

Pomembnost uporabe naprednih lastnosti tekočin v tokovnih simulacijah hidrostatičnih strojev - 2. 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 kljub razpoložljivosti sodobnih simulacijskih orodij z dobro prilagojenim grafičnim uporabniškim vmesnikom in numeričnimi tehnikami še vedno zahteva visoko usposobljene inženirje, uporabo naprednih simulacijskih orodij in napreden simulacijski pristop.

Prispevek se osredotoča 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«. Rezultati za aksialno batno črpalko se dobro ujemajo z eksperimentalnimi raziskavami (npr. tlak v batni komori, moment nagibne plošče itd.).

Ključne besede:

hidravlična aksialna batna črpalka, CFD-simulacija, kavitacija, batna komora, nagibna plošča

1 Tehnike numeričnega modeliranja

Poznavanje in razumevanje fizikalnega dogajanja sta prva in ključna koraka. Naslednji zahteven korak pa je vpeljava fizikalnih zakonitosti v numerično kodo. Vsakega fizikalnega modela ni mogoče učinkovito zapisati v programsko kodo oziroma je za to potrebnega veliko znanja iz programiranja. V nadaljevanju sta na kratko predstavljena implementirani fizikalni model kavitacije in tehnike mreženja (oz. diskretizacije).

1.1 Matematični model kavitacije

Za potrebe te raziskave je vpeljava naprednih lastnosti tekočin bistvenega pomena. V številnih znanstvenih člankih in publikacijah so na voljo različni matematični modeli, vendar so le nekateri primerni za tridimenzionalne tokovne analize (primer [2]) zaradi pomanjkanja numerične robustnosti, stabilnosti in zmožljivosti.

V nadaljevanju je na kratko predstavljen t. i. »celostni kavitacijski model« (angl. *full cavitation model*) po Singhalu s sod. [1], ki je bil implementiran v programsko kodo znotraj programskega paketa Siemens Simcenter Star-CCM+.

Osnovni pristop temelji na uporabi standardnih enačb viskoznega toka (Navier–Stokesove enačbe) za spremenljivo gostoto tekočine ter na uporabi konvencionalnega turbulentnega modela (npr. k-ε model). Gostota tekočine je funkcija masnega deleža pare »f«, ki se izračuna z reševanjem transportne enačbe (1), povezane z ohranitvijo mase in gibalne količine.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} f) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f) + R_e - R_c \quad (1)$$

Izvorna člena R_e in R_c v enačbi (1) predstavljata stopnjo nastajanja pare (izparevanje) in kondenzacije ter sta lahko funkciji tokovnih parametrov (tlak, karakteristična hitrost toka) in lastnosti tekočine (gostota tekoče in parne faze, nasičeni tlak ter površinska napetost na meji tekočina-para).

Zgornja formulacija uporablja homogen pristop toka, zato ne upošteva dvofaznega toka. Glavni poudarek je na pravilnem opisu rasti in sesedanja (kolapsa) mehurčkov. V tekočem toku brez relativnega zdrsa hitrosti med tekočino in mehurčki je enačba dinamike mehurčka izpeljana iz posplošene Rayleigh–Plessetove enačbe [1].

$$\mathfrak{R}_B \frac{D^2 \mathfrak{R}_B}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{D \mathfrak{R}_B}{Dt} \right)^2 = \left(\frac{P_B - P}{\rho_l} \right) - \frac{4 v_l}{\mathfrak{R}_B} \dot{\mathfrak{R}}_B - \frac{2 S}{\rho_l \mathfrak{R}_B} \quad (2)$$

Enačba (2) podaja fizikalni pristop za vključitev učinkov dinamike mehurčkov v kavitacijski model. Pravzaprav se lahko obravnava kot enačba za napovedovanje gostote zmesi.

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



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-3.26>

Delovni medij je obravnavan kot mešanica tekočine, njenega parnega dela in nekondenzirajočega plina (NCG). Izračun gostote zmesi je definiran sledeče:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1-f_v-f_g}{\rho_l} \quad (3)$$

kjer $\rho_g, \rho_v, \rho_l, \rho_p, \rho_s, f_g$ predstavljajo gostoto nekondenzirajočega plina (NCG), gostoto pare, gostoto tekočine, masni delež pare in masni delež nekondenzirajočega plina.

Glavni neznanki sta ρ_{vap} (nasičeni tlak pare) in f_g . Njuna sprememba je odvisna od vrste tekočine in njene kakovosti ter je lahko precejšnja [2].

