

IZZIVI PRI OPTIMIRANJU FUNKCIJE VZDRŽEVANJA

ALENKA BREZAVŠČEK,¹ DAMJAN MALETIČ²

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija
alenska.brezavscek@um.si

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija
damjan.maletic@um.si

Namen poglavja je predstaviti in sistematično klasificirati konkretne optimizacijske izzive na področju vzdrževanja s ciljem postaviti ustrezne temelje za razvoj in uporabo primernih matematičnih modelov, ki bodo v praksi v pomoč pri iskanju optimalnih rešitev. Pričujoče poglavje tako podaja pregled nekaterih izbranih konkretnih optimizacijskih problemov, vezanih na aktivnosti funkcije vzdrževanja. Ravno tako izpostavljamo pomembnost uporabe primernih sistemov za upravljanje vzdrževanja (ang. Computerized Maintenance Management System - CMMS) z namenom optimizacije funkcije vzdrževanja.

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fov.2.2024.2](https://doi.org/10.18690/um.fov.2.2024.2)

ISBN
978-961-286-821-5

Ključne besede:
vzdrževanje,
preventivno vzdrževanje,
strategija vzdrževanja,
stroški vzdrževanja,
optimiranje



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fov.2.2024.2](https://doi.org/10.18690/um.fov.2.2024.2)

ISBN

978-961-286-821-5

Keywords:

maintenance,
preventive maintenance,
maintenance strategy,
maintenance costs,
optimization

CHALLENGES IN MAINTENANCE FUNCTION OPTIMIZATION

ALENKA BREZAVŠČEK,¹ DAMJAN MALETIČ²

¹ University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Maribor, Slovenia
alenska.brezavscek@um.si

² University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Maribor, Slovenia
damjan.maletic@um.si

The aim of this chapter is to present and systematically classify concrete optimization challenges in the field of maintenance in order to provide the appropriate basis for the development and application of suitable mathematical models that help to find optimal solutions in practise. The paper therefore gives an overview of some selected concrete optimization problems related to the activities of the maintenance function. It also highlights the importance of using appropriate computerised maintenance management systems (CMMS) for the optimization of the maintenance function.



1 Uvod

Industrijski sistemi so zaradi same uporabe kot tudi zaradi izpostavljenosti vplivom iz okolja v podvrženi degradaciji in/ali obrabi, ki kot taki prej ali slej vodita v odpoved naprave ali sistema. Posledice odpovedi katerega koli industrijskega sistema v praksi so vedno negativne in zaradi nenačrtovane nerazpoložljivosti sistema povezane z visokimi stroški, ki so lahko posledica slabše kakovosti in/ali izpada dohodka, zaradi nenačrtovanega zastoja sistema. Poleg tega je v najhujših primerih lahko okrnjena varnost ljudi, ali so celo ogrožena njihova življenja.

Pri preprečevanju odpovedi in/ali odpravljanju njihovih posledic igra ključno vlogo vzdrževanje. Pod pojmom vzdrževanje razumemo kombinacijo vseh tehničnih, upravnih in vodstvenih ukrepov v življenjskem ciklu predmeta, s ciljem obdržati ga ali obnoviti v stanje, v katerem lahko opravlja zahtevano funkcijo (SIST EN 13306:2018). Aktivnosti torej izvajamo bodisi z namenom preprečevanja nastopa odpovedi ali z namenom čim hitrejši povrnitve okvarjenega sistema v stanje zadovoljivega delovanja, ki omogoča nadaljnje izvajanje zahtevane funkcije.

Pred nekaj desetletji je bilo vzdrževanje iz vidika prakse obravnavano kot nujno zlo: nekaj, kar je potrebno storiti, če pride do odpovedi. Skozi leta pa se je pomen funkcije vzdrževanja in posledično tudi upravljanja vzdrževanja bistveno povečeval (de Jonge, 2017; de Jonge in Scarf, 2020). Danes je funkcija vzdrževanja pripoznana kot ena od ključnih funkcij poslovanja in ključni element sistema obvladovanja premoženja v organizaciji (Maletič et al., 2020; Maletič et al., 2022; de Jonge in Scarf, 2020). Pretekle raziskave so pokazale, da vzdrževanje vpliva na dobičkonosnost organizacije (Al-Najjar, 2007; Maletič et al., 2014). Organizacije se zavedajo, da se lahko učinkovitost in zanesljivost procesov bistveno izboljšajo, stroški pa občutno zmanjšajo, če se vzdrževalni ukrepi načrtujejo bolj premišljeno (de Jonge, 2017).

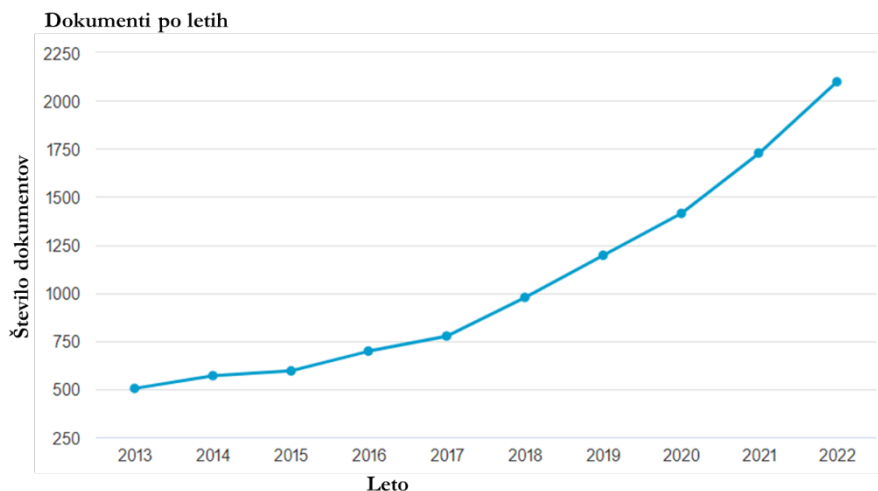
Kot posledica zavedanja pomembnosti vzdrževanja se v organizacijah povečuje tako delež zaposlenih na področju vzdrževanja, kakor tudi delež stroškov vzdrževanja glede na skupne obratovalne stroške (Zio in Compare, 2013). V industrijskih sistemih ni nič nenavadnega, da je oddelek za vzdrževanje med največjimi in obsega tudi do tretjine vseh zaposlenih. Na primer, v procesni industriji se več kot četrtnina vseh zaposlenih ukvarja z vzdrževanjem (Waeyenberg in Pintelon, 2002). Za kemično industrijo pa je ta odstotek še višji in dosega tudi 30% (de Jonge, 2017).

Organizacije se vse pogosteje zavedajo, da so stroški vzdrževanja poleg stroškov energije pogosto najvišja postavka v celotnem proračunu organizacije (Dekker, 1996). Številni avtorji navajajo, da stroški vzdrževanja običajno predstavljajo od 15 do 70% celotnih proizvodnih stroškov, višina sredstev, porabljenega za vzdrževanje, pa se še povečuje (de Jonge, 2017).

Zaradi vseh navedenih dejstev se organizacije vse bolj zavedajo, da lahko z bolj učinkovitim in skrbnim načrtovanjem vzdrževanja drastično izboljšajo učinkovitost in ekonomičnost poslovanja. Izbira ustrezne strategije vzdrževanja in optimiranje vzdrževanja postaja ena od ključnih in prioritetnih nalog slehernega industrijskega sistema (Alaswad in Xiang, 2017). Optimiranje vzdrževanja je kompleksna aktivnost, usmerjena na izbiro ustrezne strategije izvajanja preventivnega vzdrževanja tako, da je ob upoštevanju zahtev drugih poslovnih funkcij in omejitev (npr. izpolnjevanje ciljev proizvodnje, (ne)razpoložljivost rezervnih delov, upoštevanje omejitev v kadrovskih, materialnih in časovnih resursih ipd.) zadoščeno izbranemu kriteriju optimalnosti (npr. skupni stroški vzdrževanja so minimalni, skupni čas zastoja je minimalen, razpoložljivost sistema je maksimalna ipd.). Pri tem so nam v praksi lahko v veliko pomoč različni optimizacijski modeli, ki jih razvijemo ob upoštevanju posebnosti obravnavanega sistema in okolja, v katerem le-ta deluje. Modeli optimiranja vzdrževanja se v grobem delijo na kvalitativne in kvantitativne. Kvalitativni modeli temeljijo na različnih tehnikah, kot npr. vzdrževanje na osnovi zanesljivosti (ang. Reliability Centred Maintenance – RCM) ali celovito produktivno vzdrževanje (ang. Total Productive Maintenance – TPM), medtem ko drugi, kvantitativni modeli, temeljijo na aplikaciji različnih determinističnih in/ali stohastičnih pristopov, ki se lahko uporabijo za popis delovanja sistema v uporabi, procesa odpovedovanja, degradacije in/ali oskrbovanja zaloge z rezervnimi deli (Grag in Deshmukh, 2006).

