Hidravlični akumulatorji v praksi – izbira, preračun in vgradnja

Tadej Tašner

Izvleček:
Hidravlični akumulatorji predstavljajo ključne komponente hidravličnih sistemov, saj omogočajo akumulacijo hidravlične energije, stabilizacijo tlaka, kompenzacijo volumenskih sprememb ter izravnavo dinamičnih obremenitev. Njihova funkcionalnost in učinkovitost sta v veliki meri odvisni od pravilne izbire tipa akumulatorja, ustreznega dimenzioniranja ter optimalne integracije v hidravlični tokokrog. Prispevek obravnava temeljna načela načrtovanja in uporabe hidravličnih akumulatorjev s poudarkom na kriterijih izbire, določanju tlaka predpolnjenja, dimenzioniranju glede na funkcionalne zahteve ter zagotavljanju skladnosti z varnostnimi zahtevami.

Predstavljeni so pristopi za integracijo akumulatorjev v hidravlične sisteme z namenom učinkovitega shranjevanja energije, zmanjševanja koničnih obremenitev, blaženja tlačnih pulzacij in udarov ter izboljšanja dinamičnega odziva sistema. Posebna pozornost je namenjena čim boljšemu izkoristku uporabnega volumna akumulatorja ter preprečevanju najpogostejših napak pri projektiranju, kot so prekoračitev dopustnega kompresijskega razmerja, neustrezna združljivost materialov s hidravličnim medijem in obratovalnimi temperaturami ter neupoštevanje omejitev življenjske dobe akumulatorja.

Z uporabo termodinamičnih modelov in praktičnih primerov uporabe prispevek prikazuje vpliv ustrezno izbranih in dimenzioniranih akumulatorjev na energijsko učinkovitost, zanesljivost in obratovalno varnost hidravličnih sistemov. Predstavljene ugotovitve podajajo praktične smernice za načrtovanje hidravličnih sistemov, v katerih akumulator ni obravnavan zgolj kot pomožna komponenta, temveč kot aktivni element za optimizacijo zmogljivosti in funkcionalnosti celotnega sistema.

Ključne besede:
hidravlični akumulatorji, shranjevanje energije, stabilizacija tlaka, izravnavanje obremenitev, integracija v tokokroge, kriteriji izbire, dimenzioniranje, tlak predpolnjenja, funkcionalna varnost, inženirske smernice

1 Uvod

Hidravlični akumulatorji so nepogrešljive komponente sodobnih hidravličnih sistemov, saj delujejo kot naprave za shranjevanje energije, ki izboljšujejo učinkovitost, stabilnost in odzivnost sistema. Po funkciji so primerljivi z električnimi kondenzatorji, saj energijo shranjujejo v obliki tlačno obremenjenega hidravličnega medija, ki se lahko po potrebi sprosti za dopolnitev pretoka črpalke, blaženje tlačnih nihanj ali zagotavljanje zasilnega napajanja v primeru odpovedi sistema. Njihova vgradnja v hidravlične tokokroge omogoča boljše dinamične lastnosti sistema, manjšo porabo energije in daljšo življenjsko dobo komponent, zlasti pri aplikacijah s cikličnimi obremenitvami ali prehodnimi tlačnimi sunki. [1]

Najpogosteje uporabljena vrsta akumulatorjev v industrijskih in mobilnih aplikacijah je plinsko polnjen oziroma hidro-pnevmatski akumulator. Ta uporablja stisljiv plin, običajno dušik, kot vzmetni medij, ki ustvarja tlak na hidravlično tekočino. Termodinamično obnašanje plina, bodisi izotermno bodisi adiabatno, pomembno vpliva na sposobnost shranjevanja energije in odzivne značilnosti akumulatorja. [2] Natančno modeliranje tega obnašanja je bistveno za optimizacijo delovanja akumulatorjev, zlasti v okoljih z visokimi frekvencami ciklov ali visokimi tlaki. Poleg tega se akumulatorji vse pogosteje uporabljajo v sistemih za rekuperacijo energije, kot so hidravlični hibridi in sistemi obnovljivih virov energije, kjer njihova zmožnost učinkovitega shranjevanja in sproščanja energije igra ključno vlogo pri trajnostnem delovanju. [3]

Zaradi svoje vsestranske uporabnosti ostajajo hidravlični akumulatorji ključni elementi hidravlično-mehatronskih sistemov. Ta prispevek predstavlja hidravlične akumulatorje ter preverjene inženirske prakse za njihovo uporabo v najpogostejših hidravličnih aplikacijah. Obravnava temeljna načela delovanja različnih vrst akumulatorjev, kot so batni in membranski akumulatorji ter akumulatorji z mehom. Razlaga njihovo vlogo pri shranjevanju energije, regulaciji tlaka in absorpciji tlačnih udarov. Na podlagi v praksi preverjenih izvedb in industrijskih standardov izpostavlja dobre prakse pri izbiri, dimenzioniranju in integraciji akumulatorjev v hidravlične sisteme. Poseben poudarek je namenjen optimizaciji zanesljivosti sistema, izboljšanju energetske učinkovitosti in podaljšanju življenjske dobe komponent z ustrezno uporabo akumulatorjev. Predstavljeni primeri so namenjeni inženirjem in tehnikom, ki želijo izboljšati zmogljivost hidravličnih sistemov v mobilnih in industrijskih aplikacijah.

