

# TRIBOLOŠKI TESTI S HIDRAVLIČNIMI ČRPALKAMI OB SPREMENLJIVI OBREMENITVI

Darko Lovrec, Vito Tič

## Izvleček:

Na področju triboloških testov, ki temeljijo na uporabi hidravličnih črpalk, je na voljo več različnih testov, s katerimi se želimo čim bolj približati realnim obratovalnim razmeram. Cilj vseh teh testov je ugotavljanje odpornosti hidravlične črpalke na obrabo njenih vitalnih delov ob uporabi testirane hidravlične tekočine. Tovrstni testi predvidevajo uporabo različnih vrst in velikosti črpalk, različno velike količine testirane hidravlične tekočine, različne obratovalne pogoje ter tudi različen profil in način obremenjevanja črpalke.

Prispevek obravnava tribološke teste z različnimi hidravličnimi črpalkami, kjer se spremenljiva obremenitev črpalke doseže na različne načine. V nadaljevanju prispevka je prikazan lasten pristop testiranja triboloških lastnosti tekočine z zobniško črpalko skupaj z drugimi komponentami hidravličnega sistema, kjer se doseže spreminjanje obremenitve preko ventilske krmiljene linearne bremenske enote.

## Ključne besede:

hidravlične tekočine, mazalne lastnosti, testi s črpalkami, značilnosti testov, spremenljiva obremenitev, profil obremenitve

## 1 Uvod

Testiranje mazalnih sposobnosti tekočih maziv, tudi hidravličnih tekočin, poteka na različne načine, z različnimi pristopi oz. testi. Pri določenih vrstah testov so v ospredju fizikalno-kemijske lastnosti tekočine, predvsem tiste, ki so povezane z njenimi mazalnimi lastnostmi, ali pa je poudarek na ugotavljanju vzdržljivosti tekočine in njene uporabne dobe, tudi vplivov različnih obratovalnih parametrov in pogojev, ter učinek na degradacijo hidravlične komponente [1], [2], [3], [4].

Z mehanskimi testi se želimo čim bolj približati razmeram, ki se pojavljajo v sami hidravlični komponenti, npr. črpalki, med njenim obratovanjem, npr. trenje krilca ob tekalno ploskev krilne črpalke, razmere pri ubiranju dveh zob zobniške črpalke ali zobniškega prenosnika, trenje pri gibanju bata črpalke v izvrtini ... tudi v ventilih ipd. Končni namen teh testov je reproducirati mehanizme obrabe, kakršni se pojavljajo v določeni komponenti in na osnovi teh podatki izjave o učinkovitosti uporabljane tekočine. Običajno gre za kratkotrajne standardizirane ali uveljavljene laboratorijske tribološke teste, ki se izvajajo pod določenimi pogo-

ji, značilnimi za test. Ti testi običajno ne potekajo v obratovalnih pogojih, kakršnim so izpostavljene hidravlične komponente pri svoji dejanski uporabi – tlak, temperatura, prisotnost vode, profil spreminjanja obremenitve, količina tekočine, čas obratovanja.

Veliko bližje realnim pogojem obratovanja so testi, ki se izvajajo s hidravličnimi črpalkami v obratovalnih testnih pogojih, ki so blizu realnim pogojem. Tudi pri tovrstnih testih se uporablja več različnih pristopov. Tribološke teste, ki se izvajajo s hidravličnimi črpalkami, bi lahko razdelili v različne skupine glede na različne značilnosti. Tako lahko teste razdelimo glede na vrsto uporabljane črpalke, npr. na teste s krilnimi, z batnimi in z zobniškimi črpalkami, pri čemer so lahko uporabljene črpalke s konstantno iztisnino ali pa so nastavljive. Vsaka od omenjenih vrst črpalk ima svojo značilno kinematiko in mehanizem nastajanja obrabe v kombinaciji s testirano hidravlično tekočino.

Nadaljnja možna razdelitev je glede na količino uporabljane testne hidravlične tekočine, ki se navezuje na velikost uporabljane črpalke. To določa velikost števila prečrpavanja in s tem stopnjo obremenitve tekočine. Tako lahko govorimo o testih z veliko količino tekočine in testih z majhno količino tekočine. Običajno gre za teste, ki predvidevajo velike količine tekočine, visoke obratovalne tlake in povišano temperaturo (npr. za Eaton-Vickersov test: 190 litrov tekočine, tlak testiranja 207 bar in temperatura 93 °C). Tudi moč pogonskega agre-

**Prof. dr. Darko Lovrec**, univ.dipl. inž., **doc. dr. Vito Tič**, univ. dipl. inž., oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

gata je običajno velika, število prečrpavanja povečano, čas trajanja testa pa dolg (npr. za omenjeni Eaton-Vickersov test: 91 kW, 144 L/minuto, 42 dni). Nekateri testi uporabljajo točno določen tip hidravlične črpalke (npr. Eaton-Vickersov test s črpalko tip 35VQ-25, Sundstrandov test z batno črpalko serije 22), drugi samo določeno vrsto črpalke, npr. batno ali zobniško črpalko. Nasprotno tem testom pa se uporabljajo tudi testi, ki predvidevajo majhno količino testirane tekočine, npr. Lapotkov test MP-1 s krilno črpalko, kjer znaša količina testirane tekočine le 0,7 litra. [7]

Testi s krilnimi črpalkami so (bili) med bolj (pri) znanimi testi, ki se izvajajo pri srednje visokem obratovalnem tlaku in so veljali za splošno uporabne teste. S kinematičnega in tribološkega vidika je kontakt med krilci, ki drsijo po tekalnem obroču črpalke, značilen za krilne črpalke, drugačen od triboloških oz. obrabnih razmer, značilnih za batne črpalke. Razen tega pa je tlak pri testiranju bistveno višji. Zaradi tega testi z batnimi črpalkami veliko bolje ponazarjajo dogajanje za primer uporabe batnih črpalk. Vsekakor je pri izbiri testa smiselno upoštevati vrsto črpalke, ki bo v uporabi.

Nadalje bi lahko vse znane tribološke teste s hidravličnimi črpalkami razdelili na tiste, ki so se skozi leta uveljavili kot priporočeni, pri čemer so nekateri postali standardni, drugi pa so »zgolj« priporočani in izvajani namensko, npr. za testiranje HFC-tekočin ali biološko hitreje razgradljivih tekočin. Lahko pa so to testi s črpalkami, ki se običajno uporabljajo v mobilni hidravliki, kjer so značilni višji obratovalni tlaki, ali pa gre za druga področja uporabe, npr. v rudnikih ali v premogovnikih.

