

Novi pristopi, tehnologije in trendi v proizvodnih pnevmatičnih sistemih in procesih

Marko Šimic, Miha Pipan, Niko Herakovič

Izvleček:

Naraščajoče zahteve po energijsko učinkovitejših, prilagodljivejših in inteligentnejših industrijskih sistemih spodbujajo intenziven razvoj in inovacije na področju pnevmatike. Razvoj miniaturnih 3D tiskanih in mehkih pnevmatičnih aktuatorjev omogoča lahke, prilagodljive in varne rešitve za uporabo v robotiki ter biomedicinskih aplikacijah. Proporcionalna in digitalna pnevmatika se nadalje razvijata v smeri industrije 4.0, pri čemer metode spodbujevalnega učenja izboljšujejo prilagodljivost krmilnih sistemov. Metode za zmanjšanje porabe energije – vključno s prekinitvenim dovajanjem stisnjenega zraka, pnevmatičnimi vezji z izklopnimi ventili za regulacijo delovnega tlaka, optimiranim dimenzioniranjem komponent ter novimi pristopi dušenja pretoka. Izračun prijemalne sile na podlagi trajektorije gibanja ter analiza ogljičnega odtisa izdelka prispevata k uveljavljanju trajnostnih praks. Področje mehke robotike dodatno bogatijo nove zasnove aktuatorjev, podatkovno podprti modeli ter nelinearne strategije krmiljenja. Eksperimentalni rezultati potrjujejo praktično uporabnost in učinkovitost predstavljenih tehnologij. Pregled tako potrjuje pnevmatiko kot vsestransko, učinkovito in okoljsko odgovorno tehnološko platformo za sodobno avtomatizacijo, ki z integracijo interneta stvari (IoT), digitalnih dvojčkov in hibridnih sistemov predstavlja pomemben temelj prihodnjih fluidnotehničnih rešitev.

Ključne besede:

pnevmatika, energijska učinkovitost, robotika, inteligentno krmiljenje, avtomatizacija, trajnost

1 Uvod

Pnevmatika je že dolgo temelj industrijske avtomatizacije zaradi nizke cene investicije, preproste montaže in uporabe, prijaznosti do okolja, robustnosti ter enostavnega vzdrževanja komponent. Pnevmatični sistemi se široko uporabljajo v proizvodnji, pakiranju, robotiki in procesni industriji za naloge, kot so strega, montaža, posebni pristopi varnega delovanja sistemov, prijemanje in ravnanje z občutljivimi materiali ali sestavnimi deli in izdelki kompleksnih oblik.

Njihove prednosti vključujejo enostavno distribucijo in prenos energije stisnjenega zraka po industrijskem okolju, ugodno razmerje med močjo in maso, hitre odzivne čase ter inherentno varnost v eksplozijsko ogroženih ali higiensko občutljivih okoljih. Pnevmatične sisteme je tudi enostavno vzdrževati s cenovno ugodnimi nadomestnimi deli in nenazadnje preprosto pretvorbo med linearnim in rotacijskim gibanjem. Njihova skladnost in mehki princip delovanja pa jih naredita posebej primerne za sodelujoče in človeku varne aplikacije [1], [2].

1.1 Trenutno stanje

Pnevmatični sistemi imajo v primerjavi s hidravličnimi in električnimi pogoni določene prednosti, ki so odvisne od zahtev aplikacije in obratovalnih pogojev, zaradi katerih so zelo primerni za širok spekter industrijskih aplikacij. Prav tako pnevmatični sistemi delujejo s stisnjenim zrakom, ki predstavlja sekundarni dokaj čist in varen energijski medij za prenos energije in je zato primeren tudi za uporabo v vnetljivih okoljih. Stisnjeni zrak se pripravlja s kompresorji, zato je njegova energijska in okoljska učinkovitost neposredno odvisna od učinkovitosti kompresorskega sistema ter vira električne energije. Pnevmatični sistemi so zato varnejši zlasti v eksplozijsko ogroženih ali higiensko občutljivih okoljih, kar odpravlja tveganje toksičnih izpustov ali požara.

Električni pogoni običajno omogočajo višjo natančnost pozicioniranja in energijsko učinkovitost, medtem ko pnevmatični sistemi pogosto izstopajo po robustnosti, enostavni izvedbi ter ugodnem razmerju med funkcionalnostjo in stroški pri številnih industrijskih aplikacijah. Pnevmatični sistemi so mehansko preprosti, odporni na preobremenitve in lahko zaradi akumuliranega stisnjenega zraka v sistemu nadaljujejo delovanje tudi med kratkotrajnimi izpadi električne energije.

Sodobni pnevmatični sistemi so modularni in enostavni za vzdrževanje, zato so primerni tako za obsežno industrijsko avtomatizacijo kot tudi za manjše, mobilne ali zagonske projekte. Široka uporaba v panogah, kot so avtomobilska industrija, elektronika, živilskopredelovalna industrija, petrokemija, farmacija, HVAC-sistemi (ang. Heating, Ventilation, and Air Con-

Izr. prof. dr. Marko Šimic, univ. dipl. inž., doc. dr. Miha Pipan, univ. dipl. inž., prof. dr. Niko Herakovič, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-4.29>

ditioning – ogrevanje, prezračevanje in hlajenje) ter transport (zlasti zračni zavorni sistemi), potrjuje njihovo vsestranskost in zanesljivost.

Kljub nekaterim zmotam o hrupu, puščanju ali kompleksnosti delovanja so pravilno načrtovani pnevmatični sistemi čisti, učinkoviti in razmeroma tihi. Njihova mehanska preprostost omogoča hitro odpravljanje napak in prilagoditve, kompaktne in lahke komponente pa predstavljajo prednost v aplikacijah, kjer sta prostor in mobilnost ključnega pomena [1].

Poleg prednosti se je treba zavedati slabosti oziroma pomanjkljivosti pnevmatičnih sistemov. Stisljivost zraka lahko vodi do zmanjšane natančnosti in pojava »stick-slip« učinka, zlasti pri nizkih hitrostih aktuatorjev. Omejitve delovnega tlaka pogosto zahtevajo večje komponente za doseganje enake izhodne sile kot pri hidravličnih sistemih. Ustrezna priprava zraka je ključnega pomena za preprečevanje onesnaženja z vlago, oljem in delci, delovanje tesnil in drugih komponent pa je lahko občutljivo na temperaturna nihanja.

Pnevmatični sistemi so prav tako dovzetni za uhajanje zraka, kar lahko zmanjša učinkovitost in poveča stroške energije, še posebej zaradi razmeroma visoke energijske zahtevnosti stiskanja zraka. Poleg tega so lahko manj primerni za aplikacije, ki zahtevajo zelo natančno krmiljenje gibanja ali sile, saj je regulacija hitrosti in položaja na splošno manj natančna kot pri električnih ali hidravličnih pogonih. Hrup kompresorjev in ventilov je lahko prav tako problematičen, če ni ustrezno obvladovan, sistemi pa so lahko v določenih okoljih občutljivi na prah in vibracije [2].

Izbira med pnevmatičnimi, hidravličnimi in električnimi pogoni je vedno odvisna od zahtev glede sile, hitrosti, natančnosti, energijske učinkovitosti, investicijskih stroškov in pogojev delovanja posamezne aplikacije.

1.2 Industrijska pnevmatika in ključne tehnologije

Vsak industrijski pnevmatični sistem vključuje ključne podsisteme in komponente, kot so kompresorske postaje za proizvodnjo (generacijo) zraka, regulacijski tlačni in pripravi sistemi za regulacijo delovnega tlaka in ustrezno pripravo zraka, hranilniki za hranjenje tlačne energije (globalno in lokalno), distribucijsko omrežje cevi ter končni porabniki, to so pnevmatični sistemi v proizvodnji (slika 1).