Dr. Tadej Tašner, univ. dipl. inž., HAWE Hidravlični sistemi d. o. o., Štore

© The Authors 2026. CC-BY 4.0
https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-5.33

2 Tipi hidravličnih akumulatorjev

Hidravlične akumulatorje glede na način obremenitve na splošno delimo v dve skupini: mehanske in plinske. Mehanski akumulatorji za ustvarjanje tlaka v hidravlični tekočini uporabljajo vzmeti ali uteži, medtem ko plinski akumulatorji uporabljajo stisnjen plin, običajno dušik, ki je od hidravličnega medija ločen z mehom, membrano ali batom. [1]

Akumulatorji z vzmetjo delujejo tako, da se vzmet stisne, ko tekočina vstopa v komoro. Tako shranjena mehanska energija se sprosti, ko sistem ponovno potrebuje tekočino. Zaradi kompaktne izvedbe in hitrega odziva so primerni za manjše aplikacije, vendar imajo pomanjkljivost, da je izhodni tlak odvisen od stopnje stisnjenosti vzmeti. Poleg tega omejen hod vzmeti zmanjšuje uporabno prostornino tekočine, zato niso primerni za sisteme z visokimi tlaki ali velikimi volumni. Akumulatorji z utežjo ohranjajo konstanten tlak skozi celoten hod, saj tekočino tlači utež določene mase. Zagotavljajo zelo dobro stabilnost tlaka in omogočajo shranjevanje velikih količin tekočine. Njihova slabost sta velika masa in dimenzija, zaradi česar niso primerni za mobilne aplikacije ter zahtevajo ustrezno nosilno konstrukcijo. [1]

Plinski akumulatorji se uporabljajo bistveno pogosteje zaradi svoje vsestranskosti in učinkovitosti. *Akumulatorji* z mehom (ang. bladder accumulators) uporabljajo elastični meh, ki ločuje plin od hidravličnega medija. So lahki, imajo zelo hiter odzivni čas in so posebej primerni za mobilne hidravlične sisteme. Njihove omejitve so: največji dovoljeni delovni tlak ter obraba meha zaradi utrujanja materiala ali kontaminacije. *Membranski akumulatorji* (ang. diaphragm accumulators) uporabljajo elastomerno membrano za ločevanje plina in tekočine. Primerni so za visokotlačne aplikacije ter imajo enostavno zasnovo z malo vzdrževanja. Njihova slabost je običajno manjša uporabna prostornina v primerjavi z akumulatorji z mehom. *Batni akumulatorji* (ang. piston accumulators) uporabljajo trden bat za ločevanje plina in tekočine. So robustni, primerni za visoke tlake in velike prostornine ter zagotavljajo dolgo življenjsko dobo. Omogočajo tudi natančno prilagajanje velikosti in konfiguracije. Njihovi pomanjkljivosti sta višja cena in zahtevnejše vzdrževanje. [1]

3 Hidravlično in električno shranjevanje energije

V primerjalni raziskavi, objavljeni v reviji *Energies*, je bilo ugotovljeno, da je specifična energija hidravličnega akumulatorja z mehom približno 9,4-krat manjša od specifične energije superkondenzatorja pri enakovrednih pogojih. Čeprav to poudarja omejitve hidravličnih sistemov pri kompaktnem shranjevanju energije, hkrati izpostavlja njihove prednosti glede gostote moči in stroškovne učinkovitosti, zlasti pri aplikacijah z velikimi silami in kratkotrajnimi obremenitvami. [4]

4 Osnovni preračun hidravličnih akumulatorjev

V nadaljevanju so predstavljeni osnovni izračuni za hidravlične akumulatorje, ki služijo kot pomoč uporabnikom pri določanju tlaka predpolnjenja, razpoložljive prostornine tekočine in ustrezne velikosti akumulatorjev za različne aplikacije. Pri izra-

Tabela 1 : *Primerjava različnih tipov hidravličnih akumulatorjev [1]*

SKUPINA	MEHANSKI		PLINSKI		
tip	z utežjo	z vzmetjo	z mehom	membranski	batni
maksimalni delovni tlak	nizek	nizek	srednji	visok	visok
izhodni tlak	konstanten	linearen	hiperboličen (izoterma) oz. strmejši (politropa/adiabata)		
izgube zaradi trenja	da	da	ne	ne	da
energijska gostota	-	0	+	0	+
kapaciteta	+	-	0	-	+
položaj vgradnje	navpičen	poljuben	poljuben	poljuben	poljuben
odzivni čas	počasen	srednji	hiter	hiter	srednji

Tabela 2 : *Primerjava energijske in močnostne gostote različnih sistemov za shranjevanje energije [4]*

	ENERGIJA			MOČ		
sistem za shranjevanje energije	volumetrična gostota [Wh/m^3]	specifična gostota [Wh/kg]	cena [US$/Wh]	volumetrična gostota [Wh/m^3]	specifična gostota [Wh/kg]	cena [US$/Wh]
$LiFePO_4$ baterija	195.144	115,2	0,45	325,24	0,192	270,83
superkondenzator	2.539,7	2,72	138,67	2.588	2,21	217
akumulator z mehom	1.227	0,29	404,68	7.548	2,69	75

čunih se uporabljajo naslednje spremenljivke:

p_0 ... tlak predpolnjenja plina [bar]
p_1 ... minimalni delovni tlak [bar]
p_2 ... maksimalni delovni tlak [bar]
V_0 ... delovni (efektivni) volumen plina (oz. volumen akumulatorja skupaj s plinskimi posodami) [l]
V_1 ... volumen plina pri tlaku p_1 [l]
V_2 ... volumen plina pri tlaku p_2 [l]
T_0 ... temperatura predpolnitve plina, običajno 20 °C [°C]
T_{min} ... minimalna delovna temperatura plina [°C]
T_{max} ... maksimalna delovna temperatura plina [°C]
n_c ... politropni eksponent med polnjenjem akumulatorja [-]
n_d ... politropni eksponent med praznjenjem akumulatorja [-]1

4.1 Delovne temperature plina

Ocena delovne temperature plina v akumulatorju je zahtevna naloga. Minimalna temperatura običajno ustreza najnižji temperaturi okolice, medtem ko je maksimalna temperatura običajno nekje med najvišjo temperaturo okolice in temperaturo hidravličnega medija. Na to vplivajo funkcija akumulatorja, njegova izvedba, temperatura okolice, temperatura olja ter količina izmenjane tekočine. Pri akumulatorjih, kjer je plin v stiku s svežim oljem skozi večino delovnega cikla (na primer pri akumulatorjih z mehom), oziroma pri uporabi za podporo črpalki, kjer se v akumulatorju izmenjujejo večje količine vroče tekočine, ima temperatura olja večji vpliv na temperaturo plina kot temperatura okolice.