Razvidno je, da je področje optimiranja vzdrževanja kompleksno in zahtevno področje, s katerim se organizacije v praksi dnevno soočajo. Razumevanje s to problematiko povezanih konkretnih optimizacijskih problemov in njihovo obvladovanje lahko organizaciji prinese znatne prihranke v segmentu skupnih stroškov vzdrževanja. V nasprotnem primeru pa skupni stroški vzdrževanja narastejo, lahko tudi preko mere vzdržnega, kar pomeni, da je potrebno aktivnosti vzdrževanja krčiti, tako v smislu pogostosti kot kakovosti izvajanja, kar zagotovo negativno vpliva na učinkovitost sistema in njegovih produktov. Ravno tako v

literaturi zaznavamo rast znanstvenih objav s področja optimizacije vzdrževanja (slika 1).



Slika 1: Število objavljenih člankov po letih, povezanih z optimizacijo vzdrževanja (2013–2022)

Vir: Scopus. Iskalni niz: maintenance AND "optimization models".

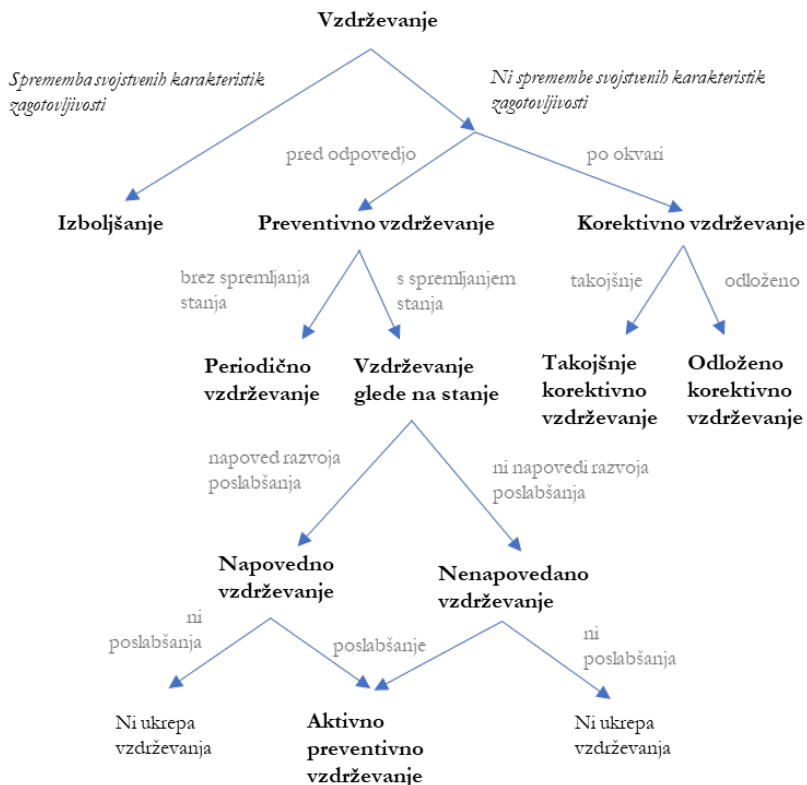
Namen prispevka je izpostaviti, predstaviti in sistematično klasificirati konkretne optimizacijske izzive, s katerimi se v organizaciji soočamo v sklopu upravljanja funkcije vzdrževanja. S tem bomo pripravili temelje za razvoj in uporabo primernih matematičnih modelov, ki bodo v praksi v pomoč pri iskanju optimalnih rešitev. Modele bomo klasificirali po različnih kriterijih in analizirali njihovo uporabnost v praksi.

2 Teoretične osnove

2.1 Vzdrževanje in strategije vzdrževanja

Pod pojmom "strategija vzdrževanja sistema" razumemo organiziranje izvajanja vzdrževanja njegovih enot z namenom, da bi odpoved sistema preprečili, oziroma, da bi nastalo odpoved čimprej odpravili. Kot je razvidno iz slike 2, lahko vzdrževanje v splošnem razvrstimo v dve glavni kategoriji: vzdrževanje, ki se izvaja po nastopu okvare ali korektivno vzdrževanje (ang. corrective maintenance- CM) in vzdrževanje z namenom preprečevanja odpovedi ali preventivno vzdrževanje (ang. preventive

maintenance - PM). Dodatno lahko opredelimo še kombinacijo vseh tehničnih, upravnih in vodstvenih ukrepov za izboljšanje (ang. improvement) svojstvene zanesljivosti in/ali vzdrževalnosti in/ali varnosti predmeta brez spremembe osnovne funkcije (SIST EN 13306:2018).



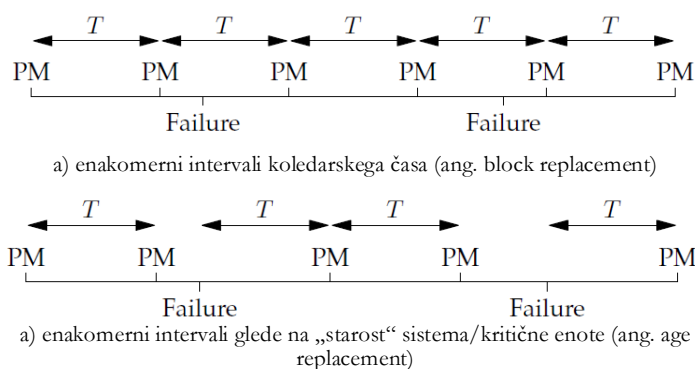
Slika 2: Strategije vzdrževanja
Vir: Prirejeno po SIST EN 13306:2018.

Iz vidika optimiranja vzdrževanja je pomembno predvsem poznavanje in razumevanje različnih strategij izvajanja preventivnega vzdrževanja sistema in/ali njegovih enot.

Tradicionalni pristop pri izvajanju preventivnega vzdrževanja vključuje izvajanje bodisi celovitih pregledov sistema bodisi izvajanje preventivnih zamenjav kritičnih enot sistema v enakomernih časovnih intervalih, ki so vnaprej načrtovani. Tak

pristop v literaturi pogosto zasledimo tudi pod imenom »vzdrževanje po času« (ang. time-based maintenance - TBM). Interval izvajanja preventivnih vzdrževalnih posegov (običajno preventivnih zamenjav kritičnih enot sistema) v sklopu vzdrževanja na osnovi TBM je lahko določen na dva načina. V prvem primeru se preventivne zamenjave izvajajo v enakomernih intervalih koledarskega časa, ne glede na to, kdaj odpoved sistema/kritične enote nastopi in koliko časa znotraj enega intervala je obravnavan sistem dejansko deloval (slika 3). Ta strategija je v literaturi znana tudi pod imenom »block replacement«.

V drugem primeru pa se preventivne zamenjave izvajajo v enakomernih intervalih, pri čemer se upošteva dejanski čas delovanja obravnavanega sistema/kritične enote in se preventivna zamenjava opravi, ko obravnavani sistem/kritična enota doseže določeno »starost«, merjeno v obratovalnih urah, prevoženih km ipd. (slika 3). Za slednjo strategijo se je uveljavilo ime »age replacement« ali zamenjave glede na starost. Vsaka od obeh strategij ima svoje prednosti in slabosti ter je uporabna v specifičnih situacijah (Jardine in Tsang, 2021).