Prav tako je možno teste s črpalkami razdeliti glede na način obremenitve: ali je obremenitev konstantna, ob konstantnem tlaku, ali pa se obremenitev ciklično spreminja na različne načine, po različnem profilu. Nadaljnji vidik je npr. tudi, ali se test izvaja pod običajnimi obratovalnimi pogoji ali pa so ti zaostreni, npr. povišana temperatura ali prisotnost vode.

Testi s hidravličnimi črpalkami so glede na omejene načine izvedbe in uporabljene črpalke zelo raznoliki, običajno zasnovani za določen namen testiranja. Za nobenega od testov zato ne moremo splošno reči, da je od vseh najprimernejši, drugi pa so manj primerni ali neprimerni. Vsak test je bil zasnovan z določenim namenom in se za ta namen tudi uporablja. Tako so določene teste zasnovali kar sami proizvajalci hidravličnih črpalk za testiranje svojega izdelka (običajno so za test uporabili v praksi najpogostejše uporabljene hidravlične črpalke) ali pa gre za proizvajalce celovitih hidravličnih naprav. Tako se določen test pogosto poimenuje po proizvajalcu komponente, npr. Vickersov test, Denisonov test, Parker-Denisonov

test, Bosch-Rexrothov test, ali po proizvajalcu hidravlično gnanih strojev, npr. Komatsujev test ipd. Podrobnejši pregled bolj ali manj uveljavljenih testov z navedenimi pogoji testiranja je podan v strokovni literaturi, npr. [5], [6] ali [7].

Vsekakor so eden od pomembnejših vidikov testiranja obratovalni pogoji, uporabljeni pri testiranju, predvsem način obremenjevanja testne črpalke. Določeni testi potekajo pri konstantnem tlaku [7], čeprav je ta povišan oz. najvišji dovoljen za določeno črpalko, pri drugih pa se profil obremenjevanja ciklično spreminja. Po mnenju strokovnjakov so slednji testi, testi s t. i. spremenljivimi obratovalnimi pogoji oz. spremenljivim obremenjevanjem, bližje realnim obratovalnim pogojem in s tem rezultati testiranja realnejši. Tej vrsti testov se bomo podrobneje posvetili v naslednjih poglavjih.

## 2 Testi s spremenljivimi obratovalni pogoji

Pri testih s črpalkami sta med pomembnejšimi obratovalnimi parametri višina obratovalnega tlaka in vrtilna hitrost črpalke. S slednjo je povezana hitrost gibanja vitalnih sestavnih delov črpalke, z višino obratovalnega tlaka pa obremenitev ploskve. Tako je pri testih s črpalkami, ki potekajo pri konstantnem tlaku, ta konstanten, a različno visok [7]. Prav tako so lahko različni vrtiljaji pogona in s tem pretok črpalke. Pri večini tovrstnih testov so uporabljene črpalke s konstantno iztisnino, obremenjevanje črpalke pa poteka z višjim ali nižjim konstantnim tlakom. Pri drugi skupini testov se profil obremenitve črpalke s tlakom spreminja ciklično – obremenjevanje črpalke s konstantnim, a različno visokim tlakom v posamezni fazi cikla testiranja. Spreminjanje tlaka je na najenostavnejši način doseženo s tlačno omejevalnimi ventili.

Zelo poznan in uveljavljen test s spremenljivo obremenitvijo črpalke je Eaton-Vickersov test s krilnima črpalkama tip V-104 in tip 20VQ5. Primerjavo obratovalnih parametrov pri izvedbi testa, vključno z višinami obratovalnega tlaka in velikostmi pretokov obeh črpalk, prikazuje tabela 1.

Glede na kataloške podatke o dovoljenem najvišjem obratovalnem tlaku in vrtiljajih za omenjeni vrsti črpalk vidimo, da so pri Eaton-Vickersovih testih uporabljene višje vrednosti. Medtem ko je pri črpalki 20VQ5 uporabljen za testiranje enak tlak, kot znaša priporočljiva vrednost za najvišji tlak, naveden v katalogu, sta v primeru črpalke V-104 tlaka testiranja 103 bar in 138 bar višja od navedene v katalogu za to črpalko – 69 bar, priporočena vrednost. To seveda vpliva na mehanizem oz. potek obrabe črpalke, ki je odvisen od hitrosti in od obremenitve. Vrtljaji pri izvajanju testa so enaki, kot so navedeni v podatkovnem listu. [1]

**Tabela 1 :** Primerjava Eaton-Vickersovih testov s spremenljivimi obratovalnimi parametri [1]

| Parameter        | Eaton-Vickers V-104 |      | Eaton-Vickers 20VQ5 |      |      |
|------------------|---------------------|------|---------------------|------|------|
| Pretok (l/min)   | 30                  | 38   | 19                  | 38   | 43   |
| Tlak (bar)       | 138                 | 103  | 207                 | 207  | 207  |
| Vrtljaji (min-1) | 1200                | 1500 | 1200                | 2400 | 2700 |
| Moč (kW)         | 69                  | 65   | 65                  | 130  | 147  |