Model je v osnovi validiran na več različnih primerih. Poleg tega ima ta kavitacijski model naslednje značilnosti:

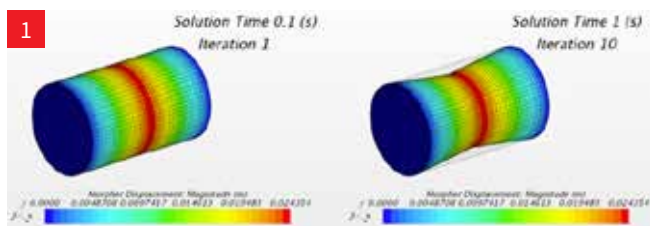
- ▶ uporaben je za poljuben geometrijski sistem (3D, 2D ravninski ali 2D osno simetrični), podprti so vsi tipi mrež in meje med posameznimi območji (*angl. interfaces*),
- ▶ sočasna uporaba turbulentnih modelov, deformacije mreže in/ali strukturnih modulov je v celoti podprta,
- ▶ tok je obravnavan kot izotermen, lastnosti tekočine pa so pri dani temperaturi konstantne v celotnem tokovnem območju,
- ▶ masni delež nekondenzirajočega plina (f_g) je predpostavljen kot konstanten v celotnem tokovnem polju.

1.2 Tehnike mreženja

Številne simulacije, ki vključujejo gibanje ali spremembe geometrije, zahtevajo (togo) premikanje mreže ali pa njeno deformacijo. Obstajajo različne metode deformacije mreže (z različno terminologijo), kot so npr. prekrivna mreža (*angl. overset mesh*), relativni pomik vozlišč (*angl. morphing*), adaptivno zgoščevanje mreže (*angl. adaptive mesh refinement*), splošno ponovno mreženje (*angl. remeshing*) itd.

Metoda relativnega pomika vozlišč (*angl. morphing*) omogoča upoštevanje vpliva gibajočih se robnih pogojev v dinamičnih (tj. nestacionarnih) simulacijah. Metodo je možno uporabiti za simulacijo recipročnega gibanja bata v cilindru – kjer se meje sicer ne spreminjajo po obliki, vendar pa se morajo vozlišča mreže prilagajati (tj. relativno pomikati) gibanju (*slika 1*). [3]

Metoda relativnega pomika vozlišč (*angl. morphing*) v programskem paketu Siemens Simcenter Star-CCM+ prerazporeja vozlišča mreže kot odziv na gibanje nabora kontrolnih točk, ki



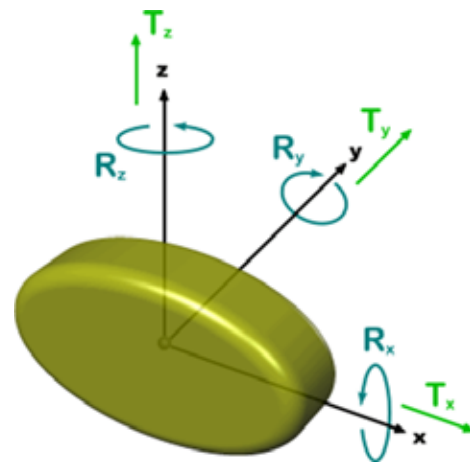
Cylinder z zožitvijo stene v osrednjem delu (Vir: [3])

se lahko obravnavajo kot oblak točk, postavljenih nad območje mreže.

Premik posamezne točke je mogoče določiti neposredno ali pa ga izračunati na podlagi podane hitrosti vozlišč, iz katerih se za določen časovni korak izračuna ustrezen pomik.

1.3 Gibanje togega telesa

Gibanje togega telesa omogoča modeliranje gibanja kot odziv na delujoče sile in momente. Pri togem telesu se medsebojne razdalje med notranjimi točkami ne spreminjajo. Zato zadoštuje reševanje enačbe gibanja težišča togega telesa (*slika 2*).



2

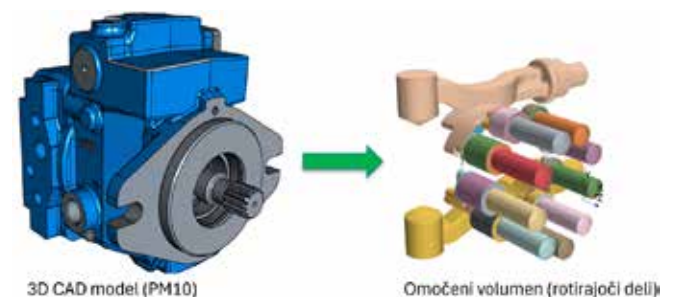
Gibanje togega telesa v 3D-prostoru (6 prostostnih stopenj) (Vir: [3])

