

HIDRAVLIČNI AKUMULATOR

Dodatni vir hidravlične tlačne energije v hidravličnih sistemih (HS) z neenakomerno porabo

Franc Majdič

Izveček:

Hidravlični akumulatorji (HA) so vgrajeni v številnih hidravličnih sistemih (HS) (sistemih pogonsko-krmilne hidravlike (PKH)). Največkrat služijo za dodajanje hidravlične kapljevine (HK) v sistem za tiste delovne operacije, ki rabijo v kratkem času velike količine HK pod tlakom. Za periodične kratkotrajne velike zahtevane pretoke tako ni potrebno vgraditi črpalk s sicer »prekomerno« iztisinino; vgradimo enega ali več ustrezno velikih HA. Vendar tak sistem deluje v nekem območju med zgornjim in spodnjim delovnim tlakom.

Ključne besede:

pogonsko-krmilna hidravlika (PKH), hidravlični sistem (HS), hidravlični akumulator (HA), hidravlična komponenta, hidravlična kapljevina (HK), termodinamične preobrazbe

1 Uvod

Prispevek obravnava delovanje hidravličnih akumulatorjev (HA) v sistemih pogonsko-krmilne hidravlike (PKH), in sicer za tisto funkcijo v sistemih PKH, za katero se HA najpogosteje uporabljajo. V nadaljevanju članka bomo namesto PKH uporabljali skrajšani izraz hidravlični sistemi (HS), ki se tudi običajno uporablja v industriji.

Številni HS imajo vgrajene hidravlične akumulatorje (HA). S konstrukcijskega vidika ločimo: akumulatorje na uteži, batne, membranske in akumulatorje z mehomo. Samo HA na uteži vzdržujejo konstanten tlak, vendar se v zadnjih desetletjih le še zelo izjemoma uporabljajo. Tudi batni HA so malokrat vgrajeni v HS. Njihova prednost je, da količino hidravlične kapljevine (HK) v HA lahko vidimo s položaja merilne letve, priključene na bat znotraj HA. Membranski so majhni, prostornine le do največ nekaj litrov. HA z mehomo so v sistemih večinsko uporabljani (vgrajeni) in imajo prostornine do 200 L, izjemoma več. V velikih HS se največkrat uporabljajo 50-litrski. Če so potrebne večje prostornine, se vgradi več 50-litrskih namesto enega večjega. Ta način ima prednosti predvsem z vidika vzdrževanja, pa tudi same funkcije v primeru okvare posameznega HA. Poškodovani HA lahko z zapirnimi ventili funkcionalno izločimo iz sistema, ki bo imel zato morda le malo zmanjšano funkcijo. Če gre npr. za enega od štirih 50-litrskih HA, izločitev enega za proizvodni proces morda ni tako usodna, kot če »odpove« edini 200-litrski HA. V nekaterih proizvodnih procesih je posamezni proces skoraj nesprejemljivo takoj prekiniti.

HA so tlačne posode in zato podvrženi predpisom tega področja. Vanje z ene strani (pri HA z mehomo vedno s spodnje) doteka hidravlična kapljevina, druga stran (zgornja) pa je polnjena s plinom. Zaradi nevarnosti eksplozije kisik (zrak) ne sme biti uporabljen v HS, kjer je HK olje. V takih HS polnimo plinsko stran z dušikom; lahko bi jo tudi s kakšnim žlahtnim plinom, ki daje malenkostno boljše učinke (izkoristke), vendar niso tolikšni, da bi »pokrili finančno plat«. Oba medija (plin in HK) ločuje gumijast meh, membrana ali bat.

HA se uporabljajo za različne funkcije: nekateri za kompenzacijo raztezanja hidravlične kapljevine (HK) ob spremembah njene temperature, nekateri za dušenje hidravličnih udarov, najpogosteje pa kot dodatni vir hidravlične tlačne energije v HS s časovno zelo neenakomerno porabo HK pod tlakom v času izvajanja delovnega procesa. Če uporabimo hidravlične akumulatorje, črpalk ni treba dimenzionirati na največji potreben tok kapljevine pod tlakom, pač pa le na nek približno povprečen pretok, ki ga izračunamo enostavno glede na skupni potreben doveden volumen HK v celotnem času cikla. Včasih se računsko upošteva tudi čas mirovanja, torej čas brez delovnih gibov izvršilnih sestavin – porabnikov (hidravličnih cilindrov (HC), hidromotorjev (HM) in zasučnih cilindrov (ZC)). Celoten cikel se torej šteje od začetka prvega giba enega izmed porabnikov do ponovnega začetka istega giba, torej začetka novega cikla.