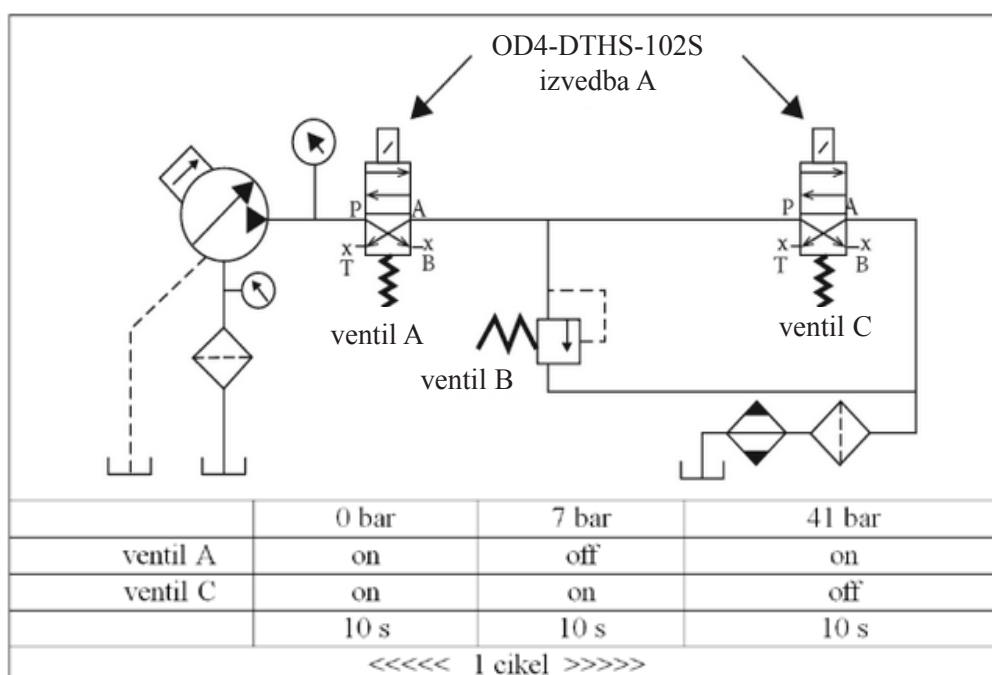
Op.: Podane vrednosti za pretok, tlak in moč so preračunane iz angleških enot gpm, psi in hp ter zaokrožene na celoštevilčno vrednost.

Podobno je v primeru testov z batnimi črpalkami. Pri batnih črpalkah se pojavlja več vrst obrabe. Razen drsne obrabe pri gibanju bata v izvrtini se pojavlja še kombinirana obraba (v kombinaciji s kotaljenjem in vrtenjem elementov črpalke) kot tudi obraba zaradi korozije in kavitacije. Na testiranje z uporabo batne črpalke se npr. nanaša tudi standard ASTM D6813-02a [8]. Pogosto je za testiranje uporabljena Sauer-Danfossova procedura za ugotavljanje vpliva kontaminacije z vodo, kjer se obratovalni tlak spreminja po določenem profilu – različno dolgo ohranjanje različno visokega obratovalnega tlaka: 345 bar v trajanju do 2 ur, 207 bar v času testiranja od 3. do 25. ure, 34 bar od 25. do 26. ure in 380 bar od 26. do 225. ure – t. i. ciklično obremenjevanje. Ker je ta test namenjen ugotavljanju vpliva prisotnosti vode, so v navedenih periodah različno visokega obratovalnega tlaka faze brez prisotnosti vode (prvih 25 ur), v nadaljevanju pa je vse do konca testa ob različno visokem obratovalnem tlaku vzdrževana 1-odstotna kontaminacija z vodo. Razen pregleda znakov obrabe, korozije in kavitacije je nadaljnji kriterij testa tudi upad pretoka črpalke – upad pretoka za 10 % se šteje kot okvara črpalke. [1]

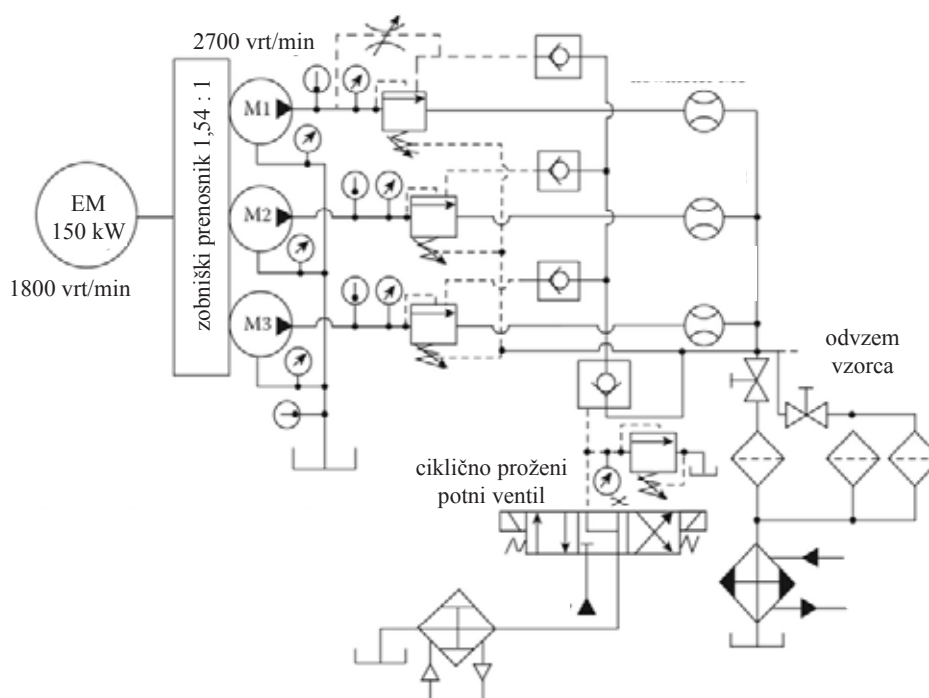
Primer cikličnega obremenjevanja črpalke je tudi test zmogljivosti za hidravlične tekočine HFC, kjer je predvidena uporaba Sauer-Danfossove aksialne batne črpalke v izvedbi s poševno ploščo, gnano s Sauer-Danfossom hidromotorjem Serija 20 enake izvedbe. Časi trajanja posameznih period so skupno s 600 s dolгим ciklom obremenjevanja ter pripadajočimi tlaki podani v tabeli 2. Celoten test cikličnega obremenjevanja traja 500 ur. Po končanem testu so vse rotacijske komponente črpalke pregledane na znake obrabe.

**Tabela 2 :** Faze cikličnega obremenjevanja Sauer-Danfossovega 500-urnega testa

| Trajanje periode obremenitve (s) | Tlak v posamezni periodi obremenitve (bar) |
|----------------------------------|--------------------------------------------|
| 130                              | 214                                        |
| 325                              | 172                                        |
| 60                               | 310                                        |
| 85                               | 172                                        |



**Slika 1 :** Bosch-Rexrothov (Racine) test s cikličnim obremenjevanjem krilne črpalke SV-10



**Slika 2 :** Preskuševališče za tribološke teste z zobniškimi črpalkami Wanke

Zanimiv test s cikličnim obremenjevanjem je tudi Boschev test – Bosch-Racinov test (ali Bosch-Rexrothov test s krilno črpalko). Ta test predvideva uporabo cikličnega obremenjevanja krilne črpalke tipa SV-10, gnane z elektromotorjem moči približno 5,5 kW, pri čemer ima rezervoar velikost 70 litrov. Trajanje faz spreminjanja tlaka kot tudi shema testne naprave sta podana na *sliki 1*. Tlak se spreminja od tlačno razbremenjenega stanja do tlaka 10 bar in dalje na 40 bar, pri čemer vsaka faza traja po 10 s.