Slika 3: Izvajanje časovno določenih preventivnih zamenjav (ang. time-based maintenance - TBM).

Vir: Prirejeno po de Jonge (2017).

Ena od ključnih pomanjkljivosti opisanih strategij ali politik izvajanja preventivnih zamenjav je dejstvo, da se ob doslednem izvajanju take politike lahko zgodi, da v času načrtovane izvedbe preventivne zamenjave stopnja degradacije sistema/kritične enote še ni dosegla nivoja, ko bi bila zamenjava povsem upravičena. To je še posebej pogosto, kadar se preventivne zamenjave izvajajo v skladu s strategijo »block

replacement». To težavo do vsaj neke mere olajša naprednejša strategija izvajanja preventivnega vzdrževanja, ki se je uveljavila pod imenom »vzdrževanje na podlagi stanja« (tudi »vzdrževanje po stanju«, ang. condition based maintenance - CBM). Za razliko od TBM pristopov, ki temeljijo na zbiranju zgodovinskih podatkov o odpovedovanju sistema, je CBM pristop k vzdrževanju, ki temelji na sprotnem spremljanju stanja sistema/kritične enote s stališča stopnje degradacije. Spremljanje stanja se lahko izvaja s pomočjo različnih senzorjev ali nadzornih naprav. Le-to se lahko izvaja kontinuirano (ang. continuous monitoring) ali preko periodičnih pregledov (ang. inspections). Cilj CBM je tako zmanjšati nepotrebna vzdrževalna dela in odpraviti tveganja, ki so povezana s TBM pristopi (npr. preprečevanje neupravičenih preventivnih zamenjav) ter posledično zagotoviti čim nižje skupne stroške vzdrževanja. V splošnem je izvajanje CBM strategij preventivnega vzdrževanja v praksi zahtevnejše kot izvajanje tradicionalnih metod na podlagi TBM, vendar je hitri razvoj računalniških tehnologij za spremljanje (npr. napredni senzorji) bistveno olajšal implementacijo CBM (Alaswad in Xiang, 2017).

V zadnjem času se je v praksi uveljavila strategija preventivnega vzdrževanja, ki jo zasledimo pod imenom »priložnostno vzdrževanje« (ang. opportunistic maintenance). Ta strategija vzdrževanja predvideva, da vzdrževanje sistema in/ali njegovih enot ne sledi predhodno določenemu načrtu vzdrževanja (kot npr. TPM), pač pa se aktivnosti preventivnega vzdrževanja izvajajo, ko se za to ponudi priložnost. Na primer, organizacije lahko v ta namen izkoristijo obdobja nizke aktivnosti sistema (npr. obdobje, ko sistem ali določen del sistema ni v uporabi, je v npr. stanju neaktivnosti zaradi načrtovanega remonta). Z namenom zagotavljanja, da se aktivnosti vzdrževanja izvajajo na čim bolj učinkovit in ekonomičen način, se koncept priložnostnega vzdrževanja pogosto kombinira z drugimi strategijami preventivnega vzdrževanja (glej npr. de Jonge in Scarf, 2020).

V zadnjem obdobju se tako v literaturi kot v praktičnih aplikacijah vse pogosteje omenja koncept napovednega vzdrževanja (ang. predictive maintenance – PdM; glej npr. Dolatabadi in Budinska, 2021). To je sodobni pristop k vzdrževanju, ki za napovedovanje nastopa odpovedi in posledično potrebe po vzdrževanju uporablja napredne tehnike analize podatkov, kot so algoritmi strojnega učenja in statistično modeliranje. PdM predstavlja proaktivni pristop k vzdrževanju z namenom zagotavljanja pravočasnega prepoznavanja prihajajočih potreb po vzdrževanju, kar lahko bistveno doprinese k bolj optimalni organizaciji funkcije vzdrževanja in nižjim

stroškom vzdrževanja. Za izvajanje programa napovednega vzdrževanja se na spremljano opremo običajno namestijo senzorji za zbiranje podatkov o dejavnikih, kot so temperatura, tlak in vibracije. Ti podatki se nato analizirajo s pomočjo naprednih algoritmov za prepoznavanje vzorcev in anomalij, ki lahko kažejo na morebitne težave.

Vzdrževanje po stanju (CBM) in napovedno vzdrževanje (PdM) sta dve povezani, vendar različni strategiji vzdrževanja. Cilj obeh strategij je preprečiti odpovedi sistema in s tem nepričakovan zastoj, vendar se strategiji razlikujeta v pristopu k vzdrževanju. Strategija CBM temelji na spremljanju stanja sistema (običajno preko senzorjev ali drugih virov podatkov), pri čemer se aktivnosti vzdrževanja izvedejo le, ko/če vrednost parametra, s katerim spremljamo stanje sistema, doseže ali preseže vnaprej mejo, kar nakazuje povečano možnost nastopa odpovedi. Z drugimi besedami, v sklopu strategije CBM se vzdrževalni poseg izvede šele, ko parameter, ki definira stanje sistema, pokaže, da je to potrebno. Po drugi strani pa je napovedno vzdrževanje strategija vzdrževanja, ki uporablja napredne tehnike analize podatkov, ki so sposobne na podlagi vzorcev in trendov v podatkih, predvideti (napovedati), kdaj bo verjetno potrebno vzdrževanje. Cilj napovednega vzdrževanja je torej zaznati morebitne težave, preden le-te nastopijo (in se poveča verjetnost za odpoved sistema). S pomočjo take metodologije je torej mogoče vzdrževanje načrtovati vnaprej, kar omogoča čim bolj kontinuirano izvajane delovnih procesov. Če povzamemo razlike med obema pristopoma, je CBM reaktiven pristop, ki se osredotoča na izvajanje vzdrževanja, ko to zahteva stanje opreme, medtem ko je PdM proaktiven pristop, ki se osredotoča na napovedovanje, kdaj bo vzdrževanje potrebno, ter na njegovo vnaprejšnje načrtovanje.

2.2 Viri za vzdrževanje

Ne glede na naravo sistema, ki je predmet vzdrževanja (npr. industrijski sistem, prometni sistem, infrastruktura ipd.), je učinkovitost in ekonomičnost izvajanja vzdrževalnih aktivnosti pogojena z razpoložljivostjo različnih virov, ki so v praksi praviloma omejeni, zagotavljanje le-teh pa je povezano z določenimi stroški (glej npr. Jardine in Tsang, 2021). Ključne skupine virov izpostavljam v nadaljevanju:

- *Čas, potreben za izvajane vzdrževanja*: Izvajanje vzdrževalnih aktivnosti (pa naj bodo le-te korektivne ali pa preventivne) zahteva svoj čas. V nekaterih

