oznaka** | **Vrednost** | **Vir** | **Opombe** |
|---|---|---|---|---|
| Strošek robota | $C^{nabava}$ | 16.890–59.177 EUR | Du in drugi (2024) | Vrednost je prevzeta iz projekcij cen humanoidnih robotov v literaturi in modelirana scenarijsko kot razpon zaradi pričakovane cenovne dinamike v obdobju 2026–2035. |
| Strošek integracije | $C^{intergacija}$ | 25 % | Okvirna ocena strokovnjakov | Ocenjen kot delež nabavne vrednosti robota na podlagi dveh opravljenih intervjujev s strokovnjaki na področju humanoidne robotike. |
| Operativni stroški | $C_t{}^{operativni}$ | 15 %–20 % | Okvirna ocena strokovnjakov | Ocenjeni kot delež nabavne vrednosti robota na podlagi dveh opravljenih intervjujev s strokovnjaki; 15 % v prvi polovici življenjske dobe in 20 % v drugi polovici). |
| Letna rast plač | $g$ | 2,00 % | ECB (2026) | Prevzeta iz dolgoročne inflacijske ciljne stopnje ECB kot standardna makroekonomska predpostavka. |
| Življenjska doba robota | $T$ | 5 in 10 let | Lastna predpostavka | Scenarijsko določena na podlagi primerjave z življenjsko dobo kompleksne industrijske opreme. |
| Devizni tečaj EUR/USD | – | 0,86 | ECB (2026) | Prevzet devizni tečaj dne 25.03.2026. |

*Vir: lastno delo na podlagi navedenih virov.*

### 4.4.2 Rezultati

Analiza pokaže, da je ekonomska upravičenost naložbe izrazito odvisna od treh ključnih parametrov: i) nabavne cene robota in ii) produktivnosti oz. deleža prihranka stroškov dela in iii) življenjske dobe robota.

Tabela 5 prikazuje kombinacije parametrov, pri katerih je naložba ekonomsko smiselna (pozitivna NPV – zelena) in pri katerih prihranki ne zadoščajo za pokritje stroškov uvedbe (negativna NPV – rdeča).

*Tabela 5: NPV prihrankov stroškov dela (v EUR; T = 10 let)*

| | | **Nabavna cena humanoidnega robota (EUR)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **2026E** | **2028E** | **2030E** | **2032E** | **2034E** | **2035E** |
| | | € 59.177 | € 42.852 | € 32.018 | € 24.655 | € 19.123 | € 16.890 |
| **Delež prihranka stroškov dela (%)** | 1% | (€ 136.981) | (€ 98.786) | (€ 73.440) | (€ 56.214) | (€ 43.271) | (€ 38.047) |
| | 5% | (€ 131.109) | (€ 92.914) | (€ 67.567) | (€ 50.342) | (€ 37.399) | (€ 32.175) |
| | 10% | (€ 123.769) | (€ 85.574) | (€ 60.227) | (€ 43.002) | (€ 30.059) | (€ 24.834) |
| | 15% | (€ 116.428) | (€ 78.233) | (€ 52.887) | (€ 35.662) | (€ 22.718) | (€ 17.494) |
| | 20% | (€ 109.088) | (€ 70.893) | (€ 45.547) | (€ 28.321) | (€ 15.378) | (€ 10.154) |
| | 25% | (€ 101.748) | (€ 63.553) | (€ 38.206) | (€ 20.981) | (€ 8.038) | (€ 2.814) |
| | 50% | (€ 65.046) | (€ 26.851) | (€ 1.505) | € 15.721 | € 28.664 | € 33.888 |
| | 75% | (€ 28.345) | € 9.850 | € 35.197 | € 52.422 | € 65.365 | € 70.589 |
| | 100% | € 8.357 | € 46.552 | € 71.898 | € 89.124 | € 102.067 | € 107.291 |
| | 200% | € 155.163 | € 250.760 | € 261.594 | € 268.957 | € 274.489 | € 276.722 |
| | 400% | € 448.775 | € 486.969 | € 512.316 | € 529.541 | € 542.484 | € 547.709 |
| **Točka preloma (p)** | | 94,3% | 68,3% | 51,0% | 39,3% | 30,5% | 26,9% |

