

Pomembnost uporabe naprednih lastnosti tekočin v tokovnih simulacijah hidrostatičnih strojev - 1. del

Anže Čelik

Izvleček:

Hidrostatični stroji so naprave, ki prenašajo energijo s pomočjo tlaka tekočine, najpogosteje olja ali vode. Delujejo na principu hidrostatike (Pascalov zakon).

Simulacija takšnih strojev še vedno zahteva visoko usposobljene inženirje, uporabo naprednih simulacijskih orodij in napreden simulacijski pristop kljub razpoložljivosti sodobnih simulacijskih orodij z dobro prilagojenim grafičnim uporabniškim vmesnikom in numeričnimi tehnikami.

Prispevek predstavlja dejavnosti in napredek pri simulaciji aksialne batne črpalke. Čeprav te stroje podjetje Poclain načrtuje in proizvaja že desetletja, še vedno obstajajo področja, ki niso podrobno raziskana.

Napredek pri simulaciji se nanaša predvsem na uporabo zapletenega kinematičnega gibanja strojnih delov, naprednih fizikalnih lastnosti tekočin in tudi tehnik mreženja ter numeričnih algoritmov.

V tem članku se osredotočeno na modeliranje naprednih lastnosti tekočin (stisljivost, kavitacija). Numerični pristop je izveden s pomočjo računalniške dinamike tekočin (CFD) v okolju Siemens Simcenter Star-CCM+. Napovedovanje kavitacije je možno z implementacijo obstoječega »polnega modela kavitacije«.

Ključne besede:

hidravlični radialni batni motor, hidravlična aksialna batna črpalka, CFD-simulacija, kavitacija, batna komora, nagibna plošča

1 Uvod

Hidrostatični stroji prenašajo energijo s pomočjo tlaka tekočine, najpogosteje olja ali vode (pri čemer tekočina miruje ali pa se premika relativno počasi). Delujejo na principu hidrostatike, kjer se največkrat predpostavlja nestisljivost tekočine, zato lahko takšen stroj učinkovito (tj. brez večjih izgub) pretvarja hidravlično energijo v mehansko energijo.

Hidrostatični stroji temeljijo na Pascalovem zakonu: tlak, ki deluje na tekočino v zaprtem sistemu, se prenaša enakomerno v vse smeri. To pomeni, da se lahko z majhno silo na manjši površini ustvari velika sila na večji površini.

Tipični predstavniki hidrostatičnih naprav so hidravlična črpalka (slika 1 – levo), hidravlični motor, hidravlični cilinder, hidravlična stiskalnica, zavorni sistem v avtomobilu idr.



1

Mag. Anže Čelik, univ. dipl. inž., Poclain Hydraulics d. o. o., Žiri, Slovenija



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

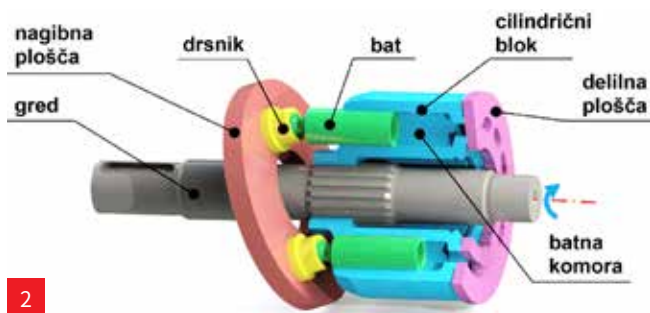
<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-2.22>

Primer hidrostatične naprave (levo – hidravlična črpalka) in hidrodinamične naprave (desno – vodna turbina) [1 Vir: Poclain]

Za primerjavo: *hidrodinamični stroji* so naprave, ki prenašajo energijo med tekočino (najpogosteje vodo ali oljem) in mehanskimi deli – običajno z vrtenjem. Temeljijo na gibanju tekočine in spremembi njenega impulza ali hitrosti. Tipični predstavniki hidrodinamičnih naprav so vodne turbine (*slika 1* – desno), hidrodinamične črpalke, hidrodinamične sklopke idr.