Vsak od teh podsistemov in komponent mora biti skrbno načrtovan, da se zagotovijo učinkovitost, stabilnost ter dolgoročno, trajnostno delovanje pnevmatičnega sistema.

Tehnološki napredek iz zadnjih 10 let, kot nakazuje tudi izbrana literatura, je predvsem usmerjen v inovacije na področju nadzora in spremljanja procesov, vpeljavajo naprednih pristopov z umetno inteligenco za predvidevanje delovanja, obrabe, odpovedi in vzdrževanja sistemov. Za doseganje povečane učinkovitosti sistemov in vpliva na življenjsko dobo komponent se razvija področje zasnov novih aktuatorjev, inteligentnega krmiljenja in strategij za varčevanje z energijo [4]. Integracija teh sistemov s tehnologijami industrije 4.0, kot so internet stvari (IoT), digitalni dvojčki in strojno učenje, je odprla nove možnosti za razvoj prilagodljivih, učinkovitih in trajnostnih rešitev avtomatizacije pnevmatičnih sistemov [5], [6], [7]. Sodobne platforme danes omogočajo brezhibno integracijo z naprednimi komponentami, kot so večfunkcijski ventolni otoki in merilniki pretoka, ki so združljivi s programirljivimi logičnimi krmilniki (PLK). Ti razvojni dosežki omogočajo centralizirano in poenostavljeno upravljanje več pnevmatičnih ventilov in aktuatorjev. Omogočajo zajem podatkov na stroju v realnem času in se lahko uporabljajo za operativno analizo, napovedno diagnostiko in sprotno optimizacijo delovanja sistemov. Poleg tega povezovanje podatkov pnevmatičnih sistemov z višjimi informacijskimi nivoji, kot so ERP (načrtovanje virov



1

Industrijska pnevmatika – principiela shema stisnjenega zraka z glavnimi pnevmatičnimi podsistemi [3].

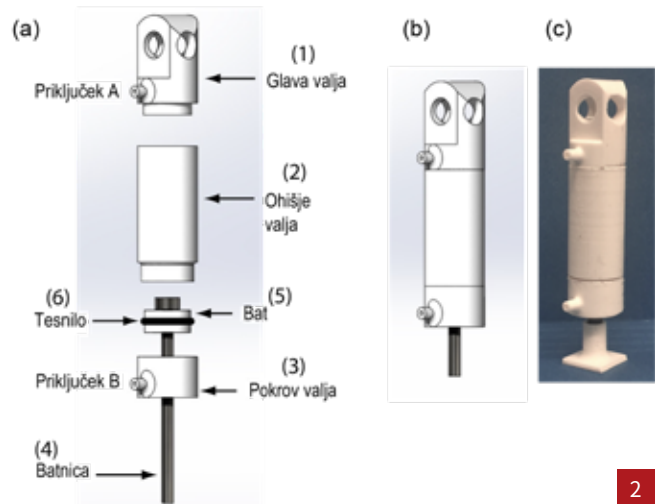
podjetja), MES (sistemi za upravljanje/krmiljenje proizvodnje) in druge digitalne platforme, povečuje transparentnost ter omogoča učinkovitejše odločanje v proizvodnih okoljih [8].

Ta pregled si prizadeva sintetizirati te tehnološke razvojne smeri, izpostaviti trende ter opredeliti priložnosti za nadaljnje raziskave in industrijsko uporabo pnevmatike na področju avtomatizacije. Pri pripravi pregleda je bila uporabljena kombinacija znanstvenih člankov, konferenčnih prispevkov in strokovne literature s področja pnevmatike, fluidne tehnike in industrijske avtomatizacije. Prednost so imeli novejši viri, objavljeni predvsem v obdobju 2019–2025, ki predstavljajo aktualne raziskovalne dosežke in industrijske razvojne smernice. Izbor literature je bil usmerjen v področja energijske učinkovitosti, inteligentnega krmiljenja, digitalizacije, mehke robotike ter trajnostnih pristopov v pnevmatičnih sistemih.

2 Stanje na področju tehnike in naprednih pristopov

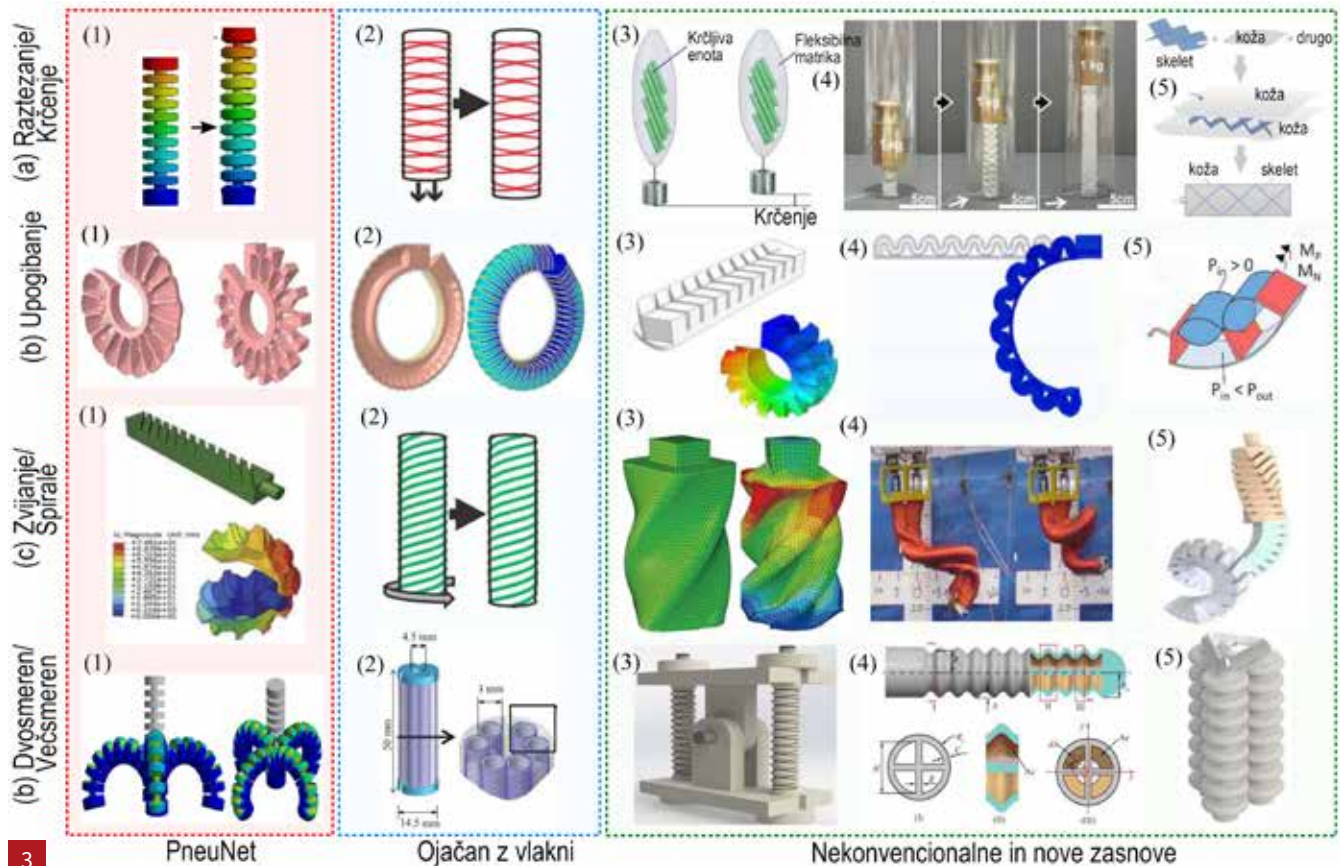
2.1 Pnevmatični aktuatorji

Nedavni razvoj na področju pnevmatičnih aktuatorjev je bistveno razširil njihove zmožnosti zlasti glede miniaturizacije, prilagodljivosti in integracije z mehki materiali. Ti napredki omogočajo nove aplikacije v robotiki, biomedicinskih napravah in lahkih sistemih za avtomatizacijo.