*Vir: Lastno delo na podlagi prilagojene metodologije po Korus (2024); Du in drugi (2024).*

Rezultati kažejo, da bodo humanoidni roboti z življenjsko dobo 10 let v zgodnjih fazah komercializacije zaradi relativno visokih nabavnih stroškov ekonomsko upravičeni predvsem v scenarijih z izrazitim povečanjem produktivnosti, ki pa so v začetnih fazah tehnološkega razvoja manj verjetni. Pri ocenjeni nabavni ceni 59.177 EUR robot doseže prag rentabilnosti, če nadomesti približno 0,9 delavca.

Z nadaljnjim padanjem cen se ta prag bistveno znižuje. Ob predpostavki, da se nabavna cena do leta 2035 zniža na 16.890 EUR, za ekonomsko upravičenost zadostuje že približno 27-odstotni letni prihranek stroškov dela (približno 0,3 delavca), kar pomembno poveča verjetnost širše uporabe humanoidnih robotov v proizvodnji.

Kot je prikazano v tabeli 6, se ob predpostavki krajše življenjske dobe robota (T = 5 let) prag ekonomske upravičenosti naložbe bistveno poviša. Zaradi krajšega obdobja ustvarjanja

prihrankov mora robot nadomestiti približno 1,3 delavca, da doseže pozitivno NPV pri nabavni ceni 59.177 EUR.

Tudi pri nižjih nabavnih cenah ostajajo zahteve relativno visoke. Pri ceni 16.890 EUR robot doseže prag ekonomske upravičenosti, če nadomesti približno 0,4 delavca. To nakazuje, da je življenjska doba robota ključni dejavnik investicijske odločitve, saj krajša amortizacijska doba bistveno poveča zahtevano raven produktivnosti oziroma ustvarjanja prihrankov stroška dela.

*Tabela 6: NPV prihrankov stroškov dela (v EUR; T = 5 let)*

| Delež prihranka stroškov dela (%) | Nabavna cena humanoidnega robota (EUR) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **2026E** | **2028E** | **2030E** | **2032E** | **2034E** | **2035E** |
| | € 59.177 | € 42.852 | € 32.018 | € 24.655 | € 19.123 | € 16.890 |
| 1% | (€ 111.674) | (€ 80.630) | (€ 60.029) | (€ 46.028) | (€ 35.508) | (€ 31.262) |
| 5% | (€ 108.256) | (€ 77.212) | (€ 56.610) | (€ 42.610) | (€ 32.090) | (€ 27.844) |
| 10% | (€ 103.983) | (€ 72.939) | (€ 52.338) | (€ 38.337) | (€ 27.817) | (€ 23.571) |
| 15% | (€ 99.710) | (€ 68.666) | (€ 48.065) | (€ 34.065) | (€ 23.545) | (€ 19.298) |
| 20% | (€ 95.437) | (€ 64.393) | (€ 43.792) | (€ 29.792) | (€ 19.272) | (€ 15.026) |
| 25% | (€ 91.164) | (€ 60.120) | (€ 39.519) | (€ 25.519) | (€ 14.999) | (€ 10.753) |
| 50% | (€ 69.800) | (€ 38.756) | (€ 18.155) | (€ 4.155) | € 6.365 | € 10.611 |
| 75% | (€ 48.436) | (€ 17.392) | € 3.209 | € 17.209 | € 27.729 | € 31.975 |
| 100% | (€ 27.072) | € 3.972 | € 24.573 | € 38.573 | € 49.093 | € 53.339 |
| 200% | € 58.384 | € 89.428 | € 110.029 | € 124.030 | € 134.550 | € 138.796 |
| 400% | € 229.297 | € 260.341 | € 280.942 | € 294.942 | € 305.462 | € 309.708 |
| **Točka preloma (p)** | 131,7% | 95,4% | 71,2% | 54,9% | 42,6% | 37,6% |

*Vir: Lastno delo na podlagi prilagojene metodologije po Korus (2024); Du in drugi (2024).*