HA so vgrajeni v številnih hidravličnih sistemih. Kot je bilo že omenjeno, največkrat služijo za dodajanje HK v sistem za tiste delovne operacije, ki rabijo v kratkem času velike količine HK. Za periodične kratkotrajne velike potrebne pretoke tako ni potrebno vgraditi črpalk s sicer »prekomerno« iztisinino (oz. pretokom). Takšne velike (»prevelike«) črpalke bi seveda zahtevale tudi močne pogonske motorje, katerih velika moč pa bi bila uporabljena le v kratkih časovnih intervalih celotnega cikla.

Doc. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

2 Fizikalne osnove delovanja HA

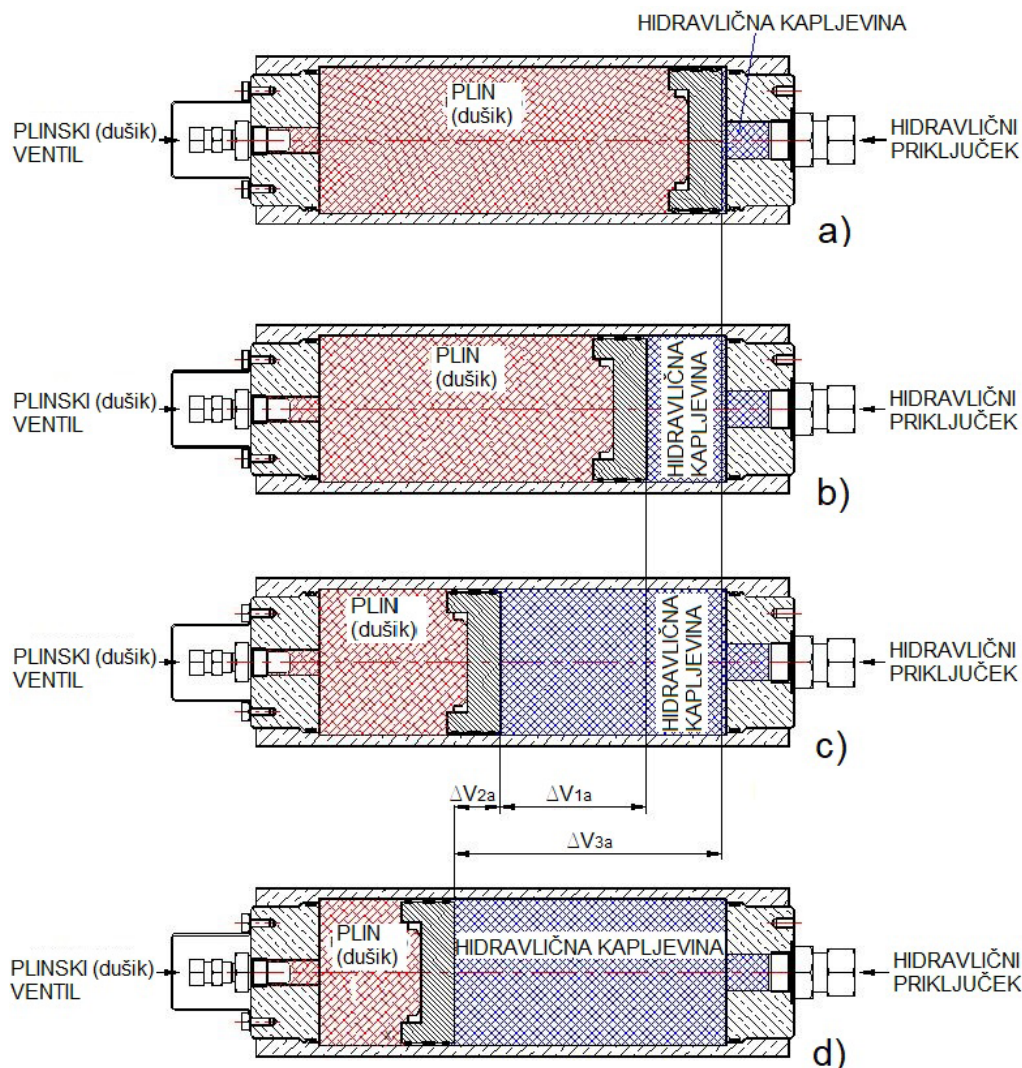
Kot je bilo že omenjeno, HA dodaja HK pod tlakom v HS, kadar je poraba v sistemu v nekem kratkem časovnem obdobju celotnega delovnega cikla večja, kot jo dovede/jo črpalka/ke. Tedaj se plin v HA razteza, tlak plina zaradi raztezanja upada, HK pa iz HA doteka v sistem. Znotraj HA sta tlak plina (dušika) in tlak kapljevine enaka (zelo majhna razlika nastopa zaradi trenja bata ob stene cevi HA). Torej tudi tlak kapljevine znotraj HA ob iztekanju upada, s tem pa seveda tudi tlak v HS.