Pri aplikacijah za blaženje tlačnih udarov in pulzacij je izmenjava volumna razmeroma majhna, zato je mogoče maksimalno temperaturo plina oceniti kot povprečje najvišje temperature olja in najvišje temperature okolice.

Pri aplikacijah za shranjevanje energije, kjer črpalka deluje izključno za polnjenje akumulatorja, se lahko kot največja temperatura plina uporabi pričakovana maksimalna temperatura okolice. Razlog je v tem, da olje vstopa v akumulator približno pri temperaturi okolice, zato ostaja tudi temperatura plina zelo blizu temperaturi okolice.

4.2 Tlak predpolnjenja

Tlak predpolnjenja se običajno nastavi na približno 90 % minimalnega delovnega tlaka sistema (pri aplikacijah za shranjevanje energije). Takšna nastavitev omogoča optimalno ravnovesje med količino sprejete tekočine in zmožnostjo praznjenja akumulatorja po potrebi. Če je tlak predpolnjenja previsok, tekočina ne more vstopati v akumulator. Če je prenizek, obstaja nevarnost popolnega stiskanja plinske komore, kar zmanjšuje življenjsko dobo in učinkovitost akumulatorja. Pravilna izbira tlaka predpolnjenja je ključnega pomena za ohranjanje stabilnosti tlaka in zagotavljanje zanesljivega delovanja hidravličnega sistema. Pri tem je treba paziti, da razmerje med največjim delovnim tlakom in tlakom predpolnjenja ne preseže dovoljenega kompresijskega razmerja akumulatorja, ki je podano v podatkovnem listu akumulatorja. Značilno kompresijsko razmerje za akumulatorje z mehom znaša 4:1, medtem ko lahko pri membranskih akumulatorjih doseže 8:1, pri batnih pa celo preseže 10:1.

Priporočene vrednosti tlaka predpolnjenja:

- Shranjevanje energije in podpora črpalki: 90 % minimalnega delovnega tlaka.
- Blaženje tlačnih udarov: 60-90 % povprečnega delovnega tlaka.
- Blaženje pulzacij: 60 % povprečnega delovnega tlaka.

Tlak predpolnjenja se vedno izračuna za najvišjo delovno temperaturo plina (glej prejšnje poglavje). Če za primer vzamemo aplikacijo za shranjevanje energije, lahko tlak predpolnjenja pri najvišji temperaturi izračunamo z enačbo (1), nato pa ga s pomočjo izohorne plinske enačbe za idealni plin pretvorimo v tlak predpolnjenja pri temperaturi 20 °C z enačbo (2). [5]

$$p_{0@T_{max}} = 0{,}9 \cdot p_1 \tag{1}$$

$$p_0 = p_{0@T_{max}} \frac{T_0+273}{T_{max}+273} \tag{2}$$

4.3 Izračun razpoložljive prostornine tekočine v akumulatorju

Ključni parameter pri shranjevanju energije je količina hidravličnega medija, shranjenega v akumulatorju. To količino lahko določimo s kombinacijo splošnih plinskih enačb za politropno stiskanje (kompresijo) med polnjenjem akumulatorja (3) in politropno ekspanzijo (dekompresijo) med praznjenjem akumulatorja (4), kar vodi do enačbe (5). [6]

$$p_0 V_0^{n_c} = p_2 V_2^{n_c} \tag{3}$$

$$p_2 V_2^{n_d} = p_1 V_1^{n_d} \tag{4}$$

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{n_c}} \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n_d}} - 1\right) \tag{5}$$

Politropni eksponent opisuje način prenosa toplote med stiskanjem oziroma raztezanjem plina. Njegova vrednost je odvisna od tega, koliko toplote se med procesom izmenja z okolico. [7]

- izotermni proces (počasen proces, > 3 min, s popolno izmenjavo toplote): $n = 1$
- adiabatni proces (hiter proces, < 1 min, brez izmenjave toplote): $n = \kappa = 1{,}4$ (za dvoatomne pline)
- politropni proces (delna izmenjava toplote): $1 < n < \kappa$

Primeri za različne procese:

- Shranjevanje energije (podpora črpalki): adiabatno polnjenje in adiabatno praznjenje.
- Zasilne in varnostne funkcije: izotermno polnjenje in adiabatno praznjenje.
- Kompenzacija puščanja in sprememb volumna zaradi temperaturnih nihanj: izotermno polnjenje in izotermno praznjenje.

Nekateri programi za dimenzioniranje akumulatorjev rezultate dodatno korigirajo z ustreznim korekcijskim faktorjem, da se bolj približajo dejanskemu obratovalnemu stanju. [8]

4.4 Izračun potrebne velikosti akumulatorja za blaženje pulzacij

Uporaba akumulatorjev kot blažilnikov pulzacij je posebej primerna za sisteme s konstantnim tlakom. Pri sistemih, kjer se delovni tlak nenehno spreminja izgubijo svojo učinkovitost, ker pri tlakih pod tlakom predpolnjenja akumulator ni v funkciji, njihova funkcija pa tudi ni optimalna pri tlakih, ki večkrat presegajo tlak predpolnjenja. Ker so v hidravličnih aplikacijah potrebni volumni za učinkovito blaženje pulzacij razmeroma majhni (običajno v območju nekaj decilitrov), je mogoče z uporabo membranskih akumulatorjev z visokim dovoljenim kompresijskim razmerjem, predpolnjenih na relativno nizek tlak, pokriti široko območje delovnih tlakov. Lahko se pa uporabi tudi več vzporedno vezanih akumulatorjev z različnimi tlaki predpolnjenja.