- primerih lahko vzdrževani poseg zahteva zaustavitev sistema, kar negativno vpliva na njegovo razpoložljivost in posledično na produktivnost. Zato je pri oblikovanju strategije vzdrževanja pomembno, da predvsem tiste aktivnosti vzdrževanja, ki jih lahko načrtujemo (t.j. preventivno vzdrževanje), načrtujemo tako, da bo normalno delovanje sistema čim manj moteno in bo zagotovljeno, da bo skupni čas zastoja sistema zaradi izvajanja vzdrževanja (tako korektivnega kot preventivnega) minimalen.
- *Usposobljeno in kompetentno vzdrževalno osebje*: Za izvajanje vzdrževalnih nalog so potrebni izkušeni in ustrezno usposobljeni izvajalci. Velikost potrebne ekipe je odvisna od kompleksnosti sistema in zahtevnosti vzdrževalnih nalog. Večja ekipa po eni strani zagotavlja, da se aktivnosti vzdrževanja lahko izvedejo hitreje (kar pozitivno vpliva na razpoložljivost sistema), po drugi strani pa so skupni stroški vzdrževalnega osebja v takem primeru višji, kar negativno vpliva na skupne stroške vzdrževanja. Organizacija se lahko odloči za vzpostavitev lastne ekipe vzdrževalce, najem zunanjih izvajalcev ali kombinacijo obojega tako, da so skupni stroški, povezani z vzdrževalnim osebjem čim nižji ob doseganju drugih zahtev glede izvajanja strategije vzdrževanja.
 - *Orodja in oprema za izvajanje vzdrževanja*: Za učinkovito izvajanje aktivnosti vzdrževanja potrebujemo ustrezna orodja in opreme, od ročnih in električnih orodij do specializirane opreme, kot so diagnostična orodja in oprema za testiranje. Zagotovitev specializirane opreme je v praksi pogosto povezana z visokimi stroški. Po drugi strani pa lahko nerazpoložljivost ustrezne opreme povzroči, da se vzdrževalne aktivnosti ne morejo izvesti v predvidenih rokih, kar zopet negativno vpliva tako na razpoložljivost kot na produktivnost sistema. Organizacija se lahko odloči za nakup lastne vzdrževalne opreme, najem vzdrževalne opreme ali kombinacijo obojega tako, da so skupni stroški, povezani z vzdrževalno opremo čim nižji ob doseganju drugih zahtev glede izvajanja strategije vzdrževanja.
 - *Materialni resursi*: Materialne resurse, potrebne za učinkovito izvajanje vzdrževalnih aktivnosti, bi lahko v grobem razdelili v potrošni material in rezervne dele (ang. *spare parts*). V potrošni material uvrščamo različna maziva, čistila, potrošne rezervne dele in drugi material, ki ga potrebujemo za izvajanje tekočega vzdrževanja (npr. čiščenje, mazanje, razpraševanje, kalibriranje ipd.). Iz vidika optimiranja vzdrževanja pa so pomembni

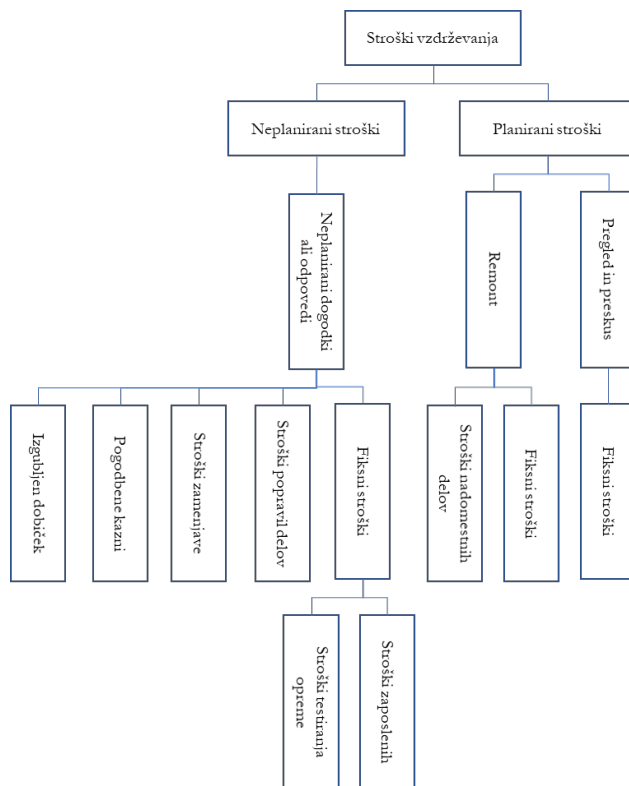
predvsem vitalni rezervni deli, ki jih potrebujemo za izvajanje načrtovanih preventivnih zamenjav, kot korektivnih zamenjav po odpovedi. V primeru, da ustreznega rezervnega dela ni na zalogi, ko ga potrebujemo, se zamenjava ne more opraviti. Slednje podaljša čas zastojev, negativno vpliva na razpoložljivost in posledično na produktivnost sistema. Po drugi strani (pre)visoka zaloga rezervnih delov za podporo vzdrževanju zvišuje stroške zalog in posledično skupne stroške vzdrževanja. Pri optimiranju vzdrževanja v praksi igra torej ključno vlogo optimalna strategija naročanja rezervnih delov, pri čemer moramo posebno pozornost posvetiti rezervnim delom, ki na trgu niso dosegljivi takoj, pač pa je dobava vezana na dobavni rok, ki je lahko deterministične ali stohastične narave (glej npr. Brezavšček, 2015).

- *Finančna sredstva*: Za učinkovito izvajanje vzdrževalne dejavnosti je potreben zadosten proračun. Kot že omenjeno, predstavljajo stroški vzdrževanja eno najvišjih postavk v celotnem proračunu organizacije. Poleg tega so ti stroški zelo kompleksni, saj so odvisni od številnih dejavnikov (glej poglavje 2.3). Organizacije se v praksi torej stalno soočajo z zelo zahtevnim izzivom, kako organizirati funkcijo vzdrževanja, da bodo vzdrževalne aktivnosti potekale čim bolj optimalno (skupni čas zastoja zaradi vzdrževanja sistema bo minimalen, razpoložljivost sistema bo maksimalna, skupni stroški vzdrževanja bodo čim nižji ipd.), pri čemer je potrebno zagotoviti, da proračun, ki ga organizacija nameni za vzdrževanje in je vedno omejen, ni presežen.

2.3 Stroški vzdrževanja

Kompleksnost tehnologije in pomembna vloga vzdrževanja v proizvodnji sta povzročili povečanje stroškov, povezanih z vzdrževanjem. Zato je področju vodenja stroškov vzdrževanja vredno nameniti pozornost (Sinkkonen idr., 2013; Simões idr., 2011). Stroški vzdrževanja postajajo vse večji. Razlog je v dražjih rezervnih delih, vse višji potrebni strokovnosti zaposlenih, ki izvršujejo vzdrževalna dela, v večjem številu vzdrževalcev ipd.. El-Haram in Horner (2002) sta stroške vzdrževanja razdelila na direktne stroške dela, materialov in nadomestnih delov, stroške opreme in orodja, administrativne in splošne stroške ter stroške zaradi izgube prihodka. Salonen in Deleryd (2011) sta neposredne stroške vzdrževanja razdelila na stroške dela, nadomestne dele in druge stroške vzdrževanja, medtem ko indirektni stroški

vključujejo stroške izgubljene proizvodnje in neustrezno kakovost vzdrževanja. Nadalje, Tavakoli in Nafar (2021) sta stroške razdelila glede na neplanirane in planirane dejavnosti (slika 4).



Slika 4: Struktura stroškov vzdrževanja

Vir: Prirejeno po Tavakoli in Nafar (2021).

3 Pregled sorodnih raziskav

Strokovna in znanstvena literatura, vezana na tematiko: vzdrževanja, strategij vzdrževanja, organiziranja in upravljanja funkcije vzdrževanja v organizaciji, tehničnih aspektov izvajanja vzdrževalnih aktivnosti, je precej bogata, saj je področje izjemo aktualno tako za raziskovalce kot za strokovnjake iz prakse. V pričujočem prispevku se bomo osredotočili le na prispevke, ki ponujajo sistematične preglede izsledkov na izbranem področju optimiranja vzdrževanja. Slednje je, najbrž zaradi

zahtevnosti in kompleksnosti tematike, v literaturi nekoliko slabše zastopano. Izbrane prispevke predstavljamo v kronološkem zaporedju, kot so bili objavljeni.

Enega prvih tovrstnih prispevkov predstavlja članek Dekkerja (1996), v katerem avtor podaja pregled literature o uporabi modelov optimiranja vzdrževanja. Na podlagi izkušenj različnih uveljavljenih strokovnjakov ter izkušenj iz lastne prakse avtor razpravlja o praktični vrednosti matematičnih modelov, ki rešujejo različne optimizacijske probleme, vezane na problematiko vzdrževanja. Izpostavlja, da uporabno vrednost takih modelov bistveno povečuje njihova integracija v sodobne IKT sisteme za podporo odločanju in profesionalne programske pakete za upravljanje vzdrževanja, ki kot taki postajajo nepogrešljiv pripomoček sodobnega managerja na področju vzdrževanja.