1.1 Aksialna batna črpalka

Aksialna batna črpalka je vrsta hidrostatičnega stroja, ki uporablja niz batov, razporejenih v obodni smeri znotraj cilindričnega bloka (ali rotorja, *slika 2*). Ti bati se premikajo v smeri, vzporedni z osjo vrtenja cilindričnega bloka. Aksialna batna črpalka obstaja kot črpalka s konstantno (konstantnim pretokom) ali s spremenljivo iztisinino (naklonski kot nagibne plošče se lahko spreminja, s čimer se spreminja gib batov in s tem prilagaja pretok).

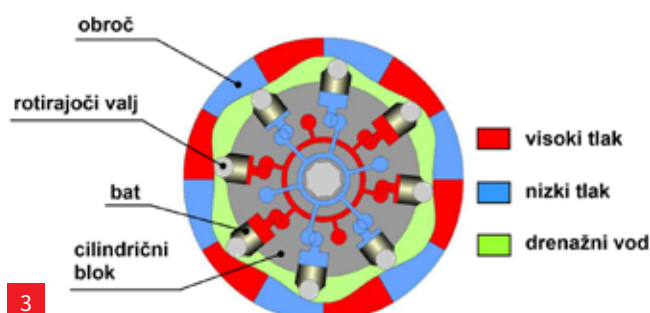


Rotirajoči sestavni deli aksialne batne črpalke [4]

1.2 Hidravlični radialni batni motor

Hidravlični radialni batni motor (*slika 3*) je vrsta hidrostatičnega stroja, ki pretvarja energijo tekočine pod tlakom (hidravlično energijo) v vrtenje (mehansko energijo). Deluje podobno kot radialni batni motor z notranjim zgorevanjem, le da namesto eksplozije goriva bate poganja hidravlično olje pod tlakom.

Naprava je sestavljena iz batov, ki so razporejeni krožno (radialno) okrog rotirajoče osi, cilindričnega bloka (ali rotorja), ohišja, obroča s posebno obliko drsne površine (angl. *cam*), ležajne enote, gredi in usmerjevalnika toka (angl. *valving*) [7].



Sestavni deli radialnega batnega motorja [7 Vir: Poclain]

2 Fizikalne lastnosti tekočine

Hidrostatični stroji so kompleksni izdelki – ne le z vidika komponent, temveč tudi z vidika fizike. V takšnih strojih se pojavlja več različnih fizikalnih pojavov: od mehanike trdnih snovi (npr. napetosti v materialu, tribologija, trdota in trdnost materialov ...) do mehanike tekočin (npr. lastnosti tekočin, turbulenca, kavitacija ...) in drugih.

Vključevanje teh pojavov v fizikalne modele pomeni združiti znanje z različnih fizikalnih področij.

Za potrebe te raziskave je v nadaljevanju predstavljen eden od zahtevnejših fizikalnih pojavov – pojav kavitacije.

2.1 Splošno o kavitaciji

Kavitacija je pojav, pri katerem se v tekočini (npr. v vodi) zaradi padca tlaka začnejo tvoriti majhni mehurčki pare ali plina. Ko se tlak ponovno poveča, se mehurčki nenadoma sesedejo (kolapsirajo oz. implodirajo), pri čemer se sprosti veliko energije (*slika 4*) [6].

Ključna ideja: kavitacija ni posledica temperature, ampak tlaka.



Kavitacija kot posledica lokalnega znižanja tlaka [9]

Obstajata dve glavni vrsti (hidrodinamične) kavitacije: parna in plinska. Parna kavitacija je proces, pri katerem mehurček raste zaradi pretvarjanja tekočine v paro; ta pojav nastopi, ko lokalni tlak pade pod uparjalni tlak tekočine.

Plinska kavitacija pa je difuzijski proces, ki nastopi, kadar lokalni tlak pade pod nasičeni tlak nekondenzirajočega plina, raztopljenega v tekočini.

Fizikalni model kavitacijskega mehurčka

Tipični fizikalni model za posamezen (kavitacijski) mehurček je prikazan na *sliki 5*.