### 4.2.3 Omejitve modela

Model temelji na več poenostavitvah, ki jih je treba upoštevati pri interpretaciji rezultatov:

1. **Nespremenjen obseg proizvodnje:** predpostavljamo, da uvedba robota ne vpliva na skupni obseg proizvodnje, temveč zgolj na način izvedbe dela. To je konservativna predpostavka, saj morebitni dodatni prihodki (npr. zaradi daljšega obratovanja ali morebitnega hitrejšega proizvodnega cikla) le še izboljšajo ekonomsko upravičenost.
2. **Poenostavljeni stroški integracije in operativni stroški:** model poenostavi izračun stroškov vzdrževanja, energije, nadgradenj ter integracije v obstoječe proizvodne procese. Prav tako implicitno predpostavlja, da se prihranki realizirajo linearno ter ne upošteva stroškov, povezanih z umikom robota iz proizvodnega procesa ob koncu njegove življenjske dobe. V nasprotju s prvo omejitvijo ta poenostavitev deluje v nasprotni smeri, saj je pričakovati, da poenostavitev (višine) stroškov (npr. nepredvidena vzdrževalna dela, prilagajanje procesov) vodi v podcenjevanje TCO, zaradi česar je NPV prihrankov stroškov

dela lahko zavajajoče precenjena. Prav tako model ne upošteva možnosti nabave več humanoidnih robotov, pri čemer bi bilo smiselno pričakovati učinke ekonomije obsega, ki bi lahko vodile v nižje povprečne stroške integracije in operativne stroške.

3. **Negotovosti in operativna tveganja:** model predpostavlja konstantno in predvidljivo učinkovitost robota skozi celotno življenjsko dobo. Pri tem ne zajema virov negotovosti, kot so variabilnost dejanske produktivnosti (npr. nižja učinkovitost, ki se lahko odrazi v višji porabi potrošnega materiala), tehnične okvare in izpadi ter morebitne zamude.

Kljub navedenim omejitvam simulacijski model NPV prihrankov stroškov dela omogoča konsistenten okvir za primerjalno analizo pogojev uvedbe humanoidne robotike in identifikacijo ključnih pogojev (cena robota, dosežena produktivnost in življenjska doba), pri katerih naložba postane ekonomsko upravičena. Če izhajamo iz uporabljenih predpostavk, model hkrati omogoča tudi okvirno oceno časovne točke, pri kateri bi lahko uvedba humanoidnega robota v proizvodna okolja postala ekonomsko smiselna, ob predpostavki nadaljnjega (pospešenega) tehnološkega napredka in padca stroškov proizvodnje humanoidnih robotov v skladu s pričakovanji.

# 5 SKLEP

Humanoidna robotika se uveljavlja kot eno najbolj dinamičnih in obetavnih področij sodobne tehnologije. Humanoidnost oziroma antropomorfizem ni cilj sam po sebi, temveč pristop, ki omogoča čim bolj neposreden, vendar selektiven prenos človeških lastnosti in sposobnosti, potrebnih za učinkovito delovanje v okolju, na splošnonamenske robotske sisteme. Univerzalnost je ključna za razumevanje namena humanoidnih robotov, a hkrati predstavlja tudi enega izmed osrednjih izzivov pri njihovem razvoju in komercializaciji. Ključni cilj je doseči ali preseči produktivnost, primerljivo s človeško, ob hkratnem zagotavljanju varnega in učinkovitega sodelovanja z ljudmi brez potrebe po obsežnem prilagajanju okolja robotu.

Analiza trga je pokazala, da se napovedi velikosti trga močno razlikujejo, kar gre pripisati nezrelosti trga in različnim pričakovanjem glede hitrosti tehnološkega razvoja. Na strani ponudbe razvoj trga poganjajo predvsem padec stroškov ključnih komponent, napredek na področju umetne inteligence, povečanje obsega naložb ter vertikalna integracija. Na strani povpraševanja izstopajo predvsem staranje prebivalstva, pomanjkanje delavcev v proizvodnji, naraščajoča kompleksnost industrijske proizvodnje ter potreba po povečanju produktivnosti.