Spreminjanje obremenitve črpalke se dosega z vklapljanjem potnih ventilov in tlačnega ventila. Zaradi tlačnih konic, ki se pojavljajo pri preklonih potnega ventila, veliko bolje posnemamo njihov vpliv na delovanje in obrabo črpalke ter na delovanje celotnega hidravličnega sistema, kot je to v primeru testov s konstantnim tlakom obremenjevanja. Tudi v tem primeru se po končanem testu merijo izgube mase obroča in krilc ter opazujejo druge poškodbe kontaktne površine ter ležajev črpalke (podobno kot pri Eaton-Vickersovem testu).

Podobnih testov je kar nekaj, nekateri so se pojavili že zelo zgodaj. Sem spada manj znan test s cikličnim obremenjevanjem Vickersove batne črpalke AA 65560-ISC-4 [9]. Omenimo lahko tudi test s sedmimi hkrati delujočimi zobniškimi črpalkami, ki ga je zasnoval Knight, in je namenjen testiranju obrabe zobniških črpalk [10]. Pri tem so črpalke obremenjene s tlakom 143 bar, ki traja vse do izpada (prekomerne obrabe) črpalke oz. do poškodbe ležaja. V drugem primeru zelo podobnega testa je testiranje potekalo ob spremenljivem tlaku obremenjevanja.

Podoben test, a s tremi zobniškimi črpalkami, je predlagal in izvedel tudi Wanke [11]. Pri tem testu je bila v ospredju študija vpliva stopnje čistosti na obrabo zobnikov. V primeru tega testa je obremenitev ciklična – ciklično spreminjajoč se tlak, pogonski električni motor pa je moči 150 kW. Zgradbo preskuševališča za izvedbo tega testa prikazuje *slika 2*.

Primeri testov, na kratko predstavljeni v tem poglavju, sicer potekajo ob spremenljivih obratovalnih pogojih: spremenljiv obratovalni tlak različne višine, ki traja daljši čas, perioda trajanja tlaka (različno dolgo obremenjevanje s tlakom različne višine). Veliko bolj zaostrene pogoje testiranja pa predstavlja hitre in nenehne pulzirajoče spremembe obratovalnega tlaka.

### 3 Testi s spremenljivim tlakom obremenjevanja

Tudi triboloških testov s hitrejšim spreminjanjem obratovalnega tlaka in s tem intenzivnejšo obrabo je kar nekaj. Tudi za te teste velja, da so bili izvedeni za različne namene, profilov in načinov doseganja hitrejših sprememb tlaka pa je več.

Janko je npr. izvedel 1250 ur dolg test z batno črpalko, gnano z visokimi vrtljaji [12]. Prvih 1000 ur testa je bila črpalka obremenjena s konstantnim tlakom 140 bar, v nadaljevanju vse do konca testa pa se je tlak spreminjal med 70 bar in 140 bar s frekvenco 0,1 Hz. Vsakih 250 ur testa je bila črpalka razstavljena in vizualno pregledana. Poudarek je bil na obrabi ključnih elementov, kot so bati, drsni

čevlji, cilindrski boben, ventilska plošča ... ter ležaji črpalke.

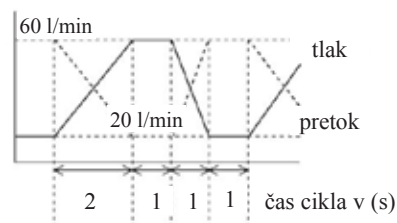
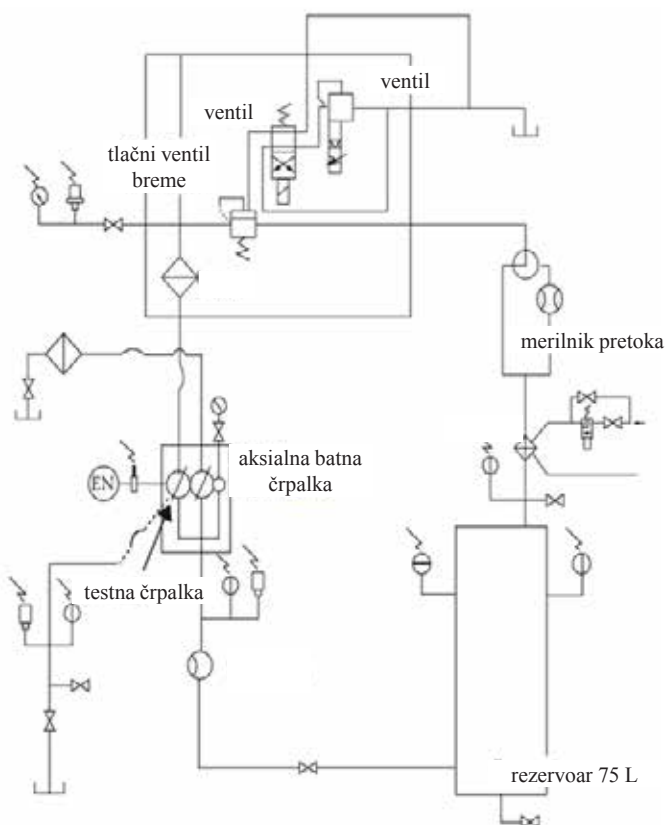
Ohkawa je razvil 500-urni test z uporabo dvojne batne črpalke Komatsu HPV35+35, ki je namenjen predvsem testiranju biološko hitreje razgradljivih hidravličnih olj in za področje mobilne hidravlike [13]. Testiranje poteka pri ciklično spremenljivem se tlaku (od 10 bar do približno 410 bar) in pretoku med 60 l/min in 20 l/min, pri trajanju cikla 5 s, velikost rezervoarja pa znaša cca 75 litrov. Pri tem testu se spremljajo spremembe učinkovitosti črpalke, trenje in spremembe hrapavosti površine, tvorjenje lakastih produktov in gošč ter seveda slabšanje fizikalno-kemijskega stanja olja. Test je danes znan kot Komatsujev test. Preskuševališče za izvedbo Komatsujevega testa in profil obremenjevanja batne črpalke sta prikazana na *sliki 3*.