Oglejmo si razmere ob delovanju batnega HA po *sliki 1*. Ko v HS ni tlaka, je celotna prostornina (V_0) akumulatorja napolnjena s plinom ob tlaku predpolnitve plina p_0 (*slika 1a*). Ko črpalka začne dodajati HK pod tlakom v HS in ustvarja večji pretok, kot je poraba v HS, doteka HK tudi v HA. Ko tlak v HS preseže tlak p_0 , se začne HA z ene strani polniti s HK, bat v HA (*slika 1*) se začne pomikati od desne proti levi in s tem stiskati plin v HA. V nekem trenutku tlak v HS in s tem tudi plin v HA doseže vrednost

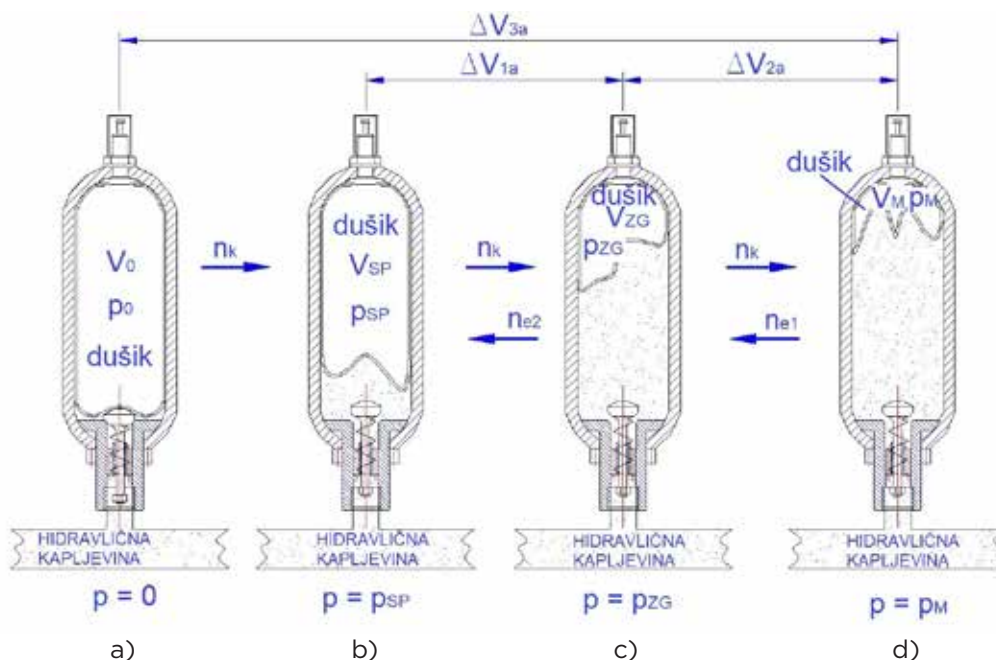
p_{sp} (spodnji delovni tlak; *slika 1b*). Ob nadaljnjem dotekanju HK v HA (če so v HS izpolnjeni pogoji za to) tlak v HS in HA doseže vrednost p_{zg} (*slika 1c*). Ob ustreznih pogojih (tlačni pretok črpalke (črpalk) večji od porabe v HS) se tlak v HS in seveda tudi v HA lahko še naprej dviga in polni HA, vendar največ do vrednosti (višine) p_{MAX} (*slika 1d*). Pri tlaku p_{MAX} se črpalka tlačno razbremeni ali pa ne ustvarja več pretoka oz. le toliko, kolikor je notranja lekaža HS; zunanje lekaže pa itak ne sme biti – je nimamo (!?). Pri batnem HA so 4 značilni tlaki in pripadajoče prostornine plina (V_0 , V_{sp} , V_{zg} , V_M) in HK razvidni s *slik 1* in *2* (a, b, c, d).

Kot že rečeno, se v industriji, pa tudi v mobilni hidravliki večinoma uporabljajo akumulatorji z mehom. Prej opisani 4 značilni tlaki in pripadajoče prostornine plina in HK za HA z mehom prikazuje *slika 2*.