Garg in Deshmukh (2006) podajata poglobljen in sistematični pregled literature za obdobje od 1995 do 2006 na področju upravljanja vzdrževanja (ang. maintenance management), kjer sta se dotaknila različnih segmentov od optimizacijskih modelov, tehnik vzdrževanja, metod razporejanja, kakor tudi informacijskih sistemov za podporo vzdrževanju. Znotraj vsakega od teh segmentov so avtorji izpostavili obstoječe vrzeli in izpostavili smernice in trende nadaljnjega razvoja. Avtorji raziskave Sharma idr. (2011) podajajo podroben pregled literature, pri čemer se osredotočajo na analizo različnih optimizacijskih tehnik, kot so npr. analitični hierarhični proces, Bayesov pristop in genetski algoritmi. Avtorji so mnenja, da je uporaba metod in tehnik simulacije v procesu optimiranja vzdrževanja spremenila pogled na vzdrževanje. Tem metodam pripisujejo velik pomen in možnosti za implementacijo. Supina avtorjev Vasili idr. (2011) v svojem delu predstavlja dokaj celovit pregled in klasifikacijo matematičnih modelov optimiranja vzdrževanja, pri čemer so vključeni izsledki za obdobje 1976 - 2011. Podobno raziskavo predstavlja nekoliko novejša študija, izvedena v letu 2018, avtorjev Nwadinobi in Ezeaku (2018). Supriatna in Singgih (2016) sta izvedla sistematični pregled literature glede uporabe različnih strategij preventivnega vzdrževanja. Prispevke, objavljene v obdobju 2006 – 2016, sta klasificirala glede na uporabljeno strategijo preventivnega vzdrževanja v 4 glavne skupine: optimiranje preventivnih zamenjav, optimiranje preventivnih popravil, optimiranje preventivnih pregledov (inspekcij) in optimiranje resursov za vzdrževanje.

Alaswad in Xiang (2017) podajata pregled literature na področju optimizacijskih modelov vzdrževanja po stanju (CBM). Avtorja se osredotočata le na pomembne vidike CBM, kot so kriteriji optimizacije, pogostost izvajanja pregledov, stopnja vzdrževanja ipd. Obravnavane študije klasificirata glede na to, na kakšen način so avtorji modelirali proces staranja in obrabljanja (ang. deterioration) obravnavanega sistema in modeliranje tega procesa z ustreznim stohastičnim modelom (diskretno spremljanje, kontinuirano spremljanje ali model z upoštevanjem sorazmerne stopnje tveganja). Glede na to, da je področje optimiranja CBM v literaturi bistveno slabše zastopano kot področje optimiranja TBM, nudi ta članek uporabne reference tako za strokovnjake, upravljalce CBM v praksi, kakor za raziskovalce, ki razvijajo nove metode modeliranja in optimiranja CBM.

Zelo poglobljen sistematični pregled literature sta izvedla de Jonge in Scarf (2020), ki sta analizirala preko 200 prispevkov na temo modeliranja in optimiranja vzdrževanja, objavljenih v obdobju 2001 - 2018. Avtorja povzemata ključno terminologijo, prispevke pa sistematično razvrstita v različne skupine na podoben način, kot so to izvedli Alaswad in Xiang (2017) ali Nwadinobi in Ezeaku (2018). Nadalje analizirata uporabnost modelov in razpravljata o možnostih zagotavljanja potrebnih podatkov. Izpostavita tudi posebne situacije, ki še niso raziskane in odpirata usmeritve za nadaljnji razvoj. Eno najnovejših študij na obravnavanem področju ponujata Dolatabadi in Budinska (2021), ki sta pripravila pregled člankov iz obdobja 2010-2020. Na podlagi izsledkov sta izpostavila glavna pričakovanja, zahteve in izzive za mala in srednje velika podjetja (ang. small- and medium-sized organizations – SMEs), vezana na uvajanja metod napovednega vzdrževanja (ang. predictive maintenance - PdM).

4 Priložnosti za optimiranje vzdrževanja v praksi

Pri oblikovanju strategije vzdrževanja sistema v praksi se soočamo z naslednjim problemom: za vsako enoto sistema, ki je s stališča zanesljivosti sistema kritična, je potrebno opredeliti pogostost in način izvajanja vzdrževalnih posegov ter način oskrbovanja zalog z rezervnimi enotami tako, da bo zadovoljeno izbranemu kriteriju (npr. skupni stroški vzdrževanja sistema naj bodo minimalni). Strategijo, ki zadošča temu pogoju, imenujemo optimalna strategija vzdrževanja sistema.

Oblikovanje optimalne strategije vzdrževanja konkretnega sistema v eksploataciji temelji na razvoju ustreznega matematičnega modela, ki mora upoštevati vse specifikke sistema, kakor tudi okolja, v katerem sistem deluje. Zaradi kompleksnosti sodobnih industrijskih sistemov in interdisciplinarnosti obravnavanega področja, je razvoj takih modelov dokaj kompleksna naloga. V nadaljevanju opisujemo splošen pristop pri formulaciji takega modela, kakor tudi podajamo ključne izsledke iz literature ter nekaj usmeritev za prakso.

4.1 Matematični modeli optimiranja vzdrževanja

Matematični model optimiranja vzdrževanja lahko v splošnem zapišemo v obliki kriterijske funkcije:

$$E = f(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (1)$$

kjer je:

- E - vrednost odločitvenega kriterija, ki ga optimiramo,
- x_i - vrednost i -tega izmed n relevantnih parametrov modela,
- y_j - vrednost j -te izmed m odločitvenih spremenljivk.

V skladu z ocenjenimi vrednostmi relevantnih parametrov modela $x_i, i=1 \dots n$, je potrebno določiti tiste vrednosti odločitvenih spremenljivk $y_j^*, j=1 \dots m$, pri katerih zavzame kriterijska funkcija $E(x_i, y_j)$ ekstremno vrednost E_o , ki jo imenujemo *kriterij optimalnosti*. Zapišemo lahko:

$$E_o = f(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \quad (2)$$

kjer pomeni:

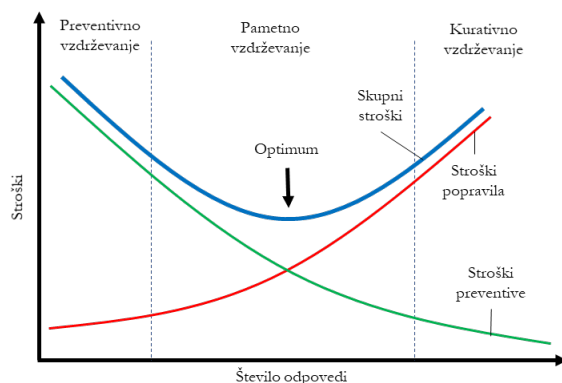
- E_o - ekstrem kriterijske funkcije, kjer je vrednost kriterijske funkcije enaka kriteriju optimalnosti,

- x_i - vrednost i -tega izmed n relevantnih parametrov modela,
- y_j^* - optimalna vrednost j -te izmed m odločitvenih spremenljivk, ki zagotavlja, da je vrednost kriterijske funkcije E enaka E_0 .

Kateri ekstrem kriterijske funkcije iščemo (tj. minimum oziroma maksimum), je odvisno od izbranega odločitvenega kriterija. V praksi najpogosteje uporabimo enega izmed naslednjih odločitvenih kriterijev:

- skupni stroški (vzdrževanja sistema, eksploatacije sistema ipd.) → iščemo minimum kriterijske funkcije);
- čas zastoja sistema → iščemo minimum kriterijske funkcije;
- razpoložljivost sistema → iščemo maksimum kriterijske funkcije;
- prihodek (bruto, neto), dosežen z eksploatacijo sistema → iščemo maksimum kriterijske funkcije;
- produktivnost sistema → iščemo maksimum kriterijske funkcije.

Zasnovo optimizacijskega problema, kjer smo kot kriterijsko funkcijo izbrali skupne stroške vzdrževanja sistema, ponazarja slika 5.