Za razliko od Bosch-Rexrothovega testa s krilno črpalko nadaljnji Rexrothov test določa uporabo dveh nastavljivih batnih črpalk (tandem) tipa AA-4VSO-71DR in poteka v treh stopnjah. Pogonska moč znaša 45 kW (regenerativna moč 100 kW), velikost rezervoarja pa od 150 do 200 litrov. Prva stopnja testa (250 ur) poteka pri maksimalnem tlaku in maksimalni temperaturi ter s tem pri minimalni dovoljeni viskoznosti tekočine. Druga stopnja testa poteka pri pulzirajoče se spreminjajočem tlaku ob največji nastavitvi črpalke od najnižjega tlaka do maksimalnega tlaka in na najvišji temperaturi, dolo-

čeni s specifikacijo tekočine, ter traja 1 milijon ciklov s frekvenco spreminjanja tlaka 2 do 3 Hz (cca 140 do 93 ur). V tretji fazi testiranja, ki traja 280 ur, poteka testiranje ob spremenljivem pretoku od minimalnega do maksimalnega, ob maksimalnem tlaku in temperaturi ter minimalni viskoznosti.

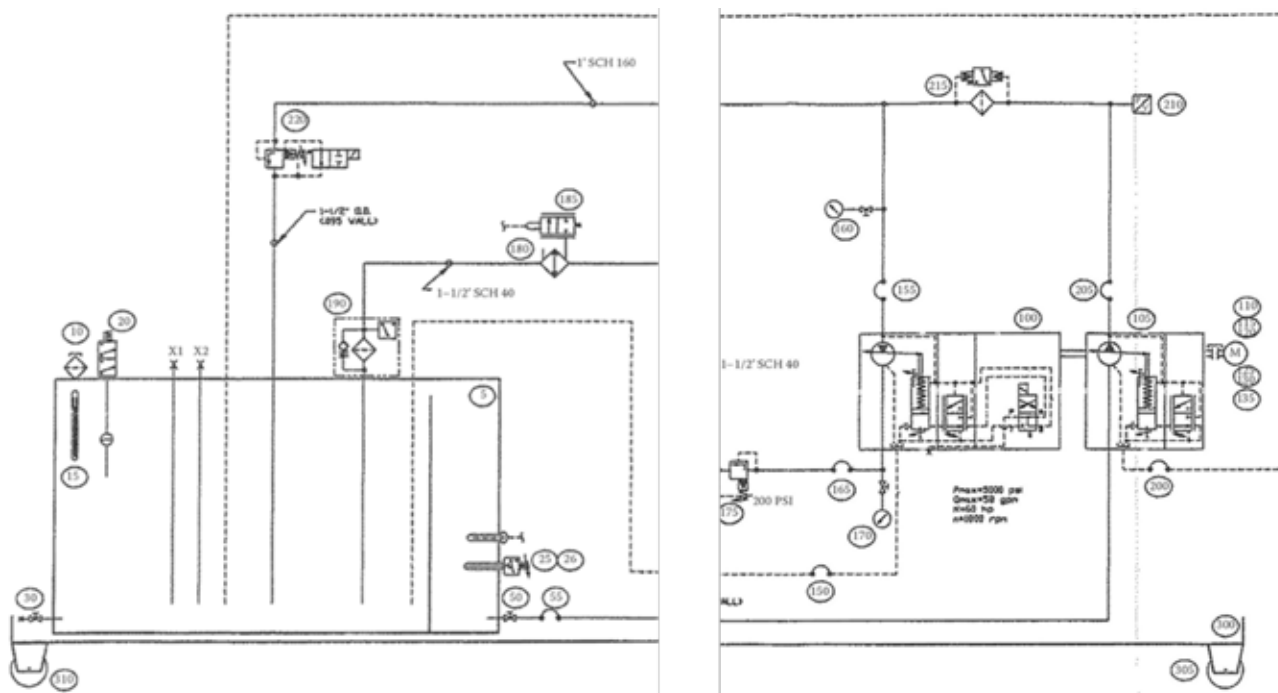
Po vsaki fazi testiranja se črpalka demontira in razstavi ter pregleda [14]. Preskuševališče Bosch-Rexrothovega kombiniranega testa s spremenljivim dinamičnim obremenjevanjem prikazuje *slika 4*.

Posodobljen Bosch-Rexrothov test se izvaja skladno z zahtevami, podanimi v podatkovnem listu Rexroth RDE 90235, kjer je v ospredju interakcija med tekočino in vitalnimi sestavnimi deli komponent pri dejanskih obratovalnih pogojih [15]. Standardizirani postopek je bil sprva razvit in sprejet za aksialno-batne hidravlične črpalke serije A4VG in za hidravlične motorje serije A6VM, delujoče v zaprtih hidravličnih krogotokih. Po prvi fazi konstantne obremenitve so komponente podvržene dinamičnemu cikličnemu obremenjevanju pod visokim tlakom v trajanju 300 ur: 450 bar, 4.000 vrt/min in temperatura 100 °C. Test se nadaljuje v preizkus skrajne zmogljivosti, s katerim se preveri nosilnost komponent pri največjem tlaku in hitrosti, kar poteka 200 ur: 500 bar, 4.000 vrt/min in 100 °C. Oba dela testa kot celota služita za ugotavljanje odpornosti na strižne obremenitve, zaščite proti obrabi in združljivosti materialov s testirano tekočino ipd.



Tlak: 10 bar do 415 bar  
 Pretok: 20 l/min pri 415 bar in  
 60 l/min pri 10 bar  
 Vrtljaji: 2100 vrt/min  
 Temperatura tekočine: 80 oC  
 Velikost rezervoarja: cca 75 L  
 Trajanje testa: 500 ur

**Slika 3 :** Preskuševališče Komatsujevega testa HVP 35+35 in profil obremenjevanja [1]



Slika 4 : Preskuševališče za Bosch-Rexrothov test z dinamičnim obremenjevanjem batne črpalke [14]

#### 4 Razvoj kombiniranega testa z dinamičnim obremenjevanjem črpalke

Pri vseh omenjenih testih s črpalkami gre za sorazmerno velike sisteme z veliko količino hidravlične tekočine, običajno večjo kot 100 litrov. Razen v primeru Komatsujevega testa, kjer je količina nekoliko manjša, saj je test namenjen za področje mobilne hidravlike, kjer so značilna nekoliko višja števila prečrpavanja. Razen tega pa so vsi testi vezani na uporabo bolj ali manj znane hidravlične tekočine, ki ne »bi povzročila prevelike škode« na vseh komponentah praviloma drage testne naprave. Pri vseh testih je bolj ali manj poudarek na kombinaciji opazovanja vzajemnega vpliva črpalke-tekočina.