Pri HA z mehom je namesto bata vgrajen gumijast meh, ki ločuje plin (dušik) in HK. Ker ni trenja bata, sta tu tlaka plina in HK znotraj HA izenačena. Meh je običajno izdelan iz gume, debeline približno do



Slika 1: Tipične faze delovanja batnega HA



Slika 2 : Tipične faze delovanja HA z mehomo

5 mm. Osnovna oblika je razvidna s slike 2a. Ko HK doteka v HA, se meh zguba in plin stiska, tlak plina (in HK) se dviga. Proces dviganja tlaka in spremembe prostornin je analogen, kot je opisan za sliko 1, le da so spremembe tam lepše razvidne. Podatek, za koliko se meh lahko zguba, torej kolikšna je lahko najmanjša prostornina meha (V_M na sliki 2d) v primerjavi z osnovno (nazivno) prostornino V_0 , je podan v kataloških listih izdelovalcev HA.

Med delovanjem HA se plin (dušik) stiska in razteza. Temu pravimo, da se plin termodinamično preobrazuje. Med termodinamično preobrazbo se parametri plina (temperatura, tlak, volumen - T, p, V) spreminjajo. Poleg spremenljivih parametrov nas med preobrazbo zanimata tudi pridobljena oziroma porabljena delo in toplota. Za poenostavitev preobrazbe stanja plina računamo z idealnim plinom. Idealni plin je plin, ki se obnaša popolnoma po plinski enačbi (1) in katerega notranja energija bi bila odvisna samo od temperature. Pri takem plinu ne bi bilo potrebno upoštevati privlačnih sil med molekulami in lastne prostornine molekul. Obnašanje plinov je tem bližje obnašanju idealnega plina, čim bolj so razredčeni. Obnašanje realnih plinov nekoliko odstopa. V nadaljevalnem prispevku (naslednja št. Ventila) bomo podali matematični model za izračun prostornine HA za idealni plin. Ker je dušik za polnjenje HA realni plin, daje izračun nekoliko napačne rezultate, ki pa so za prakso uporabni, izračuni pa so mnogo enostavnejši kot za realni plin:

$$p \cdot V = \left(\frac{m}{M} \right) \cdot R \cdot T \quad (1)$$

kjer so: p - tlak, V - prostornina plina, m - masa, M - masa kilomola razredčenega plina, T - temperatura, R - splošna plinska konstanta.

Plinsko enačbo (1) smo tu zapisali samo za osvežitve »teoretičnega spomina«, v nadaljevanju članka pa se z njo ne bomo ukvarjali.

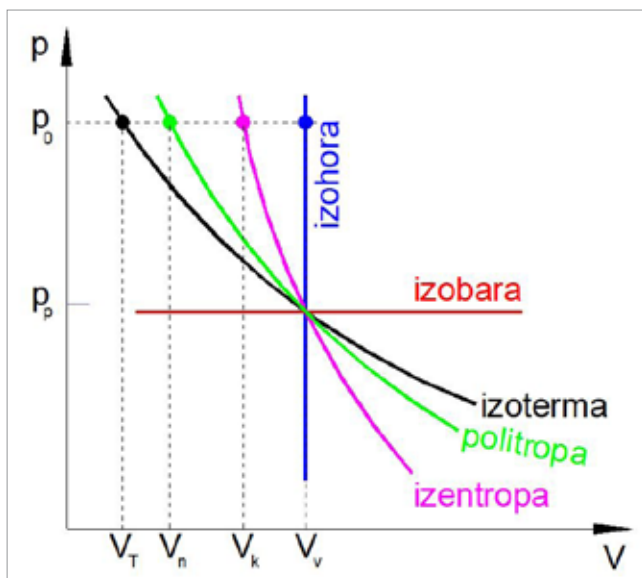
Članek podaja izhodišča za matematični model za izračun (potrebne) prostornine HA. Projektant HS mora za izbrane parametre delovanja (hitrosti, sile, navore izvršilnih sestavin) izračunati potrebno prostornino V_0 akumulatorja. Tako torej ni treba dimenzionirati črpalke na največji potrebni pretok za občasno kratkotrajno veliko potrebno količino HK.