2 3D numerični model aksialne batne črpalke

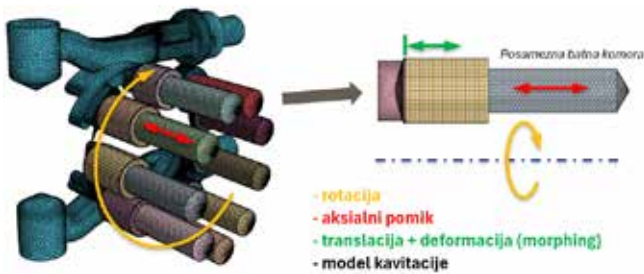
Raziskava se nanaša na analizo toka v črpalčki z oznako PM10. Cilj te analize je ovrednotiti tlačno polje v batni komori za celotni model črpalke (tj. uporabljeni so vsi bati). 3D-prikaz črpalke PM10 je prikazan na *sliki 3*.

3D CFD-model upošteva nestacionarne pogoje, pomikanje mreže, k-ε turbulentni model, transportne enačbe pasivne skalarne količine ter uporabniško definirane enačbe stanja (stisljivost).

3



3D CAD-model (levo) in omočeni volumen (desno) (Vir: Poclair)



4 Zamrežen model omočenega volumna (Vir: Poclairn)

Volumen tekočine je bil v osnovi zamrežen s poliedri (celice), na območjih s spremenljivim volumnom so bili uporabljeni kvadri, na plasteh ob mejah pa prizmatični elementi. Kontaktna oziroma mejna območja so bila zamrežena s skladno (tj. konformno) mrežo. Celoten 3D zamrežen model volumna tekočine (vrteča se skupina ter vstopne/izstopne komore) je prikazan na sliki 4.

Slika 5 prikazuje normirane hitrosti batov, uporabljene kot robni pogoj. Krivulje so bile pridobljene z uporabo parametričnega CFD-modela, ki temelji na enačbah kinematike.

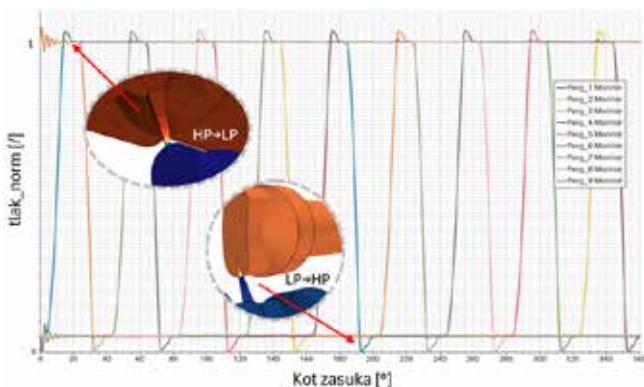
3 Rezultati in diskusija

Simulacija je bila definirana za en poln obrat oz. zasuk (2π rad). Med vrtenjem je bilo opazovanih več različnih fizikalnih veličin.

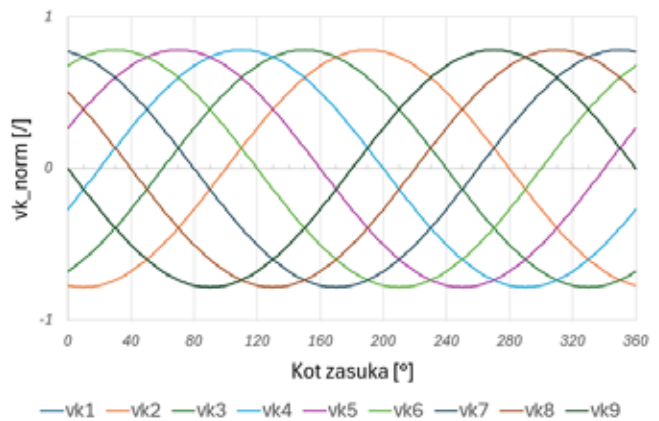
3.1 Tlak v batni komori

Tlak v batni komori (slika 6) je neposredna posledica predpisane hitrosti bata. Med enim obratom rotirajoče skupine je mogoče opaziti značilen potek tlaka. V začetnem delu se pojavijo določene nestabilnosti (tj. oscilacije) zaradi pričetka simulacije. Nato pa je vsak tlačni vrh (v smislu podtlaka ali nadtlaka) posledica prehoda oziroma stika z visokotlačnimi (HP) ali nizkotlačnimi (LP) komorami.

Sila tlaka na bat (v aksialni smeri) je integral tlaka po površini bata. Pripadajoče krivulje sil imajo enako obliko kot krivulje tlaka, zato na tem mestu niso prikazane.