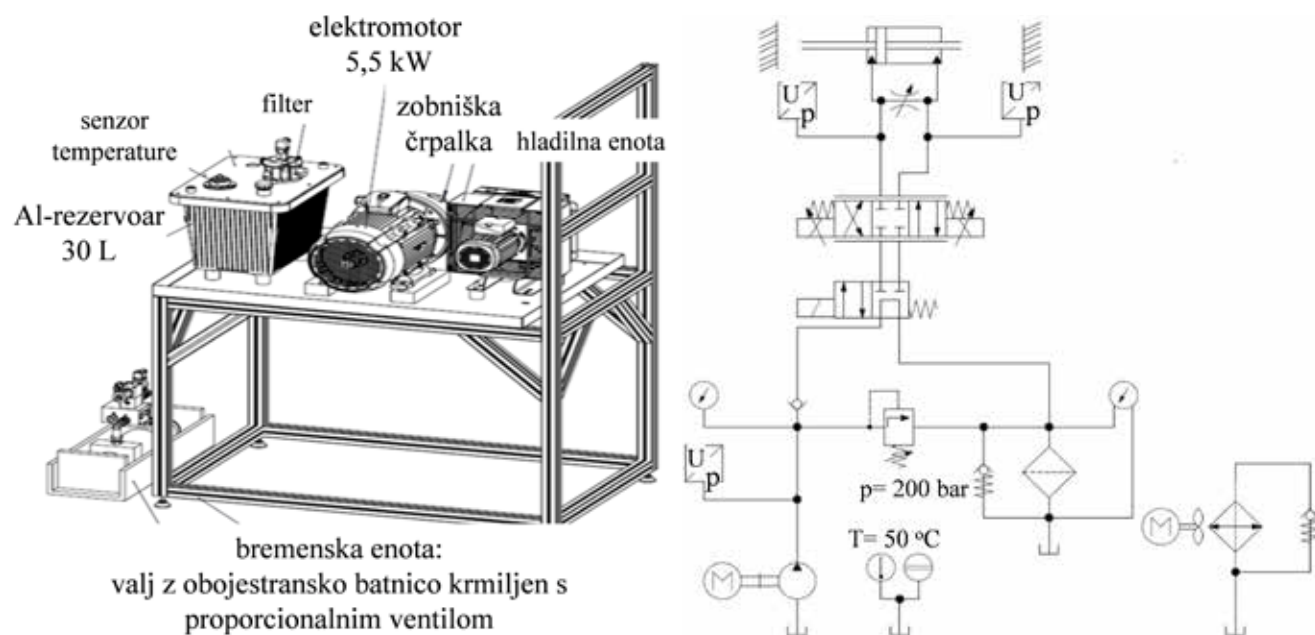
Za popolnoma nove vrste hidravlične tekočine ali pri novi formulaciji sicer znane tekočine (npr. novi paket aditivov) bi bili omenjeni testi predragi. V takšnih primerih vedno obstaja nevarnost velike poškodbe testne naprave, pa čeprav so bili pred trajnimi testiranjimi pod realnimi obratovalnimi pogoji izvedeni testi posamičnih fizikalno-kemijskih lastnosti nove tekočine kot tudi testi združljivosti z materiali.

Druga pomanjkljivost je ta, da na žalost noben od do sedaj omenjenih testov ne daje celovite informacije o vplivu hidravlične tekočine na vse druge pomembne komponente hidravličnega sistema – na krmilni ventil, hidravlični valj s tesnili, hladilnik hidravlične tekočine, materiale tesnil in drugih komponent, npr. cevi in priključkov, vpliv na senzorje itd. Prav tako ni predvideno spremljanje porabe energije med posameznimi fazami testa ali pri ce-

lotnem testu. Omenjene pomanjkljivosti so vodile do zasnove lastne kombinirane testne naprave za testiranje znanih in povsem novih hidravličnih tekočin, ki zagotavlja celovit vpogled v degradacijo vseh pomembnih hidravličnih komponent. Shema kombinirane testne naprave za trajno testiranje hidravličnih tekočin in njihovega vpliva na zmogljivosti vseh komponent naprave je prikazana na sliki 5.

V primerjavi z do sedaj omenjenimi testnimi napravami gre za testno napravo z manjšo količino testirane hidravlične tekočine – 20 litrov. Kot črpalka je uporabljena zobniška črpalka z zunanjim ozobjem pretoka 12 l/min, gnana z elektromotorjem moči 5,5 kW in vrtilno hitrostjo 1460 vrt/min. Z ozirom na količino testirane tekočine in velikost pogonske moči gre za testno napravo manjše moči s povečanim številom prečrpavanja. Temperatura tekočine je lahko vzdrževana na konstantni vrednosti 50 °C ali na poljubni višji vrednosti v primeru testa pri povišani temperaturi. Obremenjevanje črpalke s tlakom ni doseženo s tlačnimi ventili, ki predstavljajo breme, temveč posredno preko bremenske enote, ki je zgrajena iz simetričnega hidravličnega valja z obojestransko batnico, krmiljenega s proporcionalnim ventilom. Ta način obremenjevanja črpalke je veliko bližje realnemu dogajanju na realnih hidravličnih napravah.