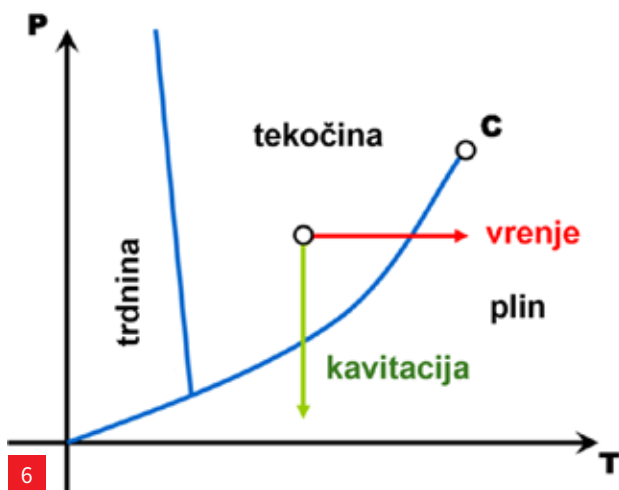
Kolaps posameznega kavitacijskega mehurčka [14]

V večini primerov je kavitacija nezaželen pojav, saj povzroča znatno poslabšanje zmogljivosti (npr. zmanjšuje masni pretok, znižuje efektivno sesalno višino v črpalkah, povzroča asimetrijo obremenitev, vibracije in hrup). Kavitacija povzroča tudi fizične/mehanske poškodbe naprave zaradi udarcev mehurčkov ob površine (skrajno desna faza na *sliki 5*), kar lahko sčasoma vpliva na (ne)uporabnost naprave ali stroja.

Kavitacija je zelo kompleksen pojav in njegove podrobnosti so še vedno predmet intenzivnih raziskav. V zadnjem desetletju je bil dosežen velik napredek pri razumevanju kolapsa posameznega kavitacijskega mehurčka (predvsem zaradi naprednih in poglobljenih vizualnih preiskav) [10], [11], [12], [13].

2.2 Razlika med vrenjem in kavitacijo

Vrenje je fazni prehod pri konstantnem tlaku in spremenljivi temperaturi; kavitacija pa je nasprotno fazni prehod pri konstantni temperaturi in spremenljivem tlaku (*slika 6*).



Razlika med vrenjem in kavitacijo (Vir: Poclair)

V osnovi sta tako kavitacija kot vrenje procesa izparevanja in kondenzacije med tekočo in plinasto fazo. Vendar pa so mehanizmi, ki sprožijo fazne spremembe, različni. Kavitacija je pretežno posledica mehanskih učinkov, torej nenadnih sprememb tlaka v tekočinskih sistemih. Vrenje pa je posledica toplotnih učinkov, ki zvišajo tlak uparjanja tekočine nad njen lokalni okoliški tlak, kar povzroči prehod iz tekoče v plinasto fazo [5].

3 Zaključek

Hidrostatični stroji se široko uporabljajo na različnih inženirskih področjih. Takšni stroji pogosto delujejo v zahtevnem okolju in ekstremnih pogojih. Podrobno razumevanje njihovega delovanja je ključno za ustrezno (robustno) načrtovanje, napoved življenjske dobe in nenazadnje za zadovoljstvo uporabnikov.

Načrtovanje, podprto s simulacijami, lahko bistveno skrajša razvojni cikel (zmanjša število iteracij), zmanjša potrebo po

eksperimentalnih raziskavah in pospeši čas prihoda na trg. Vendar pa simulacije takšnih strojev zahtevajo napredno znanje numeričnega modeliranja. Čeprav so ti stroji na trgu že desetletja, še vedno obstaja pomanjkanje njihovega poglobljenega razumevanja.

V nadaljevanju te študije (prispevek v naslednji številki te revije) bo uporabljen numerični pristop s pomočjo računske dinamike tekočin (CFD) v okolju Siemens Simcenter Star-CCM+. Kavitacija bo vključena v programsko kodo z namenom ocene potencialnih območij kavitacije.