Slika 5: Primer optimizacijskega problema, kjer kriterijska funkcija predstavlja skupne stroške vzdrževanja sistema

Vir: Klanker idr. (2017).

Vrednost izbranega odločitvenega kriterija (in posledično kriterijske funkcije) lahko izrazimo v obliki kumulativne vrednosti v obdobju, za katerega določamo optimalno strategijo vzdrževanja, ali pa v obliki povprečne vrednosti na enoto časa. Slednji način je še posebej prikladen, ko je mogoče proces vzdrževanja sistema razdeliti na zaključene, ponavljajoče se cikle. Maksimalni prihodek oziroma maksimalno produktivnost sistema lahko izrazimo tudi na enoto skupnih stroškov vzdrževanja. Maksimalni prihodek na stroškovno enoto je uporaben odločitveni kriterij predvsem v primeru, ko prihodka z eksploatacijo sistema ni možno na enostaven način oceniti v denarni obliki.

Relevantne parametre modela optimiranja vzdrževanja predstavljajo tisti tehnični parametri sistema, katerih vrednosti vplivajo na vrednosti odločitvenih spremenljivk. Vrednosti posameznih parametrov modela določimo na podlagi podatkov o eksploataciji sistema. Za zbiranje in hranjenje teh podatkov je potrebno vzpostaviti ustrezno bazo podatkov, pri čemer so nam lahko v veliko pomoč specializirana programska orodja ali informacijski sistemi za podporo vzdrževanju (glej poglavje 4.2).

Odločitvene spremenljivke modela optimiranja vzdrževanja so tiste veličine, katerih vrednosti v procesu optimiranja iščemo, saj njihove optimalne vrednosti določajo optimalno strategijo vzdrževanja obravnavanega sistema. To so v praksi lahko: širina intervala izvajanja preventivnih zamenzjav, obseg naročila rezervnih enot, signalna zaloga rezervnih enot ipd. Optimalne vrednosti odločitvenih spremenljivk lahko določimo na različne načine, kot npr. z odvajanjem kriterijske funkcije, grafično, z iteracijo ali z metodami simulacije. Izbira metode reševanja danega optimizacijskega problema je odvisna predvsem od narave kriterijske funkcije in števila vključenih odločitvenih spremenljivk.

V literaturi lahko zasledimo številne matematične modele optimiranja vzdrževanja, ki so razviti glede na posebnosti sistema in okolja, na katerega se nanašajo. V splošnem jih lahko delimo na *deterministične* in na *stobastične* (Nwadinobi in Ezeaku, 2018). Deterministični modeli so taki, pri katerih se predpostavlja, da je celotno dogajanje v procesu vzdrževanja poznano z gotovostjo. Posledično imajo pri takem modelu tako vhodni kot izhodni parametri modela fiksne, vnaprej znane vrednosti in nobena od spremenljivk ni naključna. Taki modeli temeljijo na uporabi različnih determinističnih metod operacijskih raziskav, kot so linearno in nelinearno

programiranje, dinamično programiranje ipd. (glej npr. Ming-Hua idr., 2012). Stohastični modeli pa so tisti, pri katerih je vsaj ena od spremenljivk naključna. Glede na to, da je v kompleksnem procesu vzdrževanja mnogo dejavnikov, ki so po svoji naravi stohastični (npr. čas do odpovedi industrijskega sistema in njegovih gradnikov je naključna veličina, čas izvedbe vzdrževalnega posega je pogosto naključna veličina, dobavni rok za rezervne dele je naključna veličina ipd.), so za optimiranje vzdrževanja prikladnejši stohastični modeli, saj zagotavljajo bolj natančne rezultate. Dejstvo pa je, da je iz matematičnega stališča razvoj takih modelov zahtevnejši, saj temeljijo na aplikaciji različnih bolj ali manj sofisticiranih pristopov iz teorije stohastičnih procesov, kot so npr. Markovski odločitveni procesi, teorija množične strežbe ipd. (glej npr. Powell, 2019).

Poleg tega je potrebno posebej poudariti, da razvoj in razumevanje stohastičnih matematičnih modelov optimiranja vzdrževanja zahteva dobro poznavanje in razumevanje konceptov teorije zanesljivosti, saj sta proces vzdrževanja in proces odpovedovanja sistema in njegovih enot med seboj tesno povezana in soodvisna (glej npr. Jardine in Tsang, 2021). Poseben in zahteven izziv predstavlja modeliranje procesa staranja in obrabljanja materiala z ustreznim stohastičnim modelom (glej npr. Alaswad in Xiang, 2017; Jia in Gardoni, 2018).

Izkušnje iz literature dokazujejo, da je pri razmeroma enostavnih optimizacijskih problemih možno kriterijsko funkcijo matematičnega modela optimiranja vzdrževanja zapisati v *analitični obliki*, pri kompleksnejših problemih in velikem številu odločitvenih spremenljivk pa smo se pogosto prisiljeni posluževati še drugih metod, kot npr. metod *simulacije* (glej npr. Nwadinobi in Ezeaku, 2018).

Ključna prednost analitičnih modelov je v tem, da jih je možno na dokaj enostaven način implementirati v prakso. Seveda se je pri tem potrebno zavedati, da bo izbrani model zagotavljal točne rezultate, ki bodo kot taki v praksi služili kot zelo uporabne informacije pri odločanju, le v primeru, ko matematične predpostavke, na katerih model temelji, veljajo tudi v okolju, v katerega model implementiramo. V nasprotnem primeru lahko dosežemo ravno nasproten učinek, ki se lahko v skrajnem primeru odrazi celo v poslabšanju stanja in porastu stroškov vzdrževanja.

Tabela 1: Konkretni optimizacijski problemi, vezani na aktivnosti vzdrževanja, za katere so v literaturi na voljo razmeroma enostavne analitične rešitve

Zamenjave kritičnih enot sistema	Izvajanje inspekcijskih pregledov
<p><i>Optimizacijski problem:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – določanje optimalnega časa za izvedo preventivne zamenjave, kadar stroški delovanja enote naraščajo s časom uporabe: <ul style="list-style-type: none"> – minimiranje stroškov, – določanje optimalnega intervala izvajanja preventivnih zamenjav: <ul style="list-style-type: none"> – <i>glede na koledarski čas,</i> <ul style="list-style-type: none"> – minimiranje stroškov, – <i>glede na starost enot,</i> <ul style="list-style-type: none"> – minimiranje stroškov, – minimiranje stroškov ob upoštevanju časa, potrebnega za izvedbo zamenjave, – minimiranje časa zastoja, – določanje optimalne strategije oskrbovanje zalog z rezervnimi deli: <ul style="list-style-type: none"> – <i>za izvajanje preventivnih zamenjav,</i> – <i>za varnostno zalogo,</i> – določanje optimalnega intervala izvajanja preventivnih zamenjav z upoštevanjem strategije oskrbovanja zalog z rezervnimi deli; 	<p><i>Optimizacijski problem:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – določanje optimalne pogostosti izvajanja inspekcijskih pregledov sistema: <ul style="list-style-type: none"> – maksimiranje profita, – minimiranje časa zastoja, – določanje optimalne pogostosti izvajanja inspekcijskih pregledov na napravah, ki delujejo na zahtevo (npr. v izrednih razmerah): <ul style="list-style-type: none"> – maksimiranje razpoložljivosti sistema, – optimiranje vzdrževanja po stanju: <ul style="list-style-type: none"> – <i>upoštevanje sorazmerne stopnje tveganja,</i> – <i>upoštevanje ekonomskih faktorjev,</i>
<p><i>Metode reševanja:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – koncepti verjetnosti in statistike; 	<p><i>Metode reševanja:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – različni koncepti, ki temeljijo na teoriji stohastičnih procesov;
Zamenjava vitalnih delov sistema	Zagotavljanje potreb po resurseh
<p><i>Optimizacijski problem:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – določanje optimalnega intervala izvajanja preventivnih zamenjav z upoštevanjem skupnih stroškov v življenjski dobi: <ul style="list-style-type: none"> – <i>upoštevanje konstantnega letnega izkoristka,</i> – <i>upoštevanje variabilnega letnega izkoristka,</i> – <i>upoštevanje tehnološkega napredka,</i> – oskrbovanje zaloge rezervnih delov za vitalne dele sistema; 	<p><i>Optimizacijski problem:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – dimenzioniranje delavnice: <ul style="list-style-type: none"> – <i>optimalno število strojev,</i> – <i>optimalna velikost vzdrževalne ekipe,</i> – dimenzioniranje opreme: <ul style="list-style-type: none"> – <i>lastna oprema,</i> – <i>najeta oprema,</i> – odločitve najem/nakup opreme;
<p><i>Metode reševanja:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – metode ekonomike (časovna vrednost denarja in diskontiranje denarnega toka); – teorija rojstno smrtnih procesov. 	<p><i>Metode reševanja:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – teorija sistemov množične strežbe; – metode simulacije.