3D natisnjen aktuator: (a) glavne komponente, (b) sestav in (c) 3D natisnjen realen aktuator [5]

Ena najbolj obetavnih smeri je uporaba aditivnih tehnologij za izdelavo kompaktnih in lahkih pnevmatičnih aktuatorjev. Nall in Bhounsule [5] sta predstavila 3D natisnjen dvostransko delujoč pnevmatični aktuator z razmerjem med močjo in maso, primerljivim s komercialnimi rešitvami (slika 2). Masa aktuatorjev je le 0,012 kg, pri delovnem tlaku 0,4 MPa dosega izhodno moč 2 W in je bil uspešno integriran v robotiko. Takšni aktuatorji ponujajo prednosti, kot so hitro prototipiranje in pri-



Dizajn mehkih aktuatorjev: (a) krčenje in raztezanje: (1), (2), (3), (4) in (5); (b) upogibanje: (1), (2), (3), (4) in (5); (c) sukanje in zvijanje: (1), (2), (3), (4) in (5); (d) dvosmerni in večsmerni princip: (1), (2), (3), (4) in (5) [6]

lagoditev, integracija strukturnih in funkcionalnih komponent ter nizkocenovna izdelava z uporabo cenених 3D-tiskalnikov. Zato so posebej primerni za izobraževanje robotike, nosljive naprave in raziskovalno delo na področju mehke robotike.

Mehka robotika in biomedicinske aplikacije so se uveljavile kot ključno področje, kjer imajo pnevmatika in pnevmatični aktuatorji osrednjo vlogo.

Aktuatorji, pogosto izdelani iz elastomerov ali tekstila, omogočajo varno in prilagodljivo interakcijo z ljudmi (*slika 3*) [6]. Posebej so primerni za biomedicinske aplikacije, kot so naprave za asistiranje in kirurška orodja.

Nedavne raziskave se osredotočajo na razvoj funkcijsko gradiranih materialov za doseganje spremenljive togosti, antagonističnih sistemov aktuatorjev, izdelanih s stereolitografijo, ter mehkih robotov, gnanih z zgorevanjem, namenjenih aplikacijam z visoko potisno silo. Ti aktuatorji izkoriščajo inherentno skladnost mehkih materialov, kar omogoča kompleksna gibanja in varno fizično interakcijo. Kljub temu ostajajo izzivi pri modeliranju njihovega nelinearnega obnašanja ter doseganju natančnega krmiljenja.

Integracija miniaturnih in mehkih aktuatorjev v robotske sisteme je privedla do novih aplikacij, kot so tako imenovani »skalarni« roboti z visoko energijsko učinkovitostjo [5] ter manipulatorji v obliki lovk, pa tudi kompaktni aktuatorji za nosljive eksoskelete in proteze [6]. Te aplikacije poudarjajo vsestranskost pnevmatičnega pogona na področjih, kjer so masa, varnost in prilagodljivost ključnega pomena.

Za obvladovanje kompleksnosti mehkih in mikroaktuatorjev se raziskovalci vse pogostejše zatekajo k podatkovno vodnemu modeliranju in naprednim strategijam krmiljenja. Spodbujevalno učenje in nevronske mreže se uporabljajo za izboljšanje prilagodljivosti in zmogljivosti sistemov.

2.2 Inteligentno krmiljenje in integracija v industriji 4.0

Integracija inteligentnega krmiljenja in digitalnih tehnologij preoblikuje pnevmatične sisteme v prilagodljive, učinkovite in medsebojno povezane komponente, primerne za sodobno av-

tomatizacijo. Ta napredek izhaja iz potrebe po večji natančnosti, energijski učinkovitosti in učinkoviti integraciji po principu industrije 4.0.

2.2.1 Proporcionalna in digitalna pnevmatika

Tradicionalno preklopno tehniko vse bolj nadomeščajo proporcionalni in digitalni krmilni ventilski sistemi, ki omogočajo natančnejšo regulacijo delovnega tlaka in pretoka. Proporcionalni ventili, pogosto krmiljeni z analognimi signali ali s pulzno širinsko modulacijo (PWM), omogočajo zvezno krmiljenje sile in hitrosti aktuatorjev.

Nedavni razvoj vključuje modularne sisteme in uporabo PWM-krmiljenja za zvezno regulacijo pretoka, ki omogoča izredno hitro preklapljanje (do 1500 Hz). [9]

Ena izmed možnih alternativ hidravličnim sistemom je tudi pnevmatični sistem, zasnovan za dinamično preizkušanje trdnosti materialov, zlasti materialov z nizko trdnostjo, kot so naravna vlakna (*slika 4a*). Sistem uporablja pnevmatični valj za apliciranje cikličnih obremenitev in natezno-tlačnih zveznih obremenitev. Sila je krmiljena s proporcionalnim tlačnim ventilom in PID-regulatorjem, implementiranim na PLK, združitvim z Arduino sistemom (*slika 4b*).

Uporabniški vmesnik na dotik omogoča intuitivno upravljanje in spremljanje v realnem času. Eksperimentalni preizkusi potrjujejo natančno regulacijo do maksimalne sile 11 kN (zvezna tlačna regulacija dosega $\pm 1\%$ linearnosti v celotnem obratovalnem območju od 0,05 MPa do 0,75 MPa). Zagotavlja zanesljivo delovanje pri nizkofrekvenčnem trajnostnem preizkušanju dinamične utrujenosti materialov. Sistem predstavlja stroškovno učinkovito in prenosno rešitev za laboratorije, ki se osredotočajo na preizkušanje materialov z nizko trdnostjo ali naravnih materialov. [10]

Za podobne sisteme, predstavljene na sliki 4, se uveljavlja digitalna pnevmatika, krmiljena s piezoventili. Ti so krmiljeni z binarno metodo in uporabo pametnih ventilskih terminalov. Sistemi omogočajo natančno in programabilno krmiljenje in so pogosto integrirani z vgrajenimi senzorji in mikrokrmilniki, kar omogoča povratne informacije in diagnostiko v realnem času. [11], [12]



a) Pnevmatična naprava



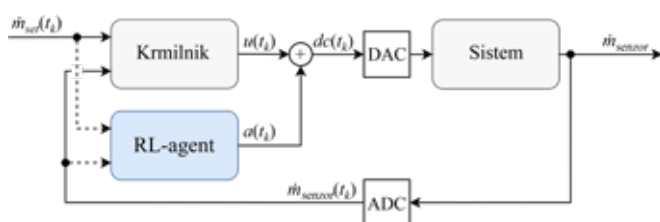
b) Proporcionalni tlačni ventil

4

Pnevmatična naprava za dinamično utrujanje materialov [10]

2.2.2 Umetna inteligenca in adaptivno krmiljenje

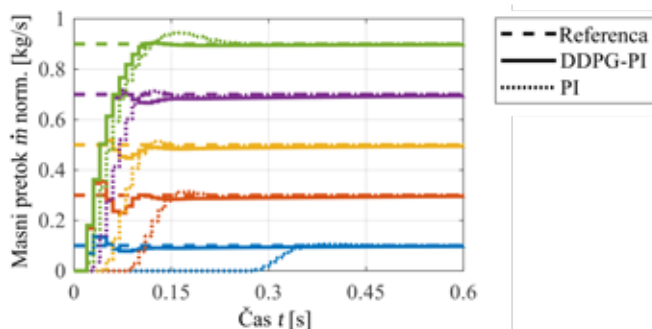
Eden najbolj obetavnih trendov na področju inteligentnega krmiljenja je uporaba spodbujevalnega učenja (ang. RL – Reinforcement Learning) in nevronske mreže (NN). Allmendinger in Erhard [13] sta predstavila hibridni pristop krmiljenja, pri katerem je bil agent na osnovi metode DDPG (ang. Deep Deterministic Policy Gradient) naučen v virtualnem okolju za izboljšanje delovanja klasičnega PI/PID-regulatorja pri regulaciji masnega pretoka (slika 5).