Plinska enačba stanja za idealni plin upošteva zvezo med tlakom, temperaturo in prostornino. V odvisnosti od tega, kateri parametri in v kakšni medsebojni odvisnosti se spreminjajo, poznamo naslednje preobrazbe (slika 3):

- ▶ Izohora ($V = \text{konst.}$),
- ▶ Izobara ($p = \text{konst.}$),
- ▶ izoterma ($T = \text{konst.}$),
- ▶ izentropa (adiabata) ($dQ = 0, s = \text{konst.}$),
- ▶ politropa ($p \cdot V^n = \text{konst.}$).

Iz tlaka p_p in volumna V_v pride do novih prostornin: V_T, V_n, V_k .

S slike 3 je razvidno, da imamo v osnovi dve vrsti termodinamičnih preobrazb: linearno (izohora in izobara) in eksponentno (izoterma, izentropa in politropa). Vsaka od omenjenih eksponentnih preobrazb ima različne lastnosti, v enačbi pa se ločijo po eksponentu n . Za dvoatomne pline velja, da ima izoterma eksponent $n = 1$, izentropa (oz. adiabata) pa 1,4. To sta dve skrajni termodinamični spremembi.



Slika 3 : Termodinamične preobrazbe

Izobara nastopa le pri HA na uteži, ki pa se ne uporablja več, razen morda kakšnih izjem. Izohora pa je za delovanje HA neuporabna, ker je bistvo HA dodajanje manjkajoče HK.

V katero vrsto preobrazbe uvrstimo posamično preobrazbo pri obravnavi aplikativnih primerov, je odvisno predvsem od trajanja kompresije oz. ekspanzije. Pri HA so priporočene časovne razmejitve sledeče:

- ▶ trajanje preobrazbe $t < 1$ min
 $n = 1,4$ (proces je izentropen),
- ▶ trajanje preobrazbe $t > 3$ min
 $n = 1,0$ (proces je izotermen),
- ▶ trajanje preobrazbe $1 < t < 3$ min
 $1 < n < 1,4$ (proces je politropen).

Če je trajanje preobrazbe $t < 1$ min, je čas prekratek za izmenjavo toplote z okolico. Če je čas trajanja preobrazbe $t > 3$ min, pa je izmenjava toplote izvedena in zato preobrazba izotermna. V laboratoriju LFT - LPKH smo bili do navedenih »razmejitvenih« parametrov iz literature malo skeptični, pa smo izvedli tudi sami ustrezne preskuse, ki so potrdili te vrednosti. Pri aplikativni rabi metode smo ob trajanju preobrazbe v času od ene do treh minut uporabili preproste linearne interpolacije vrednosti eksponenta. Tako smo npr. za čas trajanja preobrazbe 2 minuti računali z eksponentom $n = 1,2$.

Ko se hidravlični akumulator polni s kapljevino, se plin v HA stiska. Kompresija plina je včasih izotermna (> 3 min); tedaj je eksponent politrope $n_k = 1,0$. Vendar je pri določitvi eksponenta v fazi projektiranja treba upoštevati čas polnjenja, torej velikost HA, razmerje tlakov in kapaciteto črpalke oziroma dotok v HA. Ker so hidravlični akumulatorji praviloma polnjeni z dušikom (za olje), le za vodo lahko z zrakom, oba sta dvoatomna plina, je stiskanje plina

politropno ali celo adiabatno in velja za eksponent kompresije neenačba/enačba (2):