V tabeli 1 podajamo sistematični pregled konkretnih optimizacijskih problemov, vezanih na aktivnosti vzdrževanja, za katere so v literaturi na voljo razmeroma enostavne analitične rešitve. Pester nabor takih modelov skupaj s priporočili za implementacijo je zbran v knjigi Jardine in Tsang (2021). Menimo, da je tak pregled lahko v veliko pomoč skrbnikom vzdrževanja, ki želijo funkcijo vzdrževanja v svoji organizaciji nadgraditi in izboljšati z implementacijo sodobnih pristopov matematične optimizacije.

4.2 Optimiranje vzdrževanja s pomočjo namenskih programskih paketov za upravljanje vzdrževanja

Programski paket za upravljanje vzdrževanja (ang. Computerized Maintenance Management System - CMMS) je specializiran softverski sistem, ki je zasnovan za pomoč organizacijam pri učinkovitejšem upravljanju dejavnosti vzdrževanja. Običajno vključuje različne funkcije, kot so upravljanje delovnih nalogov, načrtovanje preventivnega vzdrževanja, sledenje opremi, upravljanje zalog in poročanje.

Glavni cilj sistema CMMS je racionalizirati dejavnosti vzdrževanja in povečati produktivnost z avtomatizacijo ročnih opravil, z zmanjšanjem števila izpadov in podaljšanjem življenjske dobe opreme. Z zagotavljanjem preglednosti vzdrževalnih dejavnosti in učinkovitosti sredstev v realnem času sistem CMMS organizacijam omogoča, da sprejemajo na podatkih temelječe odločitve o svojih strategijah vzdrževanja in učinkoviteje razporejajo sredstva.

Programska paketi CMMS se uporabljajo v različnih panogah, vključno s proizvodnjo, zdravstvom, prevozom in upravljanjem objektov. Uporablja se lahko lokalno ali v oblaku in je pogosto integriran z drugimi sistemi podjetja, kot sta programska oprema za načrtovanje virov podjetja (ang. Enterprise Resource Planning - ERP) ali programska oprema za upravljanje odnosov s strankami (ang. Customer Relationship Management - CRM).

Dandanes trg ponuja številne različne programske pakete CMMS. V nadaljevanju navajamo nekaj produktov, ki jih v praksi najpogosteje srečamo:

- IBM Maximo¹: Ta produkt je priljubljena izbira za velike organizacije v panogah, kot so proizvodnja, komunalne storitve in transport. Ponuja širok nabor funkcij, vključno z upravljanjem sredstev, upravljanjem delovnih nalogov, upravljanjem zalog in analitiko.
- SAP EAM (SAP Enterprise Asset Management)²: Je celovita rešitev za upravljanje aktivnosti vzdrževanja v panogah, kot so naftna in plinska industrija, rudarstvo in komunalne storitve. Vključuje funkcije, kot so upravljanje sredstev, upravljanje delovnih nalogov, načrtovanje preventivnega vzdrževanja in analitiko.
- Fiix³: je rešitev CMMS v oblaku, zasnovana za mala in srednje velika podjetja. Ponuja vrsto funkcij, vključno z upravljanjem delovnih nalogov, načrtovanjem preventivnega vzdrževanja, sledenjem sredstev in upravljanjem zalog.
- UpKeep⁴: je še en CMMS v oblaku, namenjen malim in srednje velikim podjetjem. Vključuje podobne funkcionalnosti kot Fiix (upravljanje delovnih nalogov, načrtovanje preventivnega vzdrževanja, sledenje sredstvom ipd.). Omogoča tudi mobilni dostop.
- eMaint⁵: ta CMMS rešitev je prvenstveno zasnovana za panoge, kot so proizvodnja, upravljanje objektov in zdravstvo. Vključuje funkcije, kot so upravljanje delovnih nalogov, načrtovanje preventivnega vzdrževanja, sledenje sredstvom in upravljanje zalog.

Iz navedenega je razvidno, da so funkcionalnosti vseh CMMS produktov dokaj podobne, kar je seveda pričakovano. Pri izbiri moramo tako upoštevati dejavnike, kot so velikost in panoga organizacije, morebitne posebne funkcije in funkcionalnosti, ki jih potrebujemo, stroške licenc in nenazadnje uporabniško izkušnjo.

¹ <https://www.ibm.com/products/maximo>

² <https://www.sap.com/products/scm/asset-management-eam.html>

³ <https://www.fiixsoftware.com/>

⁴ <https://www.onupkeep.com/>

⁵ <https://www.emaint.com/>

Dejstvo je, da CMMS organizacijam pomaga izboljšati kompleksne postopke vzdrževanja iz organizacijskega vidika, kar se odraža na nižjih stroških in posledično v višji stopnji optimizacije funkcije vzdrževanja. Naprednejši CMMS imajo integrirane tudi algoritme za matematično reševanje konkretnih optimizacijskih problemov, kot so opisani v poglavju 4.1. Nekatere prednosti uvedbe CMMS v organizacijo, kakor tudi izzivi, povezani z uvedbo, so izpostavljeni v člankih Chauhan in Singh (2016), Mohd Noor idr. (2021) in Shaheen in Németh (2022). Podjetja se tudi vedno bolj osredotočajo na razvoj povezanih platform za celovito obvladovanje premoženja z namenom čim večjega ustvarjanja vrednosti (Crespo Marquez et al., 2020).

5 Diskusija in zaključek

Poudarili bi, da je upravljanje funkcije vzdrževanja del obvladovanja premoženja, ki je opredeljeno kot usklajena aktivnost organizacije za ustvarjanje vrednosti iz premoženj (SIST ISO 55000:2017). Obvladovanje premoženja se nanaša na celoten življenjski cikel premoženj, medtem ko je upravljanje funkcije vzdrževanja pomembno predvsem v fazi delovanja. Z izboljšanjem odločitev o vzdrževanju v tej fazi lahko vzdrževanje poveča realizirano vrednost sredstev/premoženj (Maletič et al., 2020). Iz vsakodnevnih izkušenj je razvidno, da ob napaki pogosto zlahka pokažemo, da je vzrok pomanjkljivo ali neučinkovito vzdrževanje. Toda ko proizvodnja teče nemoteno, brez neplaniranih motenj, se ni lahko zavedati, da je to posledica učinkovitega vzdrževanja (Al-Najjar, 2007). Zato je pomembno, da se ugotovi in oceni vpliv funkcije vzdrževanja na področja, kot so proizvodnja, kakovost, logistika, nadomestni deli itd. Velik del skupnih stroškov je namreč povezanih z vzdrževanjem (Zio in Compare, 2013). Z uporabo nekaterih dobro znanih praks/konceptov vzdrževanja lahko z zmanjšanjem stroškov vzdrževanja povečamo dobiček (Sharma idr., 2011). Optimizacija vzdrževanja tako pomembno prispeva k ustvarjanju vrednosti iz premoženj in doseganju poslovnih ciljev. Optimizacija vzdrževanja preko razvoja in analize ustreznih matematičnih modelov postaja vse pomembnejša (de Jonge in Scarf, 2020). Namen prispevka je predstaviti in sistematično klasificirati konkretne optimizacijske izzive na področju vzdrževanja s ciljem postaviti ustrezne temelje za razvoj in uporabo primernih matematičnih modelov, ki bodo v praksi v pomoč pri iskanju optimalnih rešitev. Modeli optimizacije vzdrževanja, vgrajeni v sisteme za podporo odločanju, namreč zagotavljajo objektivni in kvantitativni način za odločevalce na področju vzdrževanja

in obvladovanja premoženja. Dodatno bi še izpostavili pomembnost ustrezne podpore CMMS za obravnavo in analizo vzdrževalnih postopkov. Seveda pa je v današnjem času hitro spreminjajočih se zahtev, velike konkurence in zahtev glede ravni vzdrževanja vse težje ohraniti dobro učinkovitost pri uporabi obstoječih modelov optimizacije funkcije vzdrževanja. Zato je nadaljnji razvoj na tem področju ključnega pomena pri vzpostavljanju in implementaciji primerne strategije vzdrževanja s ciljem doseganja ciljev obvladovanja premoženja in posledično ciljev organizacije.