5 Struktura in glavne komponente modela strojnega učenja [13]

Krmilnik, izboljššan z RL, je dosegel stabilnejši odziv in boljšo prilagodljivost na spremenljive pogoje, kot so spremembe vstopnega tlaka in temperature tuljave (slika 6).

Ta pristop poudarja potencial podatkovno vodenega krmiljenja za kompenzacijo nelinearnosti in negotovosti, izboljšanje robustnosti in prilagodljivosti ter omogoča samodejno nastavljanje in napovedno obnašanje pnevmatičnega sistema.



6 Primerjava krmilnih sposobnosti med izboljšanim DDPG-PI in običajnim PI-krmiljenjem [13]

2.3 IoT, IIoT, digitalni dvojčki in pametna pnevmatika

Novi trend pnevmatike z industrijskim internetom stvari (IIoT) in tehnologijami digitalnih dvojčkov omogoča napovedno vzdrževanje, oddaljeno spremljanje in optimizacijo sistema. Pametni pnevmatični sistemi so opremljeni z vgrajenimi senzorji za tlak, masni pretok, temperaturo in položaj aktuatorjev, ki s pomočjo trenutno industrijsko uveljavljene brezžične 5G-tehnologije posredujejo podatke v oblaku za nadaljnjo analitiko [14]. Tehnologija 5G in prihajajoča 6G-tehnologija sta še posebej pomembni za modularne proizvodne sisteme in po-

razdeljena krmilna omrežja [15]. Glavni akterji na področju pnevmatike, kot sta FESTO in SMC, sta predlagala in razvila pametne večnivojske platforme s podporo IIoT (inteligentne naprave z vgrajenimi senzorji in robnimi računalniki; nivo za krmiljenje in upravljanje stroja s PLC, vodno/izhodnimi napravami ter nivo podatkovne analitike v oblaku za spremljanje in izvajanje ukrepov v realnem času, diagnostike, predvidenega vzdrževanja in optimizacije energije [16].

Glavne prednosti so:

- ▶ zgodnje odkrivanje notranjega puščanja in obrabe komponent,
- ▶ optimizacija energijske rabe,
- ▶ spremljanje in diagnostika v realnem času.

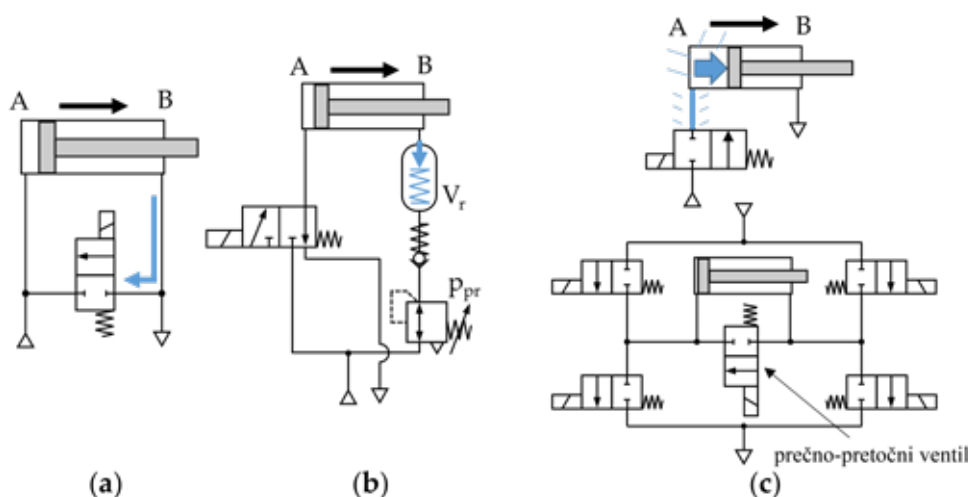
Digitalni dvojčki, digitalne replike fizičnih pnevmatičnih sistemov, omogočajo simulacijo, testiranje in optimizacijo strategij krmiljenja sistemov pred njihovo dejansko implementacijo. To močno skrajša čas zagona in poveča zanesljivost sistema. Sodobni pnevmatični sistemi se vse bolj integrirajo v kibernetično-fizične sisteme (CPS), kjer v arhitekturi povratne zanke komunicirajo z digitalnimi krmilniki, senzorji in aktuatorji. Hibridni sistemi, ki združujejo pnevmatično in električno aktiviranje, prav tako pridobivajo na veljavi in ponujajo prednosti obeh tehnologij v smislu natančnosti in energijske učinkovitosti. Te integracije podpirajo širše cilje industrije 4.0, vključno z modularno in rekonfigurabilno avtomatizacijo, decentraliziranim krmiljenjem in robnim računalništvom ter izboljšanim sodelovanjem med človekom in strojem [8], [16], [17], [18], [19].

2.4 Energijska učinkovitost pnevmatičnih sistemov

Energijska učinkovitost je postala eno osrednjih vprašanj pri načrtovanju pnevmatičnih sistemov, kar je posledica naraščajočih stroškov energije, ciljev trajnostnega razvoja in potrebe po konkurenčni industrijski avtomatizaciji. Tradicionalni pnevmatični sistemi so pogosto deležni kritik zaradi svoje nizke energijske učinkovitosti, ki se običajno giblje med 5 in 20 % [20], [21], [22], [23], [24], [25]. Pomembno je poudariti, da stisnjeni zrak ni primarni vir energije, temveč energijski nosilec, pri katerem se zaradi procesa kompresije in distribucije pojavljajo znatne energijske izgube. Zato je optimizacija pnevmatičnih sistemov ključna za zmanjšanje skupne porabe energije.

Nedavne raziskave so uvedle več inovativnih strategij za znatno zmanjšanje porabe zraka in izboljšanje celotne zmogljivosti sistema. Ena izmed možnih in preprostih rešitev so energijsko varčna vezja (slika 7). Omenjena vezja vključujejo vezave, ki po svoji zasnovi odstopajo od standardnih pnevmatičnih vezij in katerih namen je zmanjšati količino stisnjenega zraka, dovajanega v sistem [21].

Ena izmed najučinkovitejših metod za izboljšanje energijske učinkovitosti je uporaba prekinitvenega dovajanja zraka. Namesto neprekinjenega dovajanja stisnjenega zraka skozi celoten hod aktuatorja ta metoda uporablja nadzorovane impulze zraka, pri čemer lahko aktuator učinkoviteje izkorišča ekspanzijsko energijo zraka. Gryboš in Leszczyński sta pokazala, da je s takšnim pristopom mogoče zmanjšati porabo stisnjenega



7

Osnovni principi energijskih vezij: (a) skrajšan povratni tok, (b) shranjevanje zraka na izstopni strani in (c) zgoraj: prekinjen princip pri iztegu valja, spodaj: ekspanzijski most z dodatnim prečno-pretočnim ventilom [21] 2

zraka za do približno 60 % v obravnavanih eksperimentalnih pogojih in pri ustrezno izbranih parametrih krmiljenja, hkrati pa ohraniti zahtevano raven zmogljivosti sistema [22]. Avtorja sta razvila dinamični model in ga eksperimentalno preverila ter pokazala, da profili hitrosti in sile aktuatorja ostanejo znotraj sprejemljivih meja, medtem ko se potrebna energija bistveno zmanjša.