$$1,0 < n_k \leq 1,4 \quad (2)$$

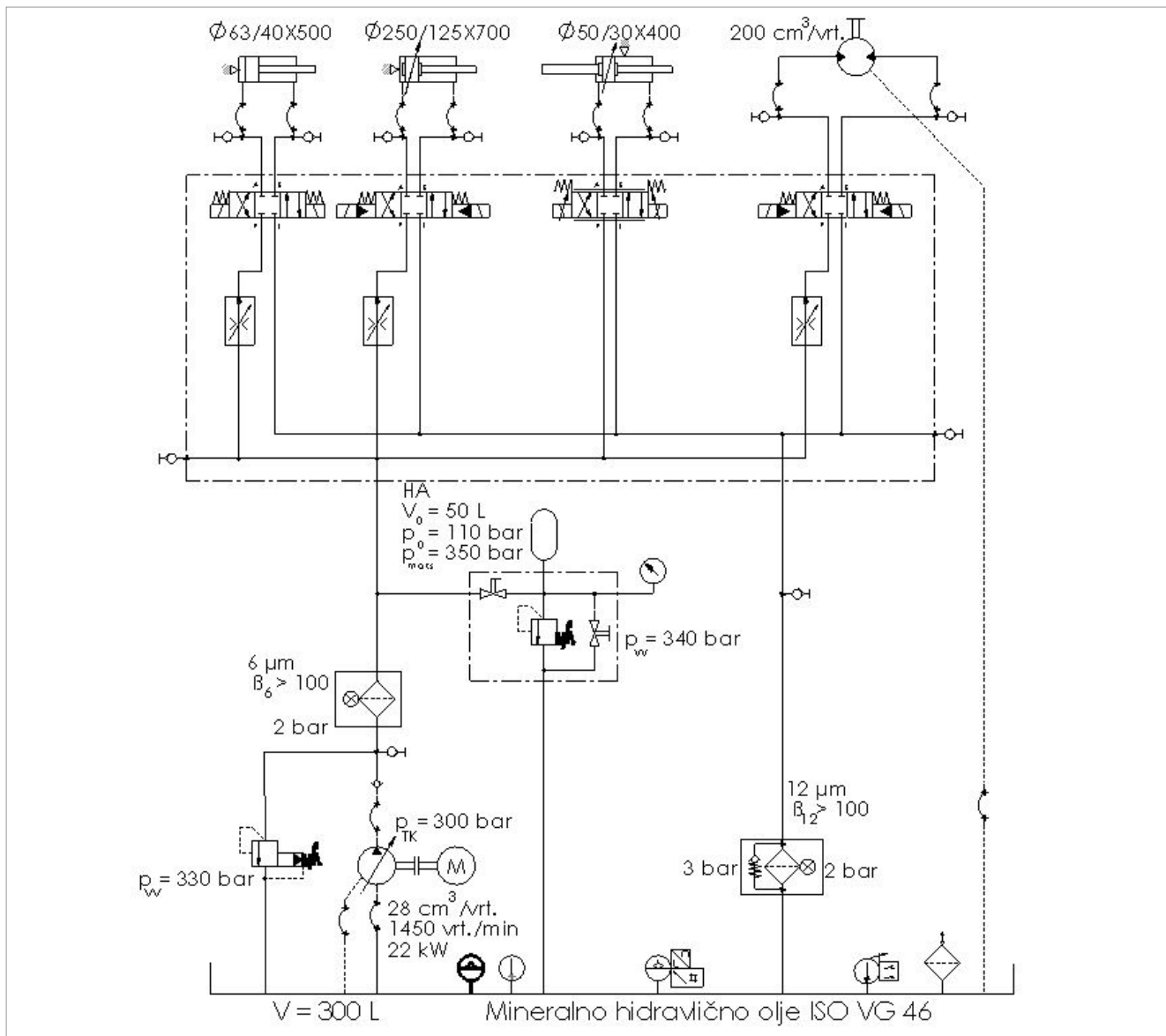
Bistvena naloga tovrstnih HA je dodajanje manjkajoče HK pod tlakom iz HA v HS; ob tem se plin v HA razteza. Tlak plina in istočasno tudi kapljevine v HS upada. V industrijskih HS dodajanje manjkajoče HK skoraj nikoli ne traja več kot 3 minute.

3 Pomembni - mejni 4 tlaki delovanja HA

Tlak p_0 (sliki 1 in 2) izbere projektant HS. Tlak p_0 je tlak predpolnitve HA. Do tega tlaka napolnimo plin (dušik) v HA, ko v HS ni tlaka; torej plin polnimo v HA, ko črpalka ne deluje. Kontrola tlaka p_0 je občasen poseg rednega vzdrževanja. Ko vzdrževalna služba ob občasni (redni) kontroli ugotovi, da je tlak p_0 v HA prenizek, mora ta tlak dvigniti. Dopolni/dvigne ga s polnjenjem iz ustrezne jeklenke preko plinskega priključka na HA. Tlak p_0 mora biti izpisan v hidravlični shemi ob simbolu HA.

Tlak p_0 znaša praviloma 60 % do 90 % tlaka p_{sp} . Če je razlika tlakov med p_0 in p_{zg} velika (več deset barov oz. je p_0 le približno polovica zgornjega delovnega tlaka p_{zg}), naj projektant izbere za p_0 le 60 % do 70 % spodnjega delovnega tlaka, torej $p_0 = (0,6 \text{ do } 0,7) \times p_{sp}$. Če je razlika manjša, je pa lahko $p_0 \sim 0,8 \times p_{sp}$. Za natančnejšo določitev pa mora projektant opraviti dokaj zahteven izračun spremembe prostornin ob termodinamičnih preobrazbah. Če tega ne opravi, naj »se drži« prej navedenega napotka. Vzdrževalna služba naj upošteva podatek v hidravlični shemi v upanju, da je projektant HS to pravilno določil oziroma izračunal. Če je treba meh v HA pogosto menjati zaradi poškodbe (praviloma vzdrži nekaj let), mora vzdrževalna služba preveriti ustrezne parametre ali izvesti kontrolni izračun - vzdrževanje je pač visoka stroka, ne samo »popravljanje okvar«. Če pa v uporabi HS spremenite parametre delovanja, se mora vzdrževalna služba tega zavedati ter ponovno tehnično-računsko preveriti oziroma določiti (izračunati) nove ustrezne parametre (tlake in prostornine HA).