Zobniška črpalka s svojo značilno tribologijo je dinamično obremenjevana s spremenljivim tlakom, ki se spreminja od minimalne vrednosti (stanje razbremenjenosti pri tlaku, enakem skupnemu padcu tlaka v cevovodu) do maksimalne vrednosti cca. 210 bar. Tlak se spreminja s frekvenco oz. taktom,



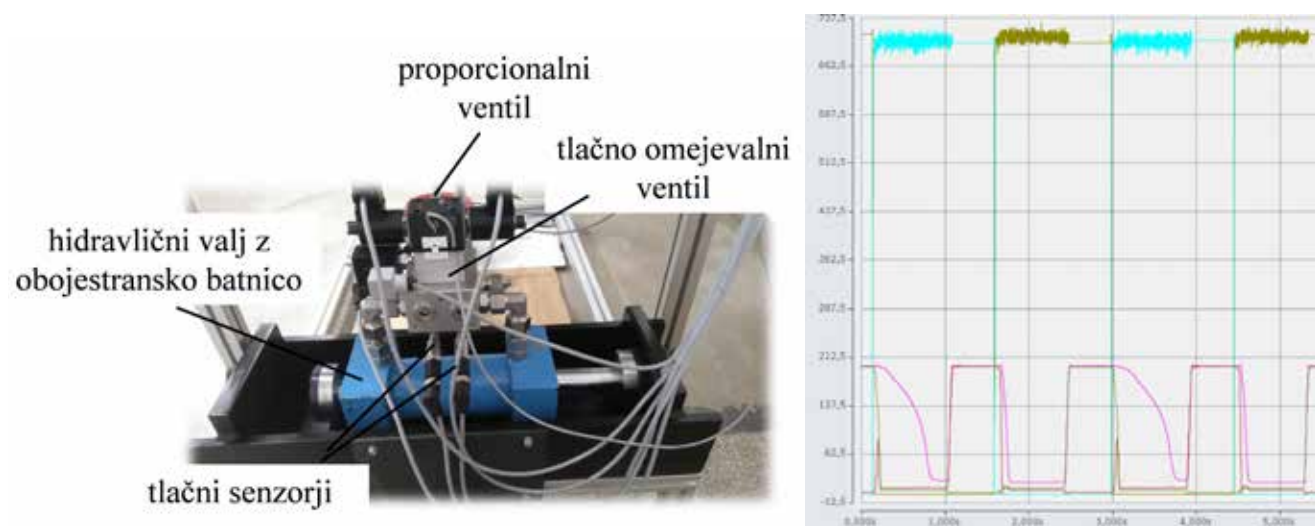
**Slika 5 :** Videz testne naprave in pripadajoča hidravlična shema

ki ga določa gibanje simetričnega valja v izvedbi z obojestransko batnico, opremljeno s poliuretansko pritisko ploščo (*slika 6*).

Valj bremenske enote je krmiljen s proporcionalnim ventilom, pri čemer je proženje ventila določeno na podlagi znane statične karakteristike proporcionalnega ventila krmilni signal-pretok ventila,  $I$ - $Q$ -karakteristika. Ta je lahko podana v katalogu proizvajalca ventila ali pa dobljena na podlagi predhodnega merjenja  $I$ - $Q$ -karakteristike za dejansko uporabljeni ventil [16]. Bremenska enota s pripravljenim ventilskim krmilnim sklopom je prikazana na sliki 6. Prav tako sta prikazana potek spreminjanja krmilnega signala proporcionalnega ventila in posledično spreminjanje tlaka na črpalki – ta se spreminja med 5 bar in 210 bar, pri čemer celotna

perioda dveh sprememb traja 2 s (pritisk batnice na eno in na nasprotno ležečo oporno ploščo ohišja bremenske enote). Na ta način dosežemo pulzno spreminjanje bremenskega tlaka na črpalki s frekvenco cca 1-2 Hz.

Krmilni signal proporcionalnega ventila (in s tem posredno hitrost spreminjanja tlaka na črpalki) je določen tako, da je odprtje ventila v področju malih signalov oz. malih pomikov krmilnega drsnika – delno odprtje ventila. Na ta način dosežemo povečan vpliv testirane tekočine na krmilne robove ventila. Če gre za proporcionalni ventil z manjšim pozitivnim prekritjem, je potrebno velikost mrtve cone ventila upoštevati pri določanju krmilnega signala ventila. Kvaliteta zvezno delujočega krmilnega ventila na ta način določa hitrost preklopa



**Slika 6 :** Bremenska enota (levo), krmilni signal ventila in profil spreminjanja tlaka (desno)

periode obremenitve. V primeru krmilnega ventila z minimalnim ali ničelnim prekritjem je frekvenca obremenjevanja črpalke posredno preko bremenske enote lahko višja.

Za potrebe spremljanja parametrov testiranja med potekom testa zasledujemo 22 parametrov: od tlakov na črpalki, krmilnem ventilu in filtru do pretokov črpalke ob bremenu in ob razbremenjenem stanju, temperatur na vseh vitalnih delih hidravličnih komponent, vse do porabe vstopne električne energije in časov delovanja hladilnega sistema v odvisnosti od temperature okolice in obratovalnih temperatur.

Merilo za stopnjo obrabe črpalke je padec pretoka pod bremenskim tlakom, ki ga merimo med samim delovanjem testne naprave v času trajanja 1 milijon ciklov obremenitve črpalke ali do njene odpovedi. Po končanem testiranju se črpalka razstavi in preverijo ter ovrednotijo sledi obrabe. Stopnja degradacije ventila se ugotavlja posredno z merjenjem vseh pomembnejših statičnih karakteristik po koncu testiranja in primerja s karakteristikami ventila, izmerjenimi pred začetkom testiranja.

## 5 Zaključek

Za tribološke raziskave vpliva hidravlične tekočine na hidravlične komponente so se uveljavili testi s hidravličnimi črpalkami kot najbolj obremenjenimi komponentami v hidravličnem sistemu. Testi s črpalkami so zelo raznoliki tako glede na vrsto uporabljene črpalke kot način obremenjevanja črpalk in obratovalnih pogojev. V prispevku je poudarek na tistih testih s črpalkami, ki potekajo ob spremenljivi obremenitvi črpalke – spreminjanje obratovalnega tlaka, in so se uveljavili v praksi. Večina predstavljenih testov se nanaša na vzajemni vpliv uporabljene testne hidravlične tekočine na vitalne dele uporabljene črpalke. Druge komponente hidravličnega sistema v okviru teh testov niso obravnavane oz. njegovo stanje ni spremljano.

Za razliko od vseh opisanih testov s spremenljivim obremenjevanjem je lastno zasnovan test, predstavljen v poglavju 4, veliko bolj celovit, saj podaja vpogled v degradacijo vseh komponent hidravlične naprave in ne samo črpalke. Je tudi energetsko racionalnejši kot drugi testi, ki potrebujejo veliko pogonsko moč. Razen tega pa so uporabljene cenovno ugodne komponente, kar je še posebej pomembno v primeru prvega testiranja povsem novih hidravličnih tekočin, ki še niso bile trajnostno testirane v realnih obratovalnih pogojih. Številni merjeni parametri omogočajo sprotno spremljanje stanja obratovalnih parametrov in kasnejše podrobnejše analize. Z menjavo zobniške črpalke za drugo vrsto črpalke, npr. batne, pa je možno izvesti testiranje tudi pri veliko višjih obratovalnih tlakih.