Slika 8 prikazuje tok eksergije v klasičnih pnevmatičnih sistemih in sistemih s prekinitvenim dovajanjem zraka, pri čemer je razviden premik energijskih izgub iz dušilnega ventila v distribucijski pnevmatični podsistem oziroma cevovode.

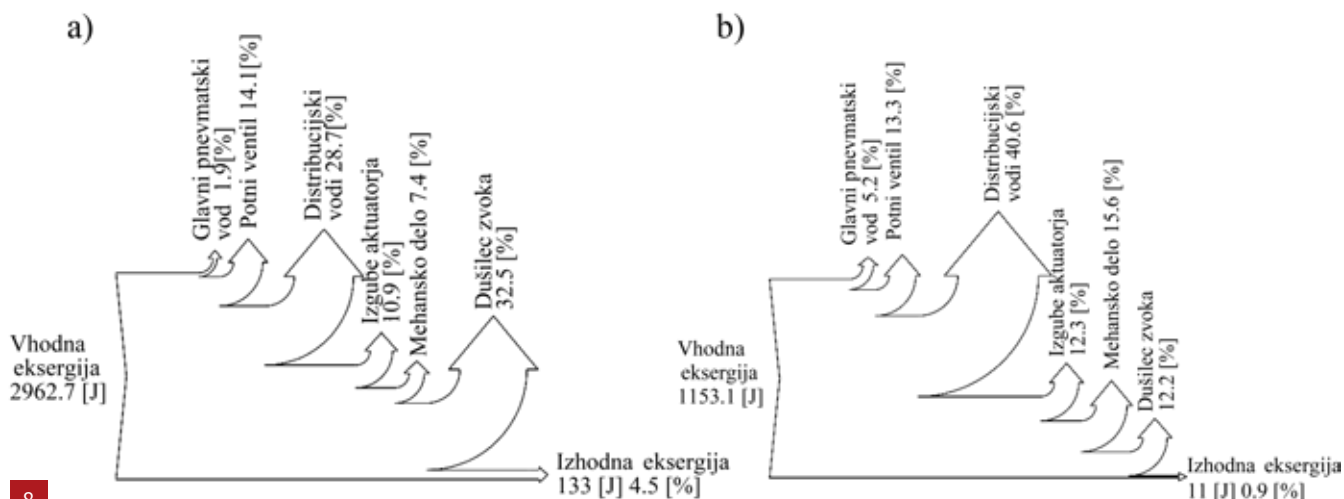
Pravilno dimenzioniranje pnevmatičnih aktuatorjev in ventilov je še en ključni dejavnik pri zmanjševanju energijskih izgub. Predimenzionirani aktuatorji porabijo več zraka, kot je potrebno, zlasti pri nalogah, ki vključujejo gibanje. Doll in sodelavci [7] so predstavili PFR (razmernik pnevmatične frekvence) kot kazalnik za optimizacijo dimenzioniranja aktuatorjev na podlagi dolžine hoda, obremenitve in prehodnega časa. Njihova metoda zagotavlja, da aktuator deluje znotraj učinkovitega dinamičnega območja, s čimer se preprečuje prekomerna poraba stisnjenega zraka ob hkratnem ohranjanju zahtevane zmogljivosti sistema.

Poleg tega se kot obetavne kažejo tudi kombinirane strategije dušenja pretoka, kot je prilagodljivo dušenje na dovodni in odvodni strani. Reese in sodelavci [26] so razvili novo pnevmatično vezje (slika 9b), ki združuje hitroodzračevalne ventile (HOV), dušenje zraka na izpustu in krmiljenje dovodnega zraka, pri čemer so dosegli znatne prihranke stisnjenega zraka brez poslabšanja delovnega cikla (ohranitev časa cikla).

Druge strategije, prikazane v [22], vključujejo uporabo regulacije protitlaka in sistemov za rekuperacijo energije. Z uvedbo nadzorovanega protitlaka v izhodni cevi je mogoče ponovno uporabiti del energije ekspanzije in zmanjšati porabo zraka. Te metode so še posebej učinkovite v sistemih z visokofrekvenčnim aktiviranjem ali dolgimi dolžinami hoda pnevmatičnih valjev.

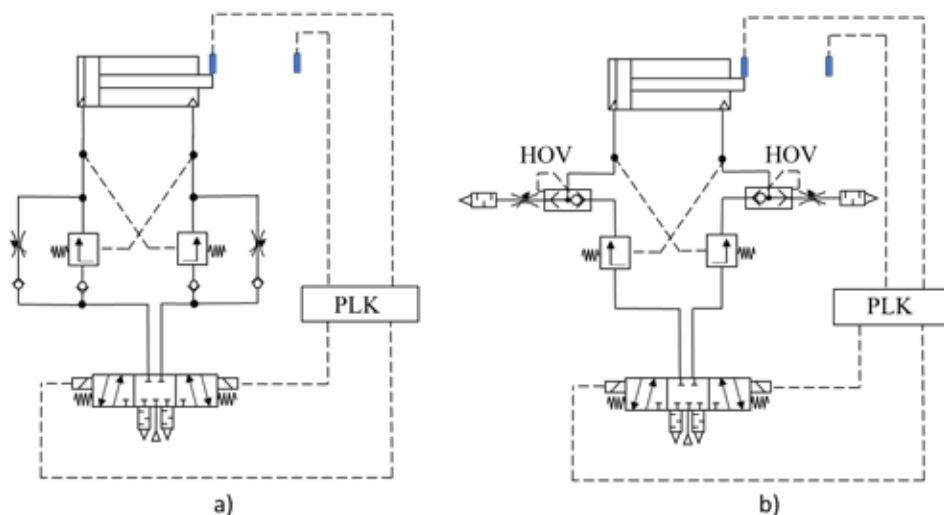
3 Trendi za prihodnost

Razvoj pnevmatičnih sistemov oblikuje konvergenca tehnoloških, okoljskih in ekonomskih dejavnikov. Ker se industrije preusmerjajo k pametnejšim, bolj trajnostnim in digitalno integriranim operacijam, je pnevmatika pripravljena prevzeti novo vlogo v sistemih naslednje generacije industrijske avtomatiza-



8

Sankeyev diagram: a) eksergijski tokovi v klasičnem in b) prekinitvenem dovajanju zraka v pnevmatičnem sistemu [22]



9

Adaptivno dušenje na dovodu: a) originalno vezje in b) vezje s hitrood-zračevalnimi ventili [26]

cije. Tukaj so predstavljeni tipični primeri, osredotočeni na trajnost in ekološko ozaveščeno zasnovo tovarn, celotnih pnevmatičnih postrojenj ali posameznih pnevmatičnih sistemov.

Nedavni trend, ki ga podpirajo vsi večji akterji na področju pnevmatike, je osredotočen na zmanjšanje dovodnega tlaka s tradicionalnih 0,6 MPa na 0,4 MPa (tako imenovana tovarna z delovnim tlakom 0,4 MPa) [23], [24], [25]. Cilj tega je znatno zmanjšanje porabe energije, obratovalnih stroškov in emisij CO₂. Ker proizvodnja stisnjenega zraka predstavlja veliko energijsko potratno in industrijsko obremenitev, lahko že manjše znižanje delovnega tlaka vodi do bistvenega povečanja učinkovitosti (za vsak 0,1 MPa znižanja dovodnega ali delovnega tlaka se v povprečju porabi 6–8 % manj specifične moči, potrebne za generiranje delovnega tlaka). Omenjena vrednost predstavlja tipično oceno iz industrijske prakse, dejanski prihranki pa so odvisni od karakteristik kompresorske postaje, stopnje puščanj in profila porabe stisnjenega zraka v obratu.