Osrednji prispevek diplomskega dela predstavlja razvoj okvira za oceno ekonomske upravičenosti uvedbe humanoidnih robotov v proizvodnjo. Na podlagi kombinacije procesno usmerjenega pristopa in pristopa, temelječega na strokovnem znanju, je bil razvit model celotnih stroškov lastništva (TCO), ki zajema štiri temeljne stroškovne kategorije: nabavo, integracijo, operativne stroške in umik iz proizvodnje. Model TCO je bil nato združen z modelom prihrankov v enoten okvir neto sedanje vrednosti (NPV) prihrankov stroškov dela iz

naslova uvedbe humanoidnega robota. Ti prihranki neposredno izhajajo iz zmanjšanja potrebe po človeškem delu, posredno pa se odražajo v večji operativni učinkovitosti.

Simulacijska analiza je pokazala, da je ekonomska upravičenost naložbe izrazito odvisna od treh ključnih parametrov: nabavne cene robota, dosežene produktivnosti (deleža prihranka stroškov dela) in življenjske dobe robota. Ob življenjski dobi 10 let in ocenjeni nabavni ceni 59.177 EUR robot doseže prag rentabilnosti, če nadomesti približno 0,9 delavca, kar pomeni, da mora ustvariti letni prihranek stroškov dela v višini stroška 0,9 zaposlenega. Ob predpostavki, da se nabavna cena do leta 2035 zniža na 16.890 EUR, zadostuje že približno 27-odstotni letni prihranek (0,3 delavca). V primeru krajše življenjske dobe (5 let) se prag ekonomske upravičenosti bistveno poviša, saj mora pri ceni 59.177 EUR robot nadomestiti približno 1,3 delavca, pri ceni 16.890 EUR pa zadostuje 38-odstotni letni prihranek stroškov dela.

V prihodnosti je pričakovati, da bo uvedba humanoidnih robotov v proizvodne procese prinesla pomembne priložnosti za povečanje produktivnosti oziroma prihrankov. Ob tem ostajajo pomembni tako tehnološki izzivi kot vprašanje ekonomske upravičenosti njihove uvedbe v proizvodno okolje. Model ekonomske upravičenosti prispeva k bolj sistematični obravnavi stroškovne strukture in metodologije ocene ekonomske upravičenosti ter opredeljuje pogoje, pod katerimi je mogoče pričakovati ekonomsko upravičenost naložbe v humanoidnega robota.

## SEZNAM KLJUČNE LITERATURE


1. Demir, K., Döven, G. in Sezen, B. (2019). Industry 5.0 and Human–Robot Co-Working. *Procedia Computer Science*, 158, 688–695. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104
2. Korus, S. (2024, 10. september). *How ARK Is Thinking About Humanoid Robotics*. ARK Invest. https://www.ark-invest.com/articles/analyst-research/how-ark-is-thinking-about-humanoid-robotics
3. Landscheidt, S. in Kans, M. (2016). Method for Assessing the Total Cost of Ownership of Industrial Robots. *Procedia CIRP*, 57, 746–751. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.129
4. Tong, Y., Liu, H. in Zhang, Z. (2024). Advancements in Humanoid Robots: A Comprehensive Review and Future Prospects. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, *11*(2), 301–328. https://www.ieee-jas.com/article/doi/10.1109/JAS.2023.124140?ref=scientific.media
5. Zhi, H. in Yong, S. (2020). Cost-Benefit Analysis of Remote Maintenance for Industrial Robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 1676, 1–6. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1676/1/012210