Tlak p_{sp} je spodnji delovni tlak, to je tlak, pri katerem še vse izvršilne komponente (hidravlični cilindri (HC), hidromotorji (HM) in zasučni cilindri (ZC - tehni v shemi slike 4)) opravljajo delovne gibe z nominalnimi parametri (sile, hitrosti, navori). Tlak p_{sp} izbere projektant HS, vendar se mora zavedati, da nizek p_{sp} zahteva večje izvršilne komponente. Ob delovanju HA tlak HK upade do p_{sp} . Če je ta tlak enak tlaku p_0 , bi sicer iz HA pridobili več potrebne HK pod tlakom, vendar bi pri batnem HA bat (slika 1) vsakokrat udaril v prirobnico HA, pri HA z meh (slika 2) pa bi se meh »podrgnil« po gobastem iztočnem ventilu, kar bi drastično skrajšalo uporabno dobo meha. To smo omenili že v prejšnjem odstavku.



Slika 4 : Hidravlična shema HS s 4 izvršilnimi komponentami (3 x HC in 1 x HM)

Tlak p_{ZG} je zgornji delovni tlak, to je tlak, pri katerem se glede na matematični model zanesljivo vključi iztekanje »manjkajoče« HK v HS. To je računsko najvišji tlak, pri katerem HA začne opravljati svojo funkcijo. To se sicer lahko začne že pri tlaku nad p_{ZG} (med p_{ZG} in p_{MAX}), a to ni zanesljivo (vprašanje je, kdaj/v katerem trenutku delovnega procesa se vključi potreba po dodatni količini tlačne HK) in je torej za izračun zanesljiv le tlak p_{ZG} . To je razloženo v naslednjih dveh odstavkih.

Tlak p_{MAX} je najvišji tlak, ki ga doseže črpalka. Izbere ga projektant HS glede na dovoljeni najvišji obratovalni tlak črpalke, komponent (cevovodi, izvršilne komponente (HC, HM, ZV) in krmilje) v HS in najvišji dovoljeni tlak vgrajenih HA. Projektant tudi določi/izbere razliko tlakov $p_{MAX} - p_{ZG}$. Kadar v sistemu ni porabe HK pod tlakom (sistem »delovno miruje«), se črpalka pri tem tlaku (p_{MAX}): 1. razbremeni preko razbremenilnega ventila (RV) -

pretaka količino HK preko RV brez tlaka, ali pa 2. deluje pod tlakom, a ne »proizvaja« pretoka; natančneje rečeno le toliko pretoka, kolikor so lekažne izgube HS. To lahko velja le za nekatere »regulacijske« črpalke.

Potem, ko se črpalka razbremeni preko RV, iz HA izteka toliko HK, kolikor je notranja lekaža HS (zunanje lekaže pa itak ne sme biti!). Torej tlak v HS (in tudi v HA) upada od p_{MAX} do p_{ZG} . Ko upade do p_{ZG} , se tlačno delovanje črpalke ponovno vključi. »Uporabno delovanje« HA se v sistemu začne nekje med p_{MAX} in p_{ZG} , odvisno torej od trenutka potrebe po dodatni količini HK v HS. Zanesljiv začetek dodajanja HK iz HA je torej pri tlaku p_{ZG} in zato v HS dodajano količino HK pod tlakom lahko zanesljivo računamo le v območju tlakov $p_{ZG} - p_{SP}$. Če pa je bil začetek praznjenja - dodajanja HK v HS nad tlakom p_{ZG} , smo imeli »slučajno srečo«, ki pa je le občasna.