Uvedba principa tovarne z delovnim tlakom 0,4 MPa zahteva fazni pristop, začenši z oceno potreb po tlaku in pretoku v celotnem industrijskem obratu ter podrobnim preverjanjem načel delovanja vseh pnevmatičnih komponent pod nižjim delovnim tlakom. Lokalizirano krmiljenje, shranjevanje zraka in manjše spremembe komponent pogosto omogočajo učinkovito delovanje obstoječe opreme pri nižjih delovnih tlakih in zato prilagoditve niso zahtevne ali niso potrebne. Ko je potrjena stabilnost na ravni stroja, podsistema, se lahko dovodni tlak v celotni tovarni postopoma zniža, kar zmanjša obremenitev kompresorja kompresorske postaje in s tem povezano porabo energije. Ta prehod vključuje tudi ponovno opredelitev standardov načrtovanja sistemov pod obratovalnimi pogoji z nižjim delovnim tlakom. Kjer je občasno potreben višji delovni tlak, se lahko uporabijo lokalni tlačni ojačevalniki. Takšen koncept tovarne ni le tehnična nadgradnja, temveč strateški korak k bolj trajnostni in učinkoviti proizvodnji. [23], [24], [27]

Naslednji pristop k trajnosti vključuje kvantifikacijo emisij toplogrednih plinov, povezanih s pnevmatičnimi komponentami. Sprink in Schmitz [28] sta izvedla analizo ogljičnega odtisa izdelka (ang. PCF – Product Carbon Footprint) različnih pnevmatičnih aktuatorjev (valjev) in ventilov od začetka do konca njihove življenjske dobe. Njuna študija je pokazala znatno

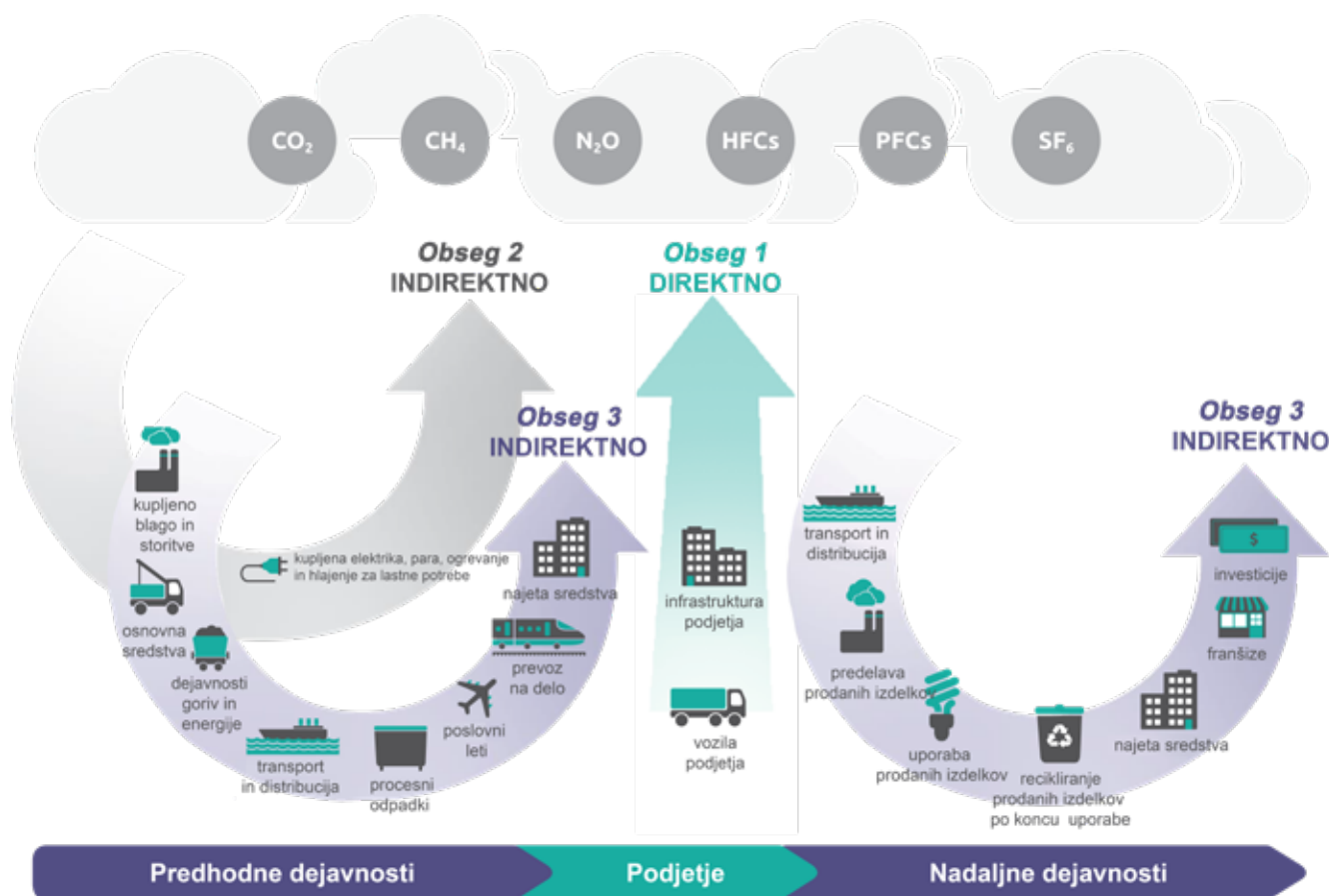
variabilnost emisij, odvisno od izvora materiala, proizvodnih procesov in kakovosti vhodnih, merjenih podatkov. Da bi zagotovili primerljivost, so avtorji poudarili potrebo po standardiziranih sistemskih mejah, preglednem poročanju o predpostavkah in uporabi primarnih podatkov, kjer je to mogoče. Slika 10 prikazuje sistemsko mejo, uporabljeno v njuni analizi PCF, ki zajema pridobivanje surovin, proizvodnjo komponent in montažo. Ta okvir podpira ocene trajnosti in strategije digitalne integracije.

Integracija analize PCF z digitalnimi orodji, kot so digitalni dvojčki in platforma za internet stvari, omogoča spremljanje okoljskega vpliva v realnem času. To podpira informirano odločanje pri načrtovanju, nabavi in delovanju. Poleg tega proizvajalci vedno bolj ponujajo nizkoogljične alternative, kot so komponente iz recikliranih materialov ali proizvedene z uporabo obnovljive energije.

Drugi možni pristop k trajnosti je optimizacija sile prijema (potrebne sile držanja) v pnevmatičnih sistemih. Eberhardt in sodelavci [29] so predlagali metodo za izračun potrebne sile držanja z vakuumskimi prijemali pri robotski aplikaciji in upoštevanjem kota držanja prijemanca med robotsko strego (slika 11). Primer prikazuje, kako lahko sprememba v velikosti 6° rotacije vpliva na dobrih 17 % manj potrebne sile prijemanja ali sile med strego objektov.

S prilagajanjem sile prijema dejanski dinamični obremenitvi vzdolž poti robota ali katere koli druge strežne naprave se je mogoče izogniti nepotrebnim porabi zraka, kar vodi tako do prihranka energije kot tudi do manjše obrabe komponent pnevmatičnih sistemov. Ta metoda podpira trajnostno avtomatizacijo, nov standard za dimenzioniranje robotskih pnevmatičnih prijemal. V obravnavanem primeru je bila ocenjena možnost podaljšanja življenjske dobe komponent do približno 10 %, odvisno od dejanske uporabe in obremenitev sistema. Glavni izziv predstavlja prilagodljivo krmiljenje potrebnega dovoda zraka in s tem velikosti podtlaka v sistemu ali krmiljenje vakuumske črpalke v realnem času.