Primerna strategija vzdrževanja je tudi ključnega pomena pri doseganju trajnostne učinkovitosti. Pretekle raziskave izpostavljajo pomembnost sistematičnega pristopa pri obvladovanju sredstev za doseganje učinkovitosti in uspešnosti na trajnostnem področju (Sandu idr., 2022; Maletič idr., 2018). V tem pogledu vzdrževanje, ki mora zagotavljati razpoložljivost, zanesljivost in varnost opreme, predstavlja ključno vlogo pri trajnostnem delovanju (Franciosi idr., 2018).

Literatura

- Alaswad, S., & Xiang, Y. (2017). A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 157, 54-63, <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.08.009>.
- Al-Najjar, B. (2007). The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business. *International Journal of Production Economics*, 107(1), 260-273.
- Brezavšček, A. (2015) Stochastic Approach to Planning of Spares for Complex Deteriorating Industrial System, *Quality Technology & Quantitative Management*, 12:4, 465-480, DOI: 10.1080/16843703.2015.11673431
- Chauhan, S. P., & Singh, Dr. S. (2016). Study of computerized maintenance management system (CMMS) and computer aided maintenance planning (CAMP) in production system, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(12), 315-318.
- Crespo Marquez, A., Gomez Fernandez, J. F., Martínez-Galán Fernández, P., & Guillen Lopez, A. (2020). Maintenance management through intelligent asset management platforms (IAMP). Emerging factors, key impact areas and data models. *Energies*, 13(15), 3762.
- de Jonge, B. (2017). Maintenance Optimization based on Mathematical Modeling. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen, SOM research school.
- de Jonge, B., & Scarf, P. A. (2020). A review on maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, 285(3), 805-824. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.047>
- Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: A review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 51 (3), 229-240.
- Dolatabadi, S., & Budinska, I. (2021). Systematic Literature Review Predictive Maintenance Solutions for SMEs from the Last Decade, *Machines*, 9, 191. doi: 10.3390/machines9090191.
- El-Haram, M. A., & Horner, M. W. (2002). Factors affecting housing maintenance cost. *Journal of Quality in maintenance Engineering*, 8(2), 115-123.

- Franciosi, C., Iung, B., Miranda, S., & Riemma, S. (2018). Maintenance for sustainability in the industry 4.0 context: A scoping literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 903-908.
- Garg, A., & Deshmukh, S. G. (2006). Maintenance management: Literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12, 205-238. 10.1108/13552510610685075.
- ISO 55000. (2014). Asset management—Overview, principles and terminology. International Organization for Standardization (ISO).
- Jardine, A.K.S., & Tsang, A.H.C. (2021). *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429021565>
- Jia, G., & Gardoni, P. (2018). State-dependent stochastic models: A general stochastic framework for modeling deteriorating engineering systems considering multiple deterioration processes and their interactions, *Structural Safety*, 72, 99-110, <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.01.001>.
- Klanker, G., & Stipanovic, I., & Palić, S. (2017). The impact of different maintenance policies on ownerscosts: Case Studies from Croatia and the Netherlands. 3 Conference Joint COST TU1402 - COST TU1406 - IABSE WC1, Workshop The Value of Structural Health Monitoring for the reliable Bridge Management. doi: 10.5592/CO/BSHM2017.3.4.
- Maletič, D., Maletič, M., Al-Najjar, B., & Gomišček, B. (2020). An analysis of physical asset management core practices and their influence on operational performance. *Sustainability*, 12(21), 9097.
- Maletič, D., Marques de Almeida, N., Gomišček, B., & Maletič, M. (2022). Understanding motives for and barriers to implementing asset management system: an empirical study for engineered physical assets. *Production Planning & Control*, 1-16.
- Maletič, D., Maletič, M., Al-Najjar, B., & Gomišček, B. (2018). Development of a model linking physical asset management to sustainability performance: An empirical research. *Sustainability*, 10(12), 4759.
- Maletič, D., Maletič, M., Al-Najjar, B., & Gomišček, B. (2014). The role of maintenance in improving company's competitiveness and profitability: a case study in a textile company. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 25(4), Article 4. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2013-0033>.
- Ming-Hua, L., Jung-Fa, T. & Chian-Son Y. (2012). A Review of Deterministic Optimization Methods in Engineering and Management, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, Article ID 756023, 15 pages. <https://doi.org/10.1155/2012/756023>
- Mohd Noor, H., Mazlan, s. A., & Amrin, A. (2021) Computerized Maintenance Management System in IR4.0 Adaptation - A State of Implementation Review and Perspective. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1051 012019, doi: 10.1088/1757-899X/1051/1/012019
- Nwadinobi, C. P. & Ezeaku, I. I. (2018). Review of Maintenance Scheduling and Optimization Models. *International Journal of Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering*, 2(5), 23-35.
- Powell, W. B. (2019). A unified framework for stochastic optimization, *European Journal of Operational Research*, 275(3), 795-821, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.014>.
- Salonen, A., & Deleryd, M. (2011). Cost of poor maintenance: A concept for maintenance performance improvement. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 63-73.
- Sandu, G., Varganova, O., & Samii, B. (2022). Managing physical assets: a systematic review and a sustainable perspective. *International Journal of Production Research*, 1-23.
- Shaheen, B.W., & Németh, I. (2022). Integration of Maintenance Management System Functions with Industry 4.0 Technologies and Features—A Review. *Processes*, 10, 2173. <https://doi.org/10.3390/pr10112173>
- Sharma, A., Yadava, G. S., & Deshmukh, S. G. (2011), A literature review and future perspectives on maintenance optimization, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 5-25. <https://doi.org/10.1108/13552511111116222>
- Simões, J. M., Gomes, C. F., & Yasin, M. M. (2011). A literature review of maintenance performance measurement: A conceptual framework and directions for future research. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(2), 116-137.

- Sinkkonen, T., Marttonen, S., Tynnenen, L., & Kärri, T. (2013). Modelling costs in maintenance networks. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(3), 330-344.
- SIST EN 13306 (2018). Vzdrževanje - Terminologija s področja vzdrževanja. CEN EN - European committee for standardization.
- Supriatna, A., & Singgih, M. L. (2016). Preventive maintenance strategies: Literature review and directions. *The 7th International Conference on Operations and Supply Chain Management 2016*, Phuket Thailand.
- Tavakoli, M. & Nafar, M. (2021). Reduce maintenance costs by improving human reliability in power grids. *Electrical Engineering*. 103. 10.1007/s00202-020-01202-4.
- Vasili, M. R., Hong, T. S., & Ismail, N. (2011). Maintenance optimization models: a review and analysis. *Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, January 22 – 24, 2011.
- Waeyenberg, G., & Pintelon, L. (2002). A framework for maintenance concept development. *International Journal of Production Economics*, 77 (3), 299–313.
- Zio, E., & Compare, M. (2013). Evaluating maintenance policies by quantitative modeling and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 109, 53–65.