## LITERATURA IN VIRI


1. Baratta, A., Cimino, A., Gnoni, M. G. in Longo, F. (2023). Human–Robot Collaboration in Industry 4.0: A Literature Review. *Procedia Computer Science*, 217, 1887–1895. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.389
2. Bock, T. (2025). 2025 *Humanoid Robot Study – Presentation of Results: Market Development, Technological Maturity and Potential for Companies*. Nexery. https://nexery.de/wp-content/uploads/go-x/u/4cc2131f-405f-4be3-b73e-af2afa02499e/2025_NEXERY.-Humanoid-Robot-Study.pdf
3. Bradley, C., Chui, M., Russell, K., Ellingrud, K., Birshan, M. in Chettih, S. (2024). *The Next Big Arenas of Competition*. McKinsey. https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/mckinsey%20global%20institute/our%20research/the%20next%20big%20arenas%20of%20competition/the-next-big-arenas-of-competition_final.pdf
4. CB Insights. (2026). *Total Funding and Deals in the Humanoid Robotics Category*. https://www.cbinsights.com/
5. Damodaran, A. (2026). Cost of Equity and Capital (US). *NYU Stern School of Business*. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/wacc.html
6. Dietz, T. (2018). *Knowledge-Based Cost-Benefit Analysis of Robotics for SME-like Manufacturing*. Institute for Control Engineering of Machine Tools and Manufacturing Equipment, University of Stuttgart. https://elib.uni-stuttgart.de/server/api/core/bitstreams/2d77108f-f176-4c13-9c29-ed2ce2f363fa/content
7. Du, J., Isayama, Y., Costa, D., Delaney, M., Zheng, N. in Xu, O. (2024). *Humanoid Robot: The AI Accelerant*. Goldman Sachs. https://www.goldmansachs.com/pdfs/insights/pages/gs-research/global-automation-humanoid-robot-the-ai-accelerant/report.pdf
8. ECB. (2026). *Two per cent Inflation Target*. https://www.ecb.europa.eu/mopo/strategy/pricestab/html/index.en.html
9. Evropska komisija. (2026). *Industry 5.0*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en
10. Fitzpatrick, P., Harada, K., Kemp, C., Matsumoto, Y., Yokoi, K. in Yoshida, E. (2008). Humanoids. V B. Siciliano in O. Khatib (ur.), *Springer Handbook of Robotics* (str. 1789–1818). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_57
11. Garlick, R., Fei, W., Islam, T., Odunsi, A., Spielan, A., Wiklie, M., Krause, H., Moffat, M., Gibson, C., Miller, A. in Gangahar, A. (2024). *The Rise of AI Robots: Physical AI Is Coming for You*. Citi. https://www.citifirst.com.hk/home/upload/citi_research/rsch_pdf_30297368.pdf
12. Gartner. (2026a). *Gartner Hype Cycle*. https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle
13. Gartner. (2026b). *Gartner Predicts Fewer Than 20 Companies Will Scale Humanoid Robots for Manufacturing and Supply Chain to Production Stage by 2028*. https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2026-01-21-gartner-predicts-fewer-