Za določitev potrebne velikosti akumulatorja za primer batno črpalko je treba poznati njen delovni tlak *p* in določiti največjo dovoljeno stopnjo pulzacij *α*[%]. Neenakomeren volumen tekočine, ki ga proizvaja črpalka in ga mora akumulator absorbirati, se lahko izračuna iz volumna bata V_p [l] in koeficienta tipa črpalke *K* [-] [8]. Ker gre za adiabatni proces, se za politropni eksponent uporabi vrednost n = 1,4. Če za blaženje pulzacij uporabimo priporočeni predpolnilni tlak v višini 60 % delovnega tlaka, lahko enačbo dodatno poenostavimo, kot prikazuje enačba (6).

$$V_0 = \frac{K \cdot V_p}{\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}} = \frac{K \cdot V_p}{\left(\frac{p_0}{p \cdot (1-\alpha)}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{p_0}{p \cdot (1+\alpha)}\right)^{\frac{1}{n}}} = \frac{K \cdot V_p}{\left(\frac{0{,}6}{(1-\alpha)}\right)^{\frac{1}{1{,}4}} - \left(\frac{0{,}6}{(1+\alpha)}\right)^{\frac{1}{1{,}4}}} \quad (6)$$

Pri blaženju pulzacij je zelo pomembno, da je akumulator nameščen čim bližje črpalki in priključen preko ustreznega T-kosa, ki usmerja pretok proti akumulatorju, da lahko le-ta učinkovito absorbira pulzacije, ki jih povzroča črpalka. Takšen poseben T-kos prikazuje *slika 1a*, njegovo pravilno vgradnjo pa *1b*. Vgradnja z navadnim T-kosom je prav tako mogoča in jo prikazuje *slika 1c*.

4.5 Izračun potrebne velikosti akumulatorja za absorpcijo tlačnih udarov

Absorpcija tlačnih udarov je potrebna v primerih, ko se velik pretok tekočine v dolgem cevovodu nenadoma ustavi, na primer ob hitrem zapiranju hidravličnega ventila. Zaradi vztrajnosti tekočine nastane tlačni udar, katerega energija se mora pretvoriti v notranjo energijo plina v akumulatorju (adiabatno stiskanje), da ostane povišanje tlaka v sistemu v območju, ki ga komponente in cevovod še zdržijo. Zato za primer absorpcije tlačnega udara velja enačba (7) [10]. Pri tem p_1 označuje tlak v hidravličnem vodu pred zaprtjem ventila, p_2 pa največji dopustni tlak v cevovodu, ki se lahko pojavi med tlačnim udarom.

$$\frac{mv^2}{2} = -\int p\mathrm{d}V = -\frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n} \text{ (adiabatno stiskanje)} \quad (7)$$

Če združimo to s prvotnim izotermnim stiskanjem iz V_0p_0 v V_1p_1 in nato še adiabatno stiskanje iz V_1p_1 v V_2p_2 in izrazimo delovni volumen plina V_0 dobimo (8).

$$V_0 = \frac{mv^2 \cdot (1-n)}{2 \cdot p_0 \cdot 10^5 \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1-\frac{1}{n}} - 1\right)} \quad (8)$$

Masa *m* [kg] tekočine se lahko izračuna iz njene gostote ρ [$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$], dolžine cevi *l* [m] in premera cevi *d* [mm]. Hitrost tekočine pa iz pretoka *Q* [$\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{min}}$] in premera cevi. Če upoštevamo pretvorbe med uporabljenimi in SI-enotami, dobimo enačbo (9).

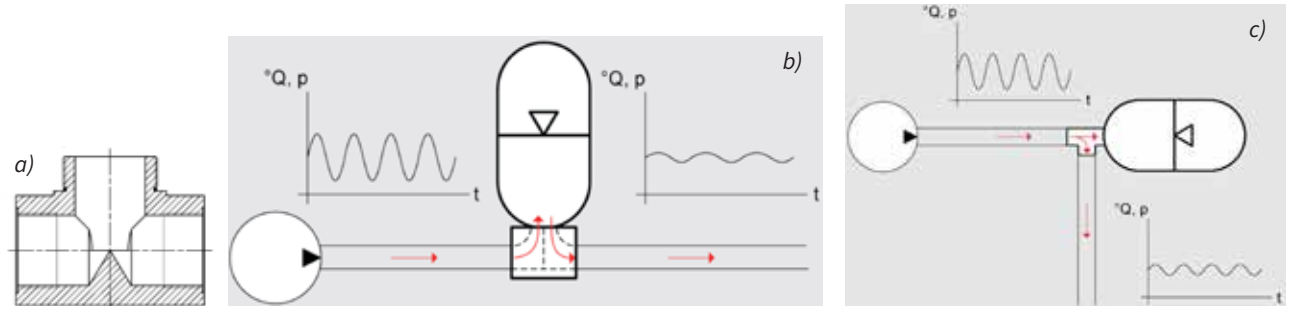
$$V_0 = \frac{\rho \cdot l \cdot Q^2 \cdot (1-n)}{1{,}8 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot p_0 \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1-\frac{1}{n}} - 1\right)} \quad (9)$$

Potrebni volumni za absorpcijo tlačnih udarov v hidravličnih sistemih so običajno v območju decilitrov, zato so membranski akumulatorji še posebej primerni za takšne aplikacije. Pri vodovodnih sistemih in hidroelektrarnah, kjer so cevovodi bistveno daljši in večjih premerov, pa lahko zahtevana kapaciteta akumulatorskih postaj doseže tudi 1000 litrov ali več.

4.6 Ostali pomembni vidiki pri izbiri hidravličnih akumulatorjev

Poleg izbire pravilnega tipa, volumna hidravličnega akumulatorja in njegovega največjega delovnega tlaka ne smemo pozabiti ostalih pomembnih vidikov:

- *Združljivost s hidravličnim medijem:* Elastomerni deli akumulatorja (meh, membrana, tesnila) ter tlačna posoda akumulatorja morajo biti združljivi z uporabljenim hidra-