## Viri

- [1] Totten, G. E., De Negri, V. J.: Handbook of Hydraulic Fluid Technology, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2nd edition, ISBN 9781138077348, 2012, 983 str.
- [2] Lovrec, D., Tič, V.: Thermal tests for testing of degradation behaviour of mineral based hydraulic oils. TMT 2016: proceedings, 20th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", ISSN 1840-4944, letnik 20, št. 1., str. 141-144.
- [3] Lovrec, D.: Mechanical tests for accelerated testing of mineral lubricants with respect to its degradation. TMT 2016: proceedings, 20th International Research/Expert Conference »Trends in the Development of Machinery and Associated Technology«, TMT Proceedings, ISSN 1840-4944, letnik 20, št. 1, str. 137-140.
- [4] Tič, V., Tašner, T., Lovrec, D.: Enhanced lubricant management to reduce costs and minimise environmental impact. Energy, ISSN 0360-5442, 2014, vol. 77, str. 108-116; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214005799#>; doi: 10.1016/j.energy.2014.05.030.
- [5] Totten, G. E., Kling, G. H., Smolenski, D. J.: Tribology of Hydraulic Pump Testing, Technology & Engineering, ASTM STP 1310, 1997.
- [6] Totten, G. E., Bishop, R. J., Gent, G. M.: Evaluation of Hydraulic Fluid Lubrication by Vickers Vane Pump Testing: Effect of Testing Conditions, NFPA, Presented at the International Exposition for Power Transmission and Technical Conference 4-6 April 2000, Technical paper series I00-9.7.
- [7] Lovrec, D., Tič, V.: Tribološki testi s hidravličnimi črpalkami ob konstantni obremenitvi. Ventil : revija za fluidno tehniko in avtomatizacijo, ISSN 1318-7279, april 2019, letnik 25, št. 2, str. 132-139.
- [8] ASTM D6813-02a: Standard Guide for Performance Evaluation of Hydraulic Fluids for Piston Pumps.
- [9] Conduct Test-to-Failure on Hydraulic Pumps, Vickers AA 65560-ISC-4, NTIS No. AD 60224, 1964.
- [10] Knight, G. C.: Experience with the Testing and Application of Fire-Resistant Fluids in the National Coal Boards, Transactions SAE 1981, 90, str. 2958-2969.
- [11] Wanke, T.: A Comparative Study of Accelerated Life Test Methods on Hydraulic Fluid Power Gear Pumps, Proceedings of 37th National Conference Fluid Power, National Fluid Power Association, Milwaukee, 1985, Vol. 35, str. 231-243.
- [12] Janko, K.: A Practical Investigation of Wear in Piston Pump Operated with HFA Fluids with Different Additive, Journal of Synthetic Lu-

- brication, 1987, 4, str. 99–114.
- [13] Ohkawa, A. et. all.: Oxidation and Corrosion Characteristics of Vegetable-Base Biodegradable Hydraulic Oils, SAE Technical Paper Series, Paper No. 951038, 1995.
- [14] Totten, G. E., Melief, M. H., Bishop, J. R.: Hydraulic Fluid Qualification Using the Rexroth High-Pressure Piston Pump Test, International Exposition for Power Transmission and Technical Conference, april, 2000, I00-9.2; str. 241–248.
- [15] Korane, K.: Hydraulic fluid test matches real-world conditions, Sealing&Contamination Tips, 12-2016, <https://www.sealingandcontaminationtips.com/hydraulic-fluid-test-matches-real-world-conditions/>.
- [16] Tič, V., Lovrec, D.: Test device and automated test procedures for measuring valve characteristics, Conference proceedings, International Conference Fluid Power 2019. 1st ed. Maribor: University of Maribor Press, Faculty of Mechanical Engineering. 2019, str. 145–158.

## Tribological tests with hydraulic pumps at variable load

### Abstract:

In the field of hydraulic pump based tribological tests, there are a few different tests that are designated to reproduce real operating conditions. The aim of all these tests is to determine the wear of hydraulic pump and its vital parts using the hydraulic fluid tested. Such tests involve the use of different types and sizes of pumps, varying amounts of hydraulic fluid tested and different operating conditions, as well as different pump loads and load profiles.

The paper outlines tribological tests with different hydraulic pumps, where the pump load is variable, realized in different ways. The following section presents our own approach to testing the tribological properties of a hydraulic fluid with gear pump, together with other components of the hydraulic system, where load variation is achieved by means of a valve-controlled linear load unit.

### Keywords:

hydraulic fluids, lubricating properties, pump tests, test parameters, variable load, load profile

# MOTOMAN HC10

## 6-osni-kolaborativni robot

Motoman HC10 je 6-osni kolaborativni robot z nosilnostjo 10kg in polmer dosega R=1200mm. HC10 predstavlja novo generacijo robotov, ki so zmogljivi, cenovno dostopni, vsestransko uporabni, preprosti za uporabo in izdelani za integracijo v industrijske procese. Roboti so namenjeni uporabnikom, ki iščejo preprosto in hitro avtomatizacijo nalog, ki jih industrijski roboti opravljajo v bližini ljudi v sodelujočem načinu delovanja.

**Varno sobivanje z uporabniki**  
**Varnostni krmilnik FSU: Functional Safety Unit**  
**Tehnologija PFL Power and Force Limiting**  
**Aplikacija EasyTeach – natančno ročno vodeno učenje in programiranje robota**

**Brez varnostne ograje**

- Vgrajena funkcija kontrole sile ob dotiku na vseh šestih robotskih oseh
- Gibljivi deli robota so oblikovani tako, da preprečujejo možnost poškodb
- Varnostni standard – aplikacija za industrijske robote: ISO 10218–1 (5.10.5 Power and Force limiting)
- Varnostne funkcije za krmilnike industrijskih robotov: ISO 13849–1, PLd, CAT3
- Tehnična specifikacija za delovanje kolaborativnih robotov: TS15066

**Enostavno programiranje**

- Neposredno premikanje robotske roke s pomočjo ročnega vođenja
- Pametni vmesnik (Smart HUB) za programiranje po principu »enostavnega učenja«



YASKAWA



Boniteta odličnosti  
2017

A Bionode Solution

Krmiljen z  
**YRC1000**