Razliko tlakov $p_{MAX} - p_{ZG}$ izbere projektant HS. Lahko jo izbere glede na razliko ploskvic varnostno-razbremenilnega ventila (enostavnejši HS - »na razpolago« so običajno razlike 10 %, 15 % in 25 %), lahko glede na histerezo tlačnega stikala, s katerim določi oba tlaka, ali pa dvojnega oziroma dveh tlačnih stikal, na katerih poljubno (ne glede na histerezo) izbere oba tlaka. Iz dosedanjega zapisa sledi, da se črpalka zelo pogosto tlačno razbremenjuje in ponovno obremenjuje, če je razlika tlakov $p_{ZG} - p_{SP}$ zelo majhna (pod cca 10 bar), ali/in če je notranja lekaža HS velika, ali če je HA majhen. Če v HS ni porabe (izvršilne komponente ne delujejo), naj bi črpalka (črpalke) razbremenjeno delovala vsaj cca 2 minuti, še bolje če več. V fazi projektiranja je to možno računsko določiti s pomočjo izračunov notranje lekaže HS.

Še to: tlak p_o lahko kontroliramo brez merilne opreme direktno s pomočjo vgrajenega manometra poleg HA (slika 4) takrat, ko hidravlika ne deluje. Ko je HA napolnjen s HK pod tlakom vsaj nekako do p_{ZG} , zapremo zapirni ventil od sistema do HA in zelo malo odpremo zapirni ventil od HA (by-pass mimo varnostnega ventila) v rezervoar. Ker smo zelo malo odprli, tlak v HA zelo počasi upada. Skrbno gledamo manometer; vrednost tlaka na manometru počasi upada in nato od neke vrednosti v trenutku upade na vrednost nič. Tlak, pri katerem se to zgodi, je tlak p_o ; namreč, ko meh v HA s plinom popolnoma zapolni prostornino V_o , zaradi (skoraj) nestisljivosti HK tlak v trenutku upade s tlaka p_o na 0.

4 Zaključek

Zelo pogosto so HA vgrajeni v hidravličnih sistemih (HS) za občasno dodajanje HK pod tlakom v HS, kadar je potreba po tem nesorazmerno velika in kratkotrajna. Ni smotno dimenzionirati črpalk na tako velike, a kratkotrajne pretoke. Pri takšnih HS vgradimo ustrezno velike HA, enega ali več. Izračun ustrezne celotne prostornine V_o akumulatorja in določitev ostalih parametrov (vrsta HA, vseh 5 mejnih tlakov: $p_o, p_{SP}, p_{ZG}, p_{MAX}, p_{MAX,HA}$) se izvede v fazi projektiranja HS.

V tem prispevku smo obravnavali značilne parametre delovanja HA. HS na sliki 4 ima vgrajen HA za dodajanje HK v sistem za tiste delovne operacije hidravlike, ko je poraba večja, kot je največja pretočna količina vgrajene črpalke.

Glavni projektant stroja poda projektantu hidravličnega sistema vrsto in število izvršilnih komponent ter potrebne sile (za HC), navore (za HM) in hitrosti delovanja. Včasih je treba v fazi projektiranja definirati tudi pospeške in pojemke izvršilnih komponent. Del tega, tudi ustrezne velikosti HC in HM, že podaja shema slike 4. Manjkajo pa hitrosti delovanja, sile in navori. Ko bodo ti parametri navedeni, bomo v članku naslednje številke Ventila podali postopek in matematični model za izračun potrebne prostornine V_o akumulatorja.

Vir

- [1] Majdič, F., Pezdernik, J.: Interno gradivo LFT; rezultati meritev, raziskav, . . .

Hydraulic Accumulator

An additional source of hydraulic pressure energy in hydraulic systems (HS) with disproportionate consumption

Abstract:

Hydraulic accumulators are installed in numerous HS for various tasks, but mostly to add pressurized hydraulic liquid (HL) in HS. In some HS, a large, far above-average amount of pressurized liquid HL is required for a few briefly recurring working movements of one or two hydraulic cylinders (HC) or hydro-motors (HM) within a longer working process of machinery. It would be nonsensical and impractical to design appropriate high displacement pumps for very short periods of exceptionally large quantities HL.

Figure 3 is used to illustrate very briefly the thermodynamic basis for pressure and volume changes inside HA, simplified for ideal gas.

The paper presents the four typical pressures and associated volumes during working processes of piston and bladder types of HA. The physical principles during the working phases of the accumulator are also briefly described.

The 4th figure in the paper shows an example of the hydraulic scheme of a hydraulic circuit with HA. The method and mathematical model for calculating the required volume V_o of HA will be presented in the next issue of periodical magazine Ventil.

Keywords:

power-control hydraulics (PCH), hydraulic system (HS), hydraulic accumulator (HA), hydraulic component, hydraulic liquid (HL), thermodynamic