1 *Vgradnja akumulatorjev za blaženje pulzacij [8], [9]*

vličnim medijem.
- *Temperaturna odpornost:* Elastomerni deli in tlačna posoda akumulatorja morajo prenesti najvišje in najnižje predvidene delovne temperature.
- *Največje kompresijsko razmerje:* Dovoljeno kompresijsko razmerje $\left(\frac{p_2}{p_0}\right)$ ne sme biti preseženo.
- *Certifikati:* Pravilen certifikat za ciljno državo oz. mesto vgradnje mora biti izbran:
  - PED – Evropa
  - ASME – Amerika
  - DNV, BV, LR ... – pomorska industrija
  - EAC – Rusija
  - ML – Kitajska
  - druge nacionalne zahteve
- *Priključek za polnjenje plina:* izbrati je treba ustrezen adapter za ciljno državo.
- *Življenjska doba:* pri določenem območju tlakov lahko akumulator doseže približno 2 milijona ciklov (kar se smatra kot "neskončna" življenjska doba), medtem ko se lahko zunaj tega območja življenjska doba zmanjša na le nekaj tisoč ciklov. Te podatke je treba pridobiti od proizvajalca in morajo biti navedeni v certifikacijski dokumentaciji akumulatorja.
- *Merilna mesta (»minimess priključki«)* in *merilne cevi (»minimess vrvice«)* na strani plina: morajo biti namenjene za plin. Večina proizvajalcev merilnih mest proizvaja še posebne izvedbe merilnih priključkov ter merilnih cevi, ki ustrezno tesnijo pline in omogočajo neoviran pretok v obe smeri (če se akumulatorje polni skozi isti priključek). Oplet standardnih merilnih cevi namenjenih za olje je za pline porozen, zato plin pod tlakom prodre skozi oplet pod zunanjo plastično prevleko cevi. Prevleka, ki ne zdrži enakega tlaka kot cev nato poči, kar povzroči (počasno) praznjenje akumulatorja.

5 Praktične uporabe hidravličnih akumulatorjev

Preden obravnavamo praktične primere uporabe, je treba poznati zahteve glede pravilne zaščite hidravličnih akumulatorjev, kot jih določa standard *EN 14359*. Ta standard poudarja pomen uporabe ustreznih varnostnih elementov, kot so varnostni ventili na strani tekočine, ter razpočne membrane in varnostni ventili na strani plina. Ti elementi se uporabljajo, za preprečevanje nadtlaka, uhajanja plina in konstrukcijskih poškodb. Zaščitni elementi morajo biti prilagojeni obratovalnim pogojem akumulatorja ter skladni z zahtevami *Direktive o tlačni opremi (PED 2014/68/EU)*. Ustrezno zaščitene hidravlične akumulatorje je mogoče varno uporabljati v širokem spektru aplikacij. [11]

5.1 Varna uporaba hidravličnih akumulatorjev

Pravilna zaščita hidravličnih akumulatorjev je opisana v standardu EN 14359, primeri vezav pa so podani v dodatku C istega standarda [11] in povzeti v [12]. Hidravlični akumulatorji, ki se uporabljajo v Evropi, potrebujejo certifikat PED, kadar izpolnjujejo določene pogoje glede tlaka in prostornine. Osnovni kriterij je:

- produkt tlaka in prostornine presega 50 bar l,
- prostornina akumulatorja pa je večja od 1 l.

Ta pogoja veljata za tekočinsko skupino 2, ki vključuje mineralno olje in dušik. V posebnih primerih lahko pod PED spada tudi cevovod na plinski strani, če presega določene dimenzije in tlačne kombinacije (npr. DN > 32 mm in P × DN > 1000 bar mm). Podobne zahteve veljajo tudi za standard ASME, vendar brez minimalne tlačne omejitve.

Kadar akumulator spada pod PED ali ASME:

- Akumulator mora biti dobavljen z veljavnim certifikatom PED oziroma ASME.
- Zaščiten mora biti skladno z EN 14359, kar vključuje:
  - ročni zaporni ventil,
  - krogelni ventil za razbremenitev proti rezervoarju,
  - ločen varnostni ventil s certifikatom PED/ASME (ne sme biti istočasno uporabljen kot »delovni« varnostni ventil),
  - manometer za nadzor tlaka v akumulatorju, ki ga ni mogoče izolirati od akumulatorja in
  - dodatno merilno mesto za preverjanje delovanja manometra.

Pri sistemih z več vzporedno vezanimi akumulatorji se lahko določene zaščitne komponente delijo med več akumulatorji, če komponente še vedno izpolnjujejo zahteve standardov PED oziroma ASME.

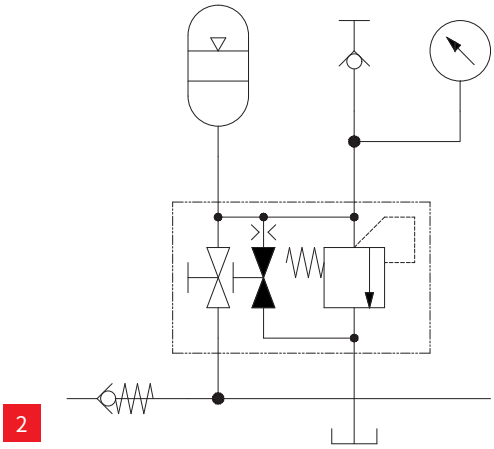
Certificiran varnostni ventil mora biti pravilno dimenzioniran. Njegov nazivni pretok mora zadostovati za varen odvod celotnega pretoka, ki lahko povzroči porast tlaka. Običajno je to skupni pretok vseh črpalk, povezanih z akumulatorjem, pri čemer je treba upoštevati tudi zunanje sile, ki delujejo na hidravlične cilindre oz. hidromotorje, če lahko te v kakršnemkoli položaju ventilov polnijo akumulator. Padec tlaka na certificiranem varnostnem ventilu pri največjem pretoku ne sme preseči najvišjega dovoljenega delovnega tlaka akumulatorja za več kot 10 %, pri čemer je treba upoštevati tudi padec tlaka v povratni liniji, ki mora biti nujno neovirano speljana brez dodatnih ventilov ali filtrov nazaj v rezervoar.

Tudi kadar akumulator ne spada pod PED ali ASME, je treba uporabiti dobre inženirske prakse za njegovo zaščito. Zato je priporočljivo slediti zahtevam standarda EN 14359, najmanj z uporabo:

- manometra,
- varnostnega ventila (lahko tudi brez certifikata PED/ASME), ki je v tem primeru lahko hkrati tudi glavni oz. sistemski varnostni ventil in ni nujno nameščen direktno na akumulatorju.