than-20-companies-will-scale-humanoid-robots-for-manufacturing-and-supply-chain-to-production-stage-by-2028
14. Gartner. (2024). *Gartner 2024 Hype Cycle for Emerging Technologies Highlights Developer Productivity, Total Experience, AI and Security*. https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-08-21-gartner-2024-hype-cycle-for-emerging-technologies-highlights-developer-productivity-total-experience-ai-and-security
15. Giaretta, A., De Donno, M. in Dragoni, N. (2018). Adding Salt to Pepper: A Structured Security Assessment over a Humanoid Robot. V *Proceedings of 13th International Conference on Availability, Reliability and Security* (str. 1–8). https://doi.org/10.1145/3230833.3232807
16. Gu, Z., Li, J., Shen, W., Yu, W., Xie, Z., McCrory, S., Cheng, X., Shamsah, A., Griffin, R., Liu, C. K., Kheddar, A., Peng, X. B., Zhu, Y., Shi, G., Nguyen, Q., Cheng, G., Gao, H. in Zhao, Y. (2025). Humanoid Locomotion and Manipulation: Current Progress and Challenges in Control, Planning and Learning. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.02116
17. Guang Yi Lu, P. (2011). *Mechanical Engineering Challenges in Humanoid Robotics (bachelor's thesis)*. Massachusetts Institute of Technology. https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/68535/771554060-MIT.pdf?sequence=2
18. Hanbury, P., Dutt, A. in Veratti, E. (2025, april). *Humanoid Robots at Work: What Executives Need to Know*. Bain & Company. https://www.bain.com/insights/humanoid-robots-at-work-what-executives-need-to-know/
19. Heer, C. (2025, 25. september). *World Robotics 2025 Report – Industrial Robots*. International Federation of Robotics (IFR). https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years
20. Hong, J., Zhang, D., Pan, W. in Lai, A. (2025). *Humanoid Robots: Rise of the Robots*. Macquarie Equity Research.
21. Jonas, A., Tackett, W., Zhong, S., Haigan, D. in Tso, E. (2025). *The Humanoid 100: Mapping the Humanoid Robot Value Chain*. Morgan Stanley. https://advisor.morganstanley.com/john.howard/documents/field/j/jo/john-howard/The_Humanoid_100_-_Mapping_the_Humanoid_Robot_Value_Chain.pdf
22. Kaneko, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Hirukawa, H., Kawasaki, T., Hirata, M., Shizuma, K., Ishikawa, M., Koyachi, N. in Furusho, J. (2002). Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP. *The International Journal of Robotics Research*, *23*(4), 351–362. https://www.researchgate.net/publication/220122433_Experimental_study_of_humanoid_robot_HRP-1S
23. Kelkar, A., Jansen, C., Chu, F., Patel, M., Chui, M. in Robertson, M. (2025, 15. oktober). *Humanoid Robots: Crossing the Chasm From Concept to Commercial Reality*. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/industries/industrials/our-insights/humanoid-robots-crossing-the-chasm-from-concept-to-commercial-reality
24. Khalid, O., Hao, G., MacDonald, H., Cooperman, A., McAuliffe, F. in Desmond, C. (2024). Cost-Benefit Assessment Framework for Robotics-Driven Inspection of Floating Offshore

Wind Farms. *Wind Energy*, *27*(2), 152–164. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.2881

25. Kim, T., Lee, U., Yoo, W., An, S., Hunhee, C., Lee, Y. in Doh, N. (2010). Benefit/Cost Analysis of a Robot-Based Construction Automation System. V *International Conference on Control, Automation and Systems*, (str. 616–621). https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5669832
26. Koetsier, J. (2026, 9. januar). *Top 10 Humanoid Robot Companies by Shipments Revealed*. Forbes. https://www.forbes.com/sites/johnkoetsier/2026/01/09/top-10-humanoid-robot-companies-by-shipments-revealed/
27. Malik, A. A., Masood, T. in Brem, A. (2024). Intelligent Humanoid Robots in Manufacturing: Addressing the Worker Shortage and Skill Gaps in Assembly Cells. V *19th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, (str. 20–27). https://www.researchgate.net/publication/378899018_Intelligent_Humanoid_Robots_in_Manufacturing_Addressing_the_Worker_Shortage_and_Skill_Gaps_in_Assembly_Cells
28. Monostori, L. (2015). Cyber–Physical Production Systems: Roots from Manufacturing Science and Technology. *Automatisierungstechnik*, *63*(10), 766–776. https://www.researchgate.net/publication/283520324_Cyber-physical_production_systems_Roots_from_manufacturing_science_and_technology
29. Müller, J., Frese, U. in Rofer, T. (2012). Grab a Mug – Object Detection and Grasp Motion Planning With the NAO Robot. V *12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. https://www.researchgate.net/publication/261244806_Grab_a_mug_-_Object_detection_and_grasp_motion_planning_with_the_Nao_robot
30. Müller, J. (2020). *Enabling Technologies for Industry 5.0: Results of a Workshop with Europe's Technology Leaders*. Evropska komisija. https://www.4bt.us/wp-content/uploads/2021/04/INDUSTRY-5.0.pdf
31. Nenchev, D. N., Konno, A. in Tsujita, T. (2019). *Humanoid Robots: Modeling and Control*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780128045602/humanoid-robots
32. Nentwich, C. in Daub, R. (2022). Cost-Benefit Analysis of Industrial Robot Gear Condition Monitoring. V *55th Procedia CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 107, (str. 143–148). https://www.researchgate.net/publication/360886375_Cost-Benefit_Analysis_of_Industrial_Robot_Gear_Condition_Monitoring
33. Pacucci, F. (2025). *Humanoid Robots in Manufacturing: A Topic Modelling Review of Current Research and Future Perspectives (master's thesis)*. Politecnico di Torino. https://webthesis.biblio.polito.it/37254/1/tesi.pdf
34. Roveda, L. (2024). *Editorial:* Human–Robot Collaboration in Industry 5.0: A Human-Centric AI-Based Approach. *Frontiers in Robotics and AI*, 11. https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1511126
35. Sadaf, A., Zainab, P., Humera, M. in Nashra, H. (2018). Humanoid Robot. *International Journal of Novel Research and Development*, *3*(9), 17–24. https://ijnrd.org/papers/IJNRD1809004.pdf