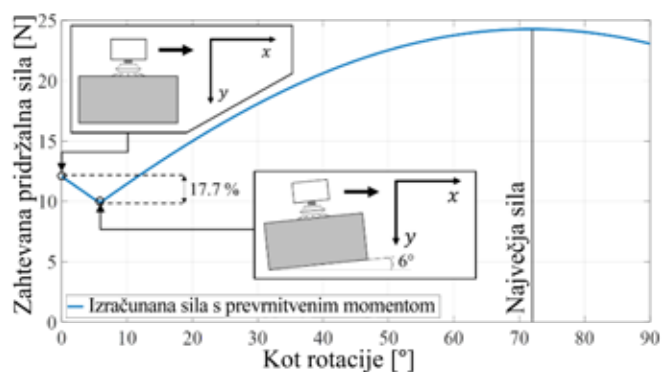
Na podlagi predstavljenih naprednih pristopov in trendov razvoja v pnevmatiki, opisanih v [30], [31], [32], lahko povzamemo:



10 Sistemska meja za analizo ogljičnega odtisa izdelka (PCF) – življenjski cikel pnevmatičnih komponent [28]

- ▶ Miniaturizacija, ki jo podpirata mehka robotika in mikro-proizvodnja, širi pnevmatiko na področja mobilne/nosljive elektronike in biomedicine s poudarkom na nizkotlačnem, kompaktnem in varnem aktiviranju.
- ▶ Razvite so nove strategije za izboljšanje učinkovitosti pnevmatičnih sistemov, kot so preprečevanje puščanja, uporaba pravilno dimenzioniranih komponent in vzdrževanje. Te poudarjajo tudi vlogo pametnih orodij za spremljanje, kot so merilniki pretoka FLUX in ventili, ki jih podpira internet stvari, pri zmanjševanju porabe energije in omogočanju napovednega vzdrževanja.
- ▶ V robotiki se zdaj uporabljajo nova pnevmatična prijemala, ki v kompaktnem ohišju, krmiljena preko IO-Link povezave, integrirajo ventile, senzorje absolutnega položaja in zaznavanje delov. Te enote zagotavljajo visoke hitrosti ciklov (do 500 prijemov/min za RPG). Po navedbah proizvajalcev in predstavljenih primerih uporabe lahko takšni sistemi v specifičnih aplikacijah porabijo do 90 % manj stisnjenega zraka kot primerljive konvencionalne rešitve. Hkrati omenjeni sistemi podpirajo napovedno vzdrževanje z vgrajeno diagnostiko.
- ▶ Uporaba senzorjev pretoka zraka v kombinaciji z modularnimi sistemi, ki jih podpira IIoT (industrijski internet stvari), in tehnologijo 5G, omogoča preprosto integracijo in spremljanje v realnem času za zmanjšanje porabe stisnjenega zraka (prihranek 10–20 % energije in emisij).
- ▶ Uporaba naprednih materialov in premazov znatno izboljšuje vzdržljivost in zmogljivost pnevmatičnih komponent.
- ▶ Trenutni pristopi se osredotočajo na integracijo pnevmatike v kibernetsko-fizične sisteme preko digitalnih dvojčkov, kar omogoča spremljanje v realnem času, simulacijo in napovedno vzdrževanje. Ta digitalna orodja izboljšujejo zmogljivost in so usklajena s cilji industrije 4.0.

- ▶ Pojavljajo se hibridni pnevmatsko-električni sistemi, ki združujejo gostoto moči pnevmatike z natančnostjo električnih aktuatorjev, zlasti v sodelovalnih robotih in modularni avtomatizaciji.
- ▶ Umetna inteligenca izboljšuje krmiljenje pnevmatičnih sistemov in naprav s samodejno prilagodljivimi algoritmi, ki se prilagajajo v realnem času, kar omogoča pametnejše odkrivanje napak, avtonomno in učinkovito načrtovanje sistemov.



11 Zmanjšana potrebna sila držanja s pametno poravnavo prijemalnega predmeta [29]

- Trajnost spodbuja uporabo recikliranih ali biološko zasnovanih materialov in načel krožnega načrtovanja, kar podpirajo vse večje zahteve po preglednem poročanju o ogljičnem odtisu.

4 Zaključki

Razvoj pnevmatičnih sistemov v zadnjih letih zaznamujejo številni tehnološki napredki, ki pomembno prispevajo k večji učinkovitosti, prilagodljivosti in inteligentnosti teh sistemov. Integracija miniaturnih 3D tiskanih in mehkih aktuatorjev (pnevmatičnih valjev) širi področje uporabe pnevmatike na robotiko, biomedicino in nosljive naprave, kjer so majhna masa, prilagodljivost in varno delovanje bistvenega pomena. Hkrati napredne strategije vodenja, zlasti pristopi, ki temeljijo na spodbujevalnem učenju (RL) in digitalni pnevmatiki, pomembno izboljšujejo prilagodljivost, natančnost in energijsko učinkovitost pnevmatičnih sistemov. Ker gre za pregledni članek, predstavljeni rezultati in številčne vrednosti izhajajo iz različnih raziskovalnih in industrijskih študij ter jih ni mogoče neposredno posplošiti na vse pnevmatične aplikacije, kljub temu jasno nakazujejo razvojne smeri in potencial sodobnih pnevmatičnih sistemov.

Energijska učinkovitost ostaja ena osrednjih razvojnih usmeritev in priložnosti. Pristopi, kot so prekinitevno dovajanje stisnjenega zraka, optimirano dimenzioniranje aktuatorjev, kombinirani pristopi in vezja z dušenjem in protitlakom ter uporaba nižjih delovnih tlakov (npr. sistemi, primerni za delovni tlak 0,4 MPa), omogočajo pomembne prihranke zraka in energije. S tem se ne zmanjšujejo le obratovalni stroški, temveč se hkrati podpira uresničevanje trajnostnih ciljev.

Digitalizacija pnevmatične sisteme vse bolj preoblikuje v pametne kibernetsko-fizične sisteme. Integracija senzorjev industrijskega interneta stvari (IIoT), omrežij 5G, digitalnih dvojčkov sistemov in procesov ter umetne inteligence omogoča prediktivno vzdrževanje, sprotno spremljanje stanja ter optimizacijo delovanja na podlagi podatkov. Poleg tega trajnost postaja pomembno merilo pri načrtovanju sistemov, kar potrjuje metode za ocenjevanje okoljskih vplivov skozi življenjski cikel, kot je analiza ogljičnega odtisa izdelka (PCF), ter razvoj okolju prijaznejših materialov in energijsko učinkovitih strategij krmiljenja.

V prihodnje pnevmatični sistemi predstavljajo enega ključnih gradnikov industrije 4.0, ki jo zaznamujejo hibridni aktuatorski sistemi, inteligentna diagnostika, modularne arhitekture in okoljsko odgovorno načrtovanje. Ti dosežki potrjujejo, da pnevmatika ni zgolj tradicionalna tehnologija, temveč vsestranska, prilagodljiva in trajnostna tehnološka platforma, pripravljena na izzive in zahteve avtomatizacije naslednje generacije.