5.2 Praktični primeri konfiguracije varnostne opreme

To poglavje opisuje tipične načine zaščite hidravličnih akumulatorjev v skladu s standardom EN 14359, ki so podrobneje predstavljeni v dodatku C standarda [11]. Najpogosteje se uporablja varnostni blok za akumulator (*slika 2*), ki združuje

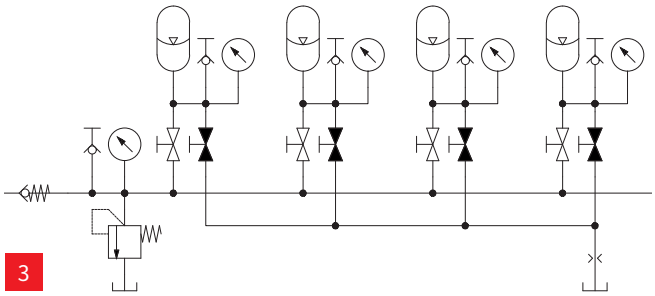


2

Zaščita enega akumulatorja z uporabo varnostnega bloka za akumulator [lastno delo]

zaporni ventil, razbremenilni ventil in varnostni tlačni ventil, hkrati pa vsebuje priključke za hidravlični sistem, akumulator, rezervoar in manometer. Dovoljena je tudi uporaba posameznih ločenih komponent. Manometer mora biti priključen neposredno na akumulator (brez vmesnega zapornega elementa), poleg njega pa mora biti še merilno mesto za kontrolo manometra. Manometer je lahko priključen tudi preko merilnega priključka, da ga je mogoče enostavno zamenjati tudi, ko je akumulator pod tlakom. Na strani črpalke je priporočljiva vgradnja nepovratnega ventila, ki preprečuje razbremenitev oziroma izpraznitev akumulatorja proti črpalki, na primer med vzdrževanjem črpalke ali pri menjavi tlačnega filtra.

Pri uporabi več akumulatorjev ima lahko vsak posamezni akumulator svoj lastni varnostni blok. Obstaja pa izjema, ki omogoča uporabo samo enega skupnega varnostnega tlačnega ventila za vse akumulatorje *(slika 3)*, pri čemer je še vedno omogočeno posamezno izklapljanje in praznjenje vsakega akumulatorja, kar bistveno olajša vzdrževanje sistema. Pri takšni izvedbi je treba paziti, da popolnoma napolnjeni akumulatorji ne ostanejo predolgo izolirani od sistema, saj lahko povišanje temperature okolice povzroči povečanje tlaka plina v akumulatorju in posledično prekoračitev njegovega največjega dovoljenega tlaka. To nevarnost je mogoče preprečiti z vgradnjo razpočne membrane (ang. burst disc) na plinsko stran akumulatorja.



3

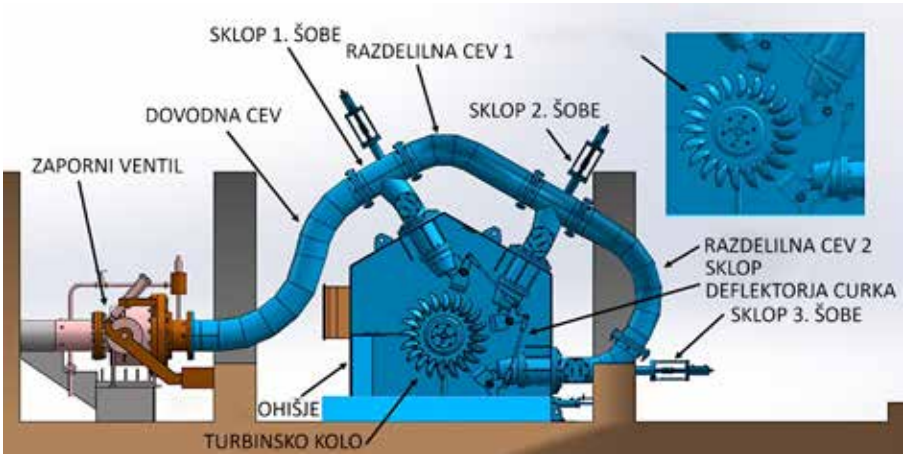
Zaščita več vzporedno vezanih akumulatorjev z uporabo ločenih komponent [lastno delo]

Kakor hitro je na hidravlični sistem priključen hidravlični akumulator, je le-tega treba opremiti z opozorilnim simbolom tlačne posode in dodatnim opisom, da je pred vzdrževalnimi deli nujna razbremenitev akumulatorja. To je navadno UV in oljeodporna nalepka, na kateri je prostor še za vpis tlaka predpolnjenja, ki se izpolni ročno. Priporočljivo je, da se nalepka namesti na vse akumulatorje. Vsak akumulator pa mora biti že s strani proizvajalca opremljen s tipsko kodo, serijsko številko in najvišjim delovnim tlakom.

5.3 Praktični primer uporabe hidravličnih akumulatorjev za varno delovanje hidroelektrarne s Peltonovo turbino

Peltonova turbina običajno vsebuje tri glavne pogonske elemente, ki jih je treba krmiliti: deflektor vodnega curka, ki preusmerja curek stran od turbine, glavni dovodni oziroma zaporni ventil za zaustavitev pretoka vode skozi turbino, cilindre za nastavitev igel šob, ki natančno regulirajo pretok skozi posamezno šobo. [13]

Med normalnim obratovanjem elektrarne hidravlični agregat (HPU) skrbi za premikanje igel šob in deflektorja, tako da moč generatorja ustreza zahtevani moči elektroenergetskega omrežja. HPU napaja aktuatorje preko akumulatorja. Kadar tlak v akumulatorju pade pod tlak vklopa, hidravlična črpalka ponovno napolni akumulator do tlaka izklopa. Pri tem je treba zagotoviti: da se črpalka ne vklaplja prepogosto in da se akumulator ponovno napolni v ustreznem času.