Viri in literatura

- [1] Have.com: Displacement machine (displacement unit). Dostopano 20. 3. 2026, <https://www.hawe.com/fluid-lexicon/displacement-machine-displacement-unit/>.
- [2] Have.com: Positive displacement principle. Dostopano 16. 3. 2026, <https://www.hawe.com/fluid-lexicon/positive-displacement-principle/>.
- [3] Slideshare: Positive displacement machines. Dostopano 16. 3. 2026, <https://www.slideshare.net/slideshow/positive-displacement-machines/54614510#1>.
- [4] Researchgate.net: Typical structure of axial piston pump. Dostopano 18. 3. 2026, https://www.researchgate.net/figure/Typical-structure-of-axial-piston-pump_fig1_333125657.
- [5] Ptc.com: Physics of cavitation. Dostopano 17. 3. 2026, https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r11.0/usascii/index.html#page/simulate/cfd/Physics_5.html#.
- [6] Ptc.com: Cavitation-Introduction. Dostopano 20. 3. 2026, https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r11.0/usascii/index.html#page/simulate/cfd/Introduction_7.html#.
- [7] Youtube: Poclair Hydraulics Motor Technology. Dostopano 19. 3. 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=G5qd-HxNuNM>.
- [8] ChatGPT: različne poizvedbe. Dostopano 20. 3. 2026, <https://chatgpt.com/>.
- [9] Tribonet.org: Cavitation: 2026 Key Advantages for Mass Transfer and Surface Treatment. Dostopano 16. 3. 2026, <https://www.tribonet.org/wiki/cavitation/>.
- [10] Arnes.si: Kavitacija – pot od njenega preprečevanja do njene uporabe za uničevanje virusov in bakterij. Dostopano 16. 3. 2026, <https://video.arnes.si/watch/h2ps9y5mjfh5>.
- [11] Youtube: Webinar #7: Prof. dr. Matevž Dular – Cavitation – the phenomenon of bubbles. Dostopano 23. 3. 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=umYNj6BCszs>.
- [12] Youtube: Cavitation: let's tame the destructive power of bubbles, Matevž Dular, TEDxLjubljana. Dostopano 16. 3. 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=sH5uTW0sc2U>.
- [13] Youtube: What is micro dieseling? Is it the same as cavitation?. Dostopano 20. 3. 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=V9l6eV3Rs9g>.
- [14] Dynamox.net: Cavitation in industrial pumps: understand this phenomenon. Dostopano 20. 3. 2026, <https://dynamox.net/en/blog/cavitation-in-industrial-pumps-understand-this-phenomenon>.

Development of Energy-Consumption Digital Twins for a Discrete Production Lines

Abstract:

Hydrostatic machines are devices that transfer power using pressurized hydraulic fluid within a closed circuit, relying on positive displacement pumps and motors. They convert mechanical energy into fluid pressure and back into mechanical torque. Simulation of such machines still requires highly skilled engineers, use of advanced simulation tools and advanced simulation approach ... despite the availability of modern simulation tools with well suited graphical user interface (GUI) and numerical techniques.

The paper presents recent activities and progress on simulation of hydrostatic machines – in particular, the axial piston pump and the radial hydraulic motor. Despite that these machines have been designed and produced by Poclair for decades, there are still (design) features and phenomena not being investigated in detail or never being simulated.

The simulation advancements mainly refer to the application of complicated kinematic motion, fluid properties, physics to consider as well as mesh and numerical algorithm techniques. In this paper, the focus is given on modelling of advanced fluid properties (e.g. compressibility, cavitation etc.). Fluid with such advanced properties is used in fluid flow simulation.

Numerical approach has been performed by means of computational fluid dynamic (CFD) within the environment of Siemens Simcenter Star-CCM+. The anticipation of cavitation has been possible by implementation of existing »full cavitation model«.

Keywords:

radial hydraulic motor, axial piston pump, CFD simulation, cavitation, piston chamber, swash plate

POSVET

AVTOMATIZACIJA STREGE IN MONTAŽE 2026 - ASM '26

03. decembra 2026
na Gospodarski zbornici Slovenije v Ljubljani



SCAN ME

aktualne novice o posvetu so na voljo na www.posvet-asm.si

POLETNI RAZISKOVALNI TABOR ZA DIJAKE



FS
UNIVERZA
V LJUBLJANI | Fakulteta
za strojništvo



RAZISKUJ IN POGANJAJ PRIHODNOST

29. JUNIJ - 3. JULIJ 2026