6 Normirani povprečni tlak v batni komori (Vir: Poclairn)



5 Predpisane hitrosti batov (robni pogoj) (Vir: Poclairn)

3.2 Nagibni moment

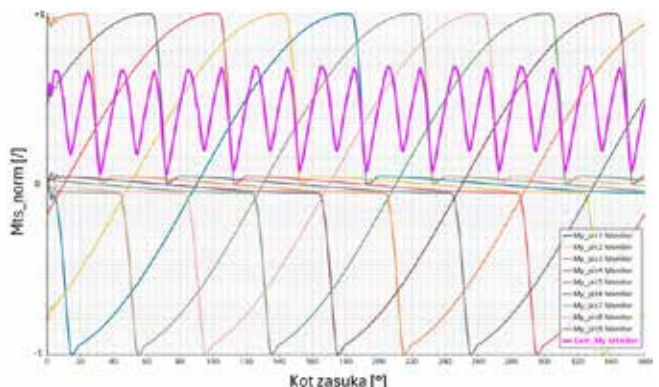
Nagibni moment bata (M_{ts}) je prikazan na sliki 7. Opazjuoč krivuljo za bat št. 1, je v prvem delu vrtenja M_{ts} negativen. To je posledica dejstva, ker je batna komora št. 1 pod visokim tlakom (HP) in generirani moment teži k vrtenju nagibne plošče v negativni smeri. Nasprotno velja, ko je komora pod nizkim tlakom (LP).

Vijolična krivulja na sliki 7 prikazuje vsoto vseh nagibnih momentov (prispevki vseh batnih komor). Opaziti je mogoče dejstvo, da rezultirajoči nagibni moment ni konstanten in se med enim obratom znatno spreminja.

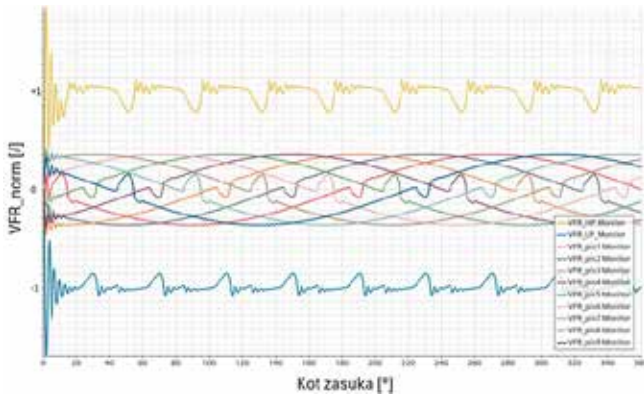
3.3 Volumenski pretok

Volumenski pretok bata (VFR) je prikazan na sliki 8. Najvišja in najnižja krivulja predstavljata skupni pretok na vstopnih in izstopnih odprtinah. Skupna pretoka nista konstantna in se med obratom spreminjata.

Poleg tega se pri pretoku posameznega bata pojavita dva lokalna porasta oziroma padca pretoka (z zamikom za π rad), kar je posledica vzpostavitve kontakta z območjem visokega (HP) oziroma nizkega tlaka (LP) ali obratno.



7 Normirani nagibni moment bata (M_{ts}) (Vir: Poclairn)



8 Normirani volumenski pretok (VFR) (Vir: Poclairn)

4 Zaključek

Študija uporablja numerični pristop s pomočjo računske dinamike tekočin (CFD) v okolju Siemens Simcenter Star-CCM+. Kavitacija je bila vključena v programsko kodo z namenom ocene potencialnih območij kavitacije.

Rezultati analize (npr. tlak v batni komori, nagibni moment na

nagibni plošči itd.) omogočajo boljše razumevanje ključnih funkcionalnosti teh strojev ter hkrati služijo kot smernice za načrtovanje.

Razvit numerični model odpira možnosti za nadaljnje izboljšave, poglobljene raziskave aksialnih batnih črpalk ter njegovo uporabo tudi pri drugih tipih strojev s pozitivnim izpodrivom (npr. pri radialnih batnih hidravličnih motorjih), ki jih proizvaja podjetje Poclairn.

Viri in literatura

- [1] Asme.org: Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. Dostopano 20. 3. 2026, <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-abstract/124/3/617/444321/Mathematical-Basis-and-Validation-of-the-Full>.
- [2] Tandfonline.com: A Numerical Approach for the Evaluation of the Effects of Air Release and Vapour Cavitation on Effective Flow Rate of Axial Piston Machines. Dostopano 16. 3. 2026, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14399776.2010.10780996>.
- [3] Siemens: Simcenter STAR-CCM+ 2506 dokumentacija. Dostopano 21. 5. 2026.

The importance to consider advanced fluid properties in flow simulation of hydrostatic machines (Part 2)

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.

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". Results for axial piston pump show good agreement with experimental investigation (e.g. for piston chamber pressure, tilting moment on a swash plate etc.).

Keywords:

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

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



SCAN ME