4 *Peltonova turbina s tremi šobami [13]*

V primeru izrednih dogodkov, na primer, če se črpalka ne zažene, ko bi se morala, je treba generator hitro zaustaviti. V takem primeru mora: deflektor preusmeriti vodne curke stran od turbine, vse šobe pa se morajo zapreti. Zato mora biti v akumulatorju shranjena zadostna količina tlačnega medija za varno zaustavitev turbine.

Velikosti cilindrov, časi zapiranja in minimalni potrebni tlaki se razlikujejo glede na velikost turbine.

Postopek dimenzioniranja akumulatorja

- Izračun volumnov cilindrov in določitev smeri gibanja v zasilnem režimu.
- Izračun potrebnega volumna za normalno delovanje in izvedbo izklopa v sili.
- Prilagajanje volumna akumulatorja, tlaka, ki sproži izklop v sili, ter vklopnega in izklopnega tlaka črpalke z iterativno uporabo enačbe (5), pri čemer se razpoložljiv volumen

tlak ob začetku procedure za zaustavitev v sili p_{em}= **110 bar**

tlak ob koncu procedure za zaustavitev v sili p_{emmin}= **50 bar**

hidravlični valj	št	smer	volumen polnega hoda (za smer)	varnostni faktor	potrebna zaloga tekočine
deflektor curka	1	uvlek	0,11 l	1,5	0,16 l
zaporni ventil	1	gravitacija	0,00 l	0	0,00 l
nastavitev šobe 1	1	izteg	0,31 l	1,5	0,47 l
nastavitev šobe 2	1	izteg	0,31 l	1,5	0,47 l
vsota	4		0,74 l		1,10 l

akumulator	št	nazivni volumen	tlak predpolnjenja		zaloga tekočine na voljo
glavni akumulator	1	10,0 l	45 bar		2,75 l
vsota	1	10,0 l			2,75 l

5 *Preračun HPU – normalno obratovanje [lastno delo]*

tlak izklopa hidravlične črpalke psys= **230 bar**

tlak vklopa hidravlične črpalke pmin= **120 bar**

hidravlični valj	št	volumen večje strani valja	število gibov	potreben volumen
deflektor curka	1	0,16 l	1,5	0,24 l
zaporni ventil	1	0,53 l	0	0,00 l
nastavitev šobe 1	1	0,31 l	1	0,31 l
nastavitev šobe 2	1	0,31 l	1	0,31 l
vsota	4	1,32 l		0,86 l

akumulator	št	nazivni volumen	tlak predpolnjenja	delovna zaloga tekočine max	min
glavni akumulator	1	10,0 l	45 bar	1,28 l	1,13 l
vsota	1	10,0 l		1,28 l	1,13 l

črpalka		pretok	čas polnjenja akumulatorja max	min
glavna črpalka		10,9 l/min	7 s	6 s

6 *Preračun HPU – izklop v sili [lastno delo]*

akumulatorja primerja s potrebnim volumnom za normalno in zasilno delovanje.
- Določitev potrebne velikosti črpalke in moči elektromotorja glede na zahtevan čas polnjenja akumulatorja.

Vsak HPU se po montaži preizkusi, pri čemer se izmerijo dejanski volumni tekočine, ki je na voljo v akumulatorju. Primerjava izračunov in meritev je prikazana v *tabeli 3*. Upoštevati je treba, da so izračuni prikazani na *slikah 5* in *6* izdelani za minimalno temperaturo okolice 0 °C, medtem ko so meritve izvedene pri približno 20 °C, zato so bili izračuni narejeni tudi za temperaturo 20 °C, da lahko izračune lažje primerjamo z meritvijo.
Ob primerjavi preračunanih vrednosti z rezultati meritev, lahko opazimo, da je pri količini shranjene tekočine napaka manjša od 10 %, kar potrjuje ustreznost enačbe (5) za preračun tekočine. Napaka je malenkost večja pri času polnjenja hidravličnega akumulatorja, kar lahko pripišemo mehkemu zagonu elektromotorja s frekvenčnim pretvornikom, ki traja 5 s in podaljša čas polnjenja za 2,5 s (vrtilna frekvenca in posledično pretok črpalke naraščata linearno prvih 5 s – kar pomeni, da je povprečni pretok v tem časovnem obdobju polovico manjši). Preračun namreč upošteva, da se motor zažene hipoma.

Opisan hidravlični agregat je bil uspešno zagnan v Gvajani v hidroelektrarni moči 0,8 MW, s pretokom vode 200 l/s, padcem 207 m in premerom turbinskega kolesa 488 mm. [14]

6 Zaključek

Če so hidravlični akumulatorji pravilno dimenzionirani in vgrajeni na pravilen način, postanejo varen in učinkovit element za izboljšanje dinamičnih lastnosti hidravličnih sistemov. V tem prispevku so bili predstavljeni ključni parametri, ki določajo njihovo učinkovito uporabo, predvsem izbira ustreznega tipa akumulatorja, pravilno dimenzioniranje in izvedba potrebnih varnostnih ukrepov. Z uporabo termodinamičnih zakonitosti in inženirskih izračunov lahko inženirji prilagodijo konfiguracijo akumulatorjev specifičnim funkcionalnim zahtevam, kot so: shranjevanje energije, blaženje tlačnih pulzacij, absorpcija tlačnih udarov, podpora delovanju črpalk, ter izvajanje zasilnih in varnostnih funkcij. Poleg tega upoštevanje varnostnih standardov, kot sta EN 14359 in PED, ne zagotavlja zgolj skladnosti z zakonodajnimi zahtevami, temveč tudi visoko stopnjo obratovalne zanesljivosti in varnosti sistema. Na podlagi predstavljenih praktičnih primerov, vključno z uporabo v hidravličnem sistemu za regulacijo Peltonove turbine, je jasno razvidno, da hidravlični akumulatorji niso zgolj pomožne komponente, temveč pomembni gradniki, ki bistveno prispevajo k odpornosti, zanesljivosti in učinkovitosti hidravličnega sistema. Inženirji, ki bodo pri projektiranju upoštevali predstavljene dobre prakse, bodo lahko v celoti izkoristili potencial hidravličnih akumulatorjev ter s tem izboljšali zanesljivost, energetsko učinkovitost in zmogljivost hidravličnih sistemov v industrijskih in mobilnih aplikacijah.