36. Shamsuddoha, M., Nasir, T. in Fawaaz, M. (2025). Humanoid Robots like Tesla Optimus and the Future of Supply Chains: Enhancing Efficiency, Sustainability, and Workforce Dynamics. *Automation*, *6*(1), 9–31. https://www.researchgate.net/publication/389198324_Humanoid_Robots_like_Tesla_Optimus_and_the_Future_of_Supply_Chains_Enhancing_Efficiency_Sustainability_and_Workforce_Dynamics
37. Sheng, Q., Zhou, Z., Li, J., Mi, X., Xiang, P., Chen, Z., Xu, H., Jia, S., Wu, X., Cui, Y., Ye, S., Yu, J., Du, Y., Zhai, S., Xu, K., Yang, Y., Lou, Z., Song, Z., Yin, Z., Sun, Y., Xiong, R., Zou, J. in Yang, H. (2025). A Comprehensive Review of Humanoid Robots. *SmartBot*, *1*(1). https://doi.org/10.1002/smb2.12008
38. Siufung, L. in Li, R. (2025). *Advanced Manufacturing: Humanoid Robots Standing Tall on the Earth*. CCB International.
39. Sivakumar, C. (2018). *Economic Analysis for Robotics*. Department of Mechanical Engineering, BSA Crescent Institute of Science and Technology. https://crescent.education/wp-content/uploads/2018/08/Economic-Analysis-for-Robotics.pdf
40. Uršič, H. (2009). *Piezoelektrični debeloplastni aktuator z velikim odmikom*. Institut Jožefa Štefana. http://ipssc.mps.si/2009/zbornik/Ursic_povzetek.pdf
41. World Health Organization. (2026). *Ageing – Demographics*. https://platform.who.int/data/maternal-newborn-child-adolescent-ageing/ageing-data/ageing---demographics
42. World Health Organization. (2025, 1. oktober). *Ageing and Health*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health
43. Yamane, K. in Murai, A. (2018). A Comparative Study Between Humans and Humanoid Robots. V A. Goswami in P. Vadakkepat (ur.), *Humanoid Robotics: A Reference* (str. 873–892). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6046-2_7
44. Yitmen, I. in Almusaed, A. (2024). Synopsis of Industry 5.0 Paradigm for Human-Robot Collaboration. V I. Yitmen in A. Almusaed (ur.), *Industry 4.0 Transformation Towards Industry 5.0 Paradigm: Challenges, Opportunities and Practices* (str. 1–21). IntechOpen. https://www.researchgate.net/publication/380983494_Synopsis_of_Industry_50_Paradigm_for_Human-Robot_Collaboration
45. Zheng, I., Yu, E. in Li, L. (2025). *Takeaways From an Expert at a Leading Chinese Humanoid Robot Start-up*. Deutsche Bank.
46. Zhong, S., Jonas, A., Nowak, B., Moore, J., Yu, G., Chan, C., Yates, M. R., Wood, A., Webb, G. W., Simpson, L., Hsiao, T., Wang, S., Jiang, L., Yang, D., Tackett, W., Haigian, D. M., Chai, C., Chen, S., Wang, C., … Huang V. (2025, 14. maj). *Humanoids: A $5 Trillion Global Market*. Morgan Stanley. https://www.morganstanley.com/insights/articles/humanoid-robot-market-5-trillion-by-2050
47. *Znesek minimalne plače za leto 2026*. Uradni list RS, št. 6/26. https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=AKT_1576