Literatura

- [1] SMC (2019). 8 Advantages of Pneumatic Systems, SMC Pneumatics USA- Orange Coast Pneumatics. https://www.smcpcneumatics.com/8-Advantages-of-Pneumatic-Systems_b_31.html.
- [2] Nuryasin, A. (2025). Advantages and Disadvantages of Pneumatic Systems in Industrial Automation. PT Bawalaksana Central Industrial. <https://bawalaksana.co/advantages-and-disadvantages-of-pneumatic-systems/>.
- [3] MADER (2018). Optimale Drucklufttechnik und Pneumatik in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie. <https://www.mader.eu/aktuell/2018/branchenpaket-leitfaden-fuer-effiziente-druckluft-der-lebensmittel-und->
- [4] Singh, A. P. A., Gameti, N., Gupta, S. (2024). Future Trends in Industrial Hydraulics and Pneumatics: Implications for Operations and Maintenance. *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering and Science*, 10 (10), 15–25. doi: <https://ijtimes.com/index.php/ijtimes/article/view/3442>.
- [5] Nall, C. L., & Bhounsule, P. A. (2019). A Miniature 3D Printed On-Off Linear Pneumatic Actuator and Its Demonstration into a Cartoon Character of a Hopping Lamp. *Actuators*, 8(4), 72. doi: <https://doi.org/10.3390/act8040072>.
- [6] Xavier, M. S. et al. (2022). Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 59442–59485, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3179589.
- [7] Doll, M., Neumann, R., Gauchel, W. (2024). Sizing of pneumatic drives under energy efficiency aspects. 4th International Fluid Power Conference, Dresden 2024.
- [8] SMC (2019). Factory Automation Trends. SMC Corporation. <https://www.smc.eu/da-dk/focus-articles/trends>.
- [9] Avram, M., et al. (2020). Trends and perspectives in proportional pneumatics. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* doi: 10.1088/1757-899X/997/1/012034.
- [10] Šitum, Ž., Bača, M. M., Benić, J., Alar, Ž. (2024). Control of a Pneumatic System for Material Strength Testing. 4th International Fluid Power Conference, Dresden 2024.
- [11] FESTO (2024). Pneumatics Makes a Technological Leap with Piezo. <https://press.festo.com/en-US/node/4679>.
- [12] FESTO (2015). Piezo technology in pneumatic valves. https://www.festo.com/tw/en/e/solutions/piezo-technology-shape-the-future-of-automation-id_1519983/.
- [13] Allmendinger, M., Erhard, M. (2024). Reinforcement learning-based PID controller design for mass flow. Control of a Pneumatic System for Material Strength Testing. 4th International Fluid Power Conference, Dresden 2024.
- [14] Rowse, T. (2022). What is Smart Pneumatics? <https://www.rowse-pneumatics.co.uk/blog/post/what-is-smart-pneumatics?srsId=AfmBOoogVomE8SmMzk24IA6gfSINFCIOUgdpKekImgajTcLP7tJGo5Y>.
- [15] Sotiris, M., Lenz, S., Vogt, T., Henze, M. (2025). Secure integration of 5G in industrial networks: State of the art, challenges and opportunities, *Future Generation Computer Systems*, Volume 166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.107645>.
- [16] EMERSON (2019). Improve Machine Performance with IIoT Solutions. Emerson Electric Co. AVENTICS.
- [17] Weiss Robotics (2025). Smart Pneumatics – Hybrid technologies provide advantages. <https://weiss-robotics.com/smart-pneumatics/>.
- [18] SPS Pneumatic Tools. (2025). The Future of Pneumatic Technology: Trends to Watch in 2025. SPS Enterprises. <https://www.spspneumatictools.com/future-of-pneumatic-technology-trends-2025>.
- [19] Hufnagl, H., Čebular, A., Stemler, M. (2021). Trends in pneumatics - digitalization. International conference Fluid Power 2021. doi: <https://doi.org/10.18690/978-961->

- 286-513-9.
- [20] Nuryasin, A. (2024). How to improve pneumatic system efficiency for green manufacturing. PT. Bawalaksana Central Industrial. <https://bawalaksana.co/how-to-improve-pneumatic-system-efficiency/>
- [21] Boyko, V., Wener, J. (2023). Energy Efficiency of Pneumatic Actuating Systems with Pressure-Based Air Supply Cut-Off. *Actuators*, 13, 44. doi: <https://doi.org/10.3390/act13010044>.
- [22] Gryboś, D., Leszczyński, J. (2024). Exergy analysis for the intermittent air supply in pneumatic machines. 4th International Fluid Power Conference, Dresden 2024.
- [23] SMC (2024). 4-Bar Factory – Accept the Challenge. SMC Corporation <https://www.smc.eu/fi-fi/solutions/energy-efficiency/4-bar-factory>.
- [24] SMC (2024). Energy efficiency – Energy Optimization with SMC strategy. SMC Corporation. <https://www.smc.eu/fi-fi/solutions/energy-efficiency>.
- [25] FESTO (2025). Compressed Air Energy Efficiency Audit. FESTO Corporation. https://www.festo.com/us/en/e-support/additional-services/compressed-air-energy-efficiency-audit-id_2012747/.
- [26] Reese, C., Reinertz, O., Schmitz, K. (2024). Feasibility study and experimental validation of a novel combined throttling approach. 4th International Fluid Power Conference, Dresden 2024.
- [27] Schipiour, S. (2024). Transformative Advancements in Pneumatic Systems – Trends, Technologies, and Industry Applications. *Fluid Power Journal*. <https://fluidpowerjournal.com/transformative-advancements-in-pneumatic-systems/>.
- [28] Sprink, J., Schmitz, K. (2024). Product carbon footprint of hydraulic and pneumatic components – challenges in accounting and comparability. 4th International Fluid Power Conference, Dresden 2024.
- [29] Eberhardt, T., Stegmaier, V., Schaaf, W., Verl, A. (2024). A trajectory-specific approach for calculating the required holding force for surface grippers. 4th International Fluid Power Conference, Dresden 2024.
- [30] Brezni, R. (2022). On the Air: How Smart Pneumatics Saves Costs and Helps the Planet, *Fluid Power Journal*. <https://fluidpowerjournal.com/on-the-air-how-smart-pneumatics-saves-costs-and-helps-the-planet/>.
- [31] Melzer, F. (2022). When the Future of Robotics Becomes Pneumatics. *Tech Briefs – Engineering Solutions for Design & Manufacturing*. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/46682-when-the-future-of-robotics-becomes-pneumatics>.
- [32] Motion Control & Drives (2024). Latest trends in pneumatics systems. *South African Instrumentation and control*. <https://www.instrumentation.co.za/21217r>.

New approaches, technologies and trends in production pneumatic systems and processes

Abstract:

The growing demand for more energy-efficient, flexible and intelligent industrial systems is driving intensive development and innovation in the field of pneumatics. The development of miniature 3D-printed and soft pneumatic actuators enables lightweight, flexible and safe solutions for use in robotics and biomedical applications. Proportional and digital pneumatics are further developing towards Industry 4.0, with reinforcement learning methods improving the adaptability of control systems. Methods for reducing energy consumption, including intermittent compressed air supply, shut-off circuits for pressure regulation, optimized component sizing and new flow damping approaches. Calculation of gripping force based on motion trajectory and analysis of the product's carbon footprint contribute to the implementation of sustainable practices. The field of soft robotics is further enriched by new actuator designs, data-driven models and nonlinear control strategies. Experimental results confirm the practical applicability and effectiveness of the presented technologies. The review thus confirms pneumatics as a versatile, efficient and environmentally responsible technology platform for modern automation, which, through the integration of the Internet of Things (IoT), digital twins and hybrid systems, represents an important foundation for future fluid technology solutions.

Keywords:

Pneumatics, energy efficiency, robotics, intelligent control, automation, sustainability

Zahvala in financiranje

Raziskava je bila izvedena v okviru raziskovalnega programa Inovativni proizvodni sistemi in procesi, št. financiranja (P2-0248), ki ga financira Republika Slovenija – Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport.