Tabela 3 : *Primerjava preračunov z meritvami [lastno delo]*

Scenarij uteži	preračun pri 0 °C	preračun pri 20 °C	meritev pri ~20 °C
čas polnjenja ($p_{min} \rightarrow p_{max}$)	7 s	8 s	11 s
količina tekočine na voljo ($p_{max} \rightarrow p_{min}$)	1,13 l	1,28 l	1,37 l
količina tekočine na voljo ($p_{em} \rightarrow p_{emmin}$)	2,75 l	3,11 l	3,22 l

Viri

[1] Costa, G. K., & Sepehri, N. (2023). Hydraulic accumulators in energy efficient circuits. Frontiers in Mechanical Engineering, 9, Article 1163293. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2023.1163293/full

[2] Dindorf, R., Takosoglu, J., & Wos, P. (2023). Review of hydro-pneumatic accumulator models for the study of the energy efficiency of hydraulic systems. Energies, 16(18), 6472. https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6472

[3] Zhu, Jianxin & Shen, Chao & He, Qinghua & Li, Saibai & Dai, Peng & Li, Xiang. (2024). Boom Potential Energy Regeneration Method for Hybrid Hydraulic Excavators. IEEE Access. http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3386741.

[4] Leon-Quiroga, J., Newell, B., Krishnamurthy, M., Gonzalez-Mancera, A., & Garcia-Bravo, J. (2020). Energy efficiency comparison of hydraulic accumulators and ultracapacitors. Energies, 13(7), 1632. MDPI Journal

[5] HYDAC. (2001). Bladder accumulators. https://rodavigo.net/datos/articulos/130/vejiga-para-acumulador-235290-hydac-(1).pdf

[6] Majdič, F. (2021). Matematični model za hidravlične akumulatorje. Ventil, 27(4), 246–250. https://revija-ventil.si/wp-content/uploads/2021.11-majdic.pdf

[7] Majdič, F. (2021). Hidravlični akumulatorji: Dodatni vir hidravlične tlačne energije v hidravličnih sistemih z neenakomerno porabo. Ventil, 27(3), 192–196. https://revija-ventil.si/wp-content/uploads/2021.08_majdic.pdf

[8] EPE Italiana. (2019). Catalogo generale EPE 2019. https://www.epeitaliana.it/wp-content/uploads/2020/06/Catalogo-Generale-EPE-2019.pdf

[9] HYDAC. (2021). Hydraulic dampers and accumulator applications https://www.hidro-norm.com.tr/panel/Sayfalar/urunler/prd-doc-pro-3701-00001-sen-ain-v17-625.pdf

[10] LibreTexts PHYSICS. (n.d.). 3.7: Adiabatic processes for an ideal gas. University Physics II – Thermodynamics, Electricity, and Magnetism (OpenStax). https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_II_-Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism(OpenStax)/03%3A_The_First_Law_of_Thermodynamics/3.07%3A_Adiabatic_Processes_for_an_Ideal_Gas

[11] European Committee for Standardization. (2017). EN 14359:2017 – Gas-loaded accumulators for fluid power applications.

[12] Tašner, T. (2022). Legal requirements of hydraulic power units. International Conference Fluid Power 2023. https://press.um.si/index.php/ump/catalog/view/811/1155/3408

[13] Biswas, C., & Pandey, P. (2023). Pelton turbine runner material selection through FEM structural analysis. International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science, 5(9). https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper//issue_9_september_2023/44892/final/fin_irjmets1695813897.pdf

[14] Gugler GmbH. (n.d.). Worldwide references. Gugler Water Turbines. https://www.gugler.com/worldwide-references/

Hydraulic Accumulators in Practice: Selection, Sizing, and Installation

Abstract:
Hydraulic accumulators are key components in fluid power systems, enabling hydraulic energy storage, pressure stabilization, compensation of volume variations, and balancing of dynamic loads. Their functionality and effectiveness depend largely on the correct selection of accumulator type, appropriate sizing, and optimal integration into the hydraulic circuit. This paper presents the fundamental principles of hydraulic accumulator design and application, with emphasis on selection criteria, precharge pressure determination, sizing according to functional requirements, and compliance with safety requirements.

Approaches for integrating accumulators into hydraulic systems are presented with the objective of achieving efficient energy storage, reducing peak loads, dampening pressure pulsations and shocks, and improving system dynamic response. Particular attention is given to maximizing the utilization of the accumulator's effective volume and preventing common design errors, such as exceeding the permissible compression ratio, incompatibility of materials with the hydraulic medium and operating temperatures, and neglecting accumulator lifetime limitations.

Using thermodynamic models and practical application examples, the paper demonstrates the impact of properly selected and sized accumulators on the energy efficiency, reliability, and operational safety of hydraulic systems. The findings provide practical guidelines for hydraulic system design, where the accumulator is not considered merely an auxiliary component, but an active element for optimizing the performance and functionality of the entire system.

Keywords:
Hydraulic accumulators, Fluid power systems, Energy storage, Pressure stabilization, Load balancing, Circuit integration, Selection criteria, Sizing, Pre-charge pressure, Functional safety, Engineering guidelines

MEDNARODNA KONFERENCA
FLUIDNA TEHNIKA 2027
Tok idej. Moč povezovanja.
15. in 16. september 2027
Maribor · Kongresni center Habakuk



- Nove tehnologije in smeri razvoja
- Hidravlične tekočine: izzivi in razvoj
- Komponente, sistemi in aplikacije
- Digitalizacija, industrija 4.0 in znanja

UDELEŽENCI Pridobite znanje.
AVTORJI Delite raziskave.
RAZSTAVLJALCI Predstavite rešitve.
SPONZORJI Podprite razvoj.

ft.fs.um.si

Univerza v Mariboru · Fakulteta za strojništvo · LFTP
Laboratorij za fluidno tehniko in pogone
lftp.fs@um.si
Vito Tič · +386 2 220 7613

FLUIDNA TEHNIKA ◆ NAPREDNO INŽENIRSTVO IN TEHNOLOGIJE
VENTIL