



N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa
Savska cesta 16/5a, 10 000 Zagreb

Mjerenje razine, 2. dio

Tlačno (hidrostatsko) mjerenje razine

Jedan od najstarijih i još uvijek najčešćih načina mjerenje razine kapljevina je hidrostatski, odnosno tlačni. Vjerojatno još uvijek ima najveći tržišni udio, ali predviđa se njegov pad.

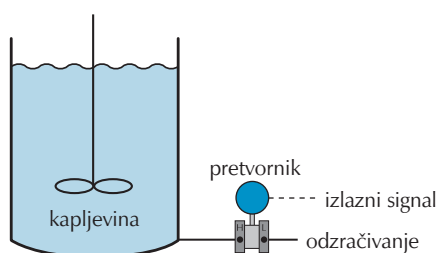
Pretvornici tlaka rabe se za mjerenje tlaka pare, plinova i kapljevina u industrijskim postrojenjima. Još češće se rabe za mjerenje protoka i razine kapljevina u spremnicima. Robusni su i već uhodani dugogodišnjom primjenom u različitim industrijama.

Tlak stupca tekućine

Blaise Pascal je 1648. dokazao da stupac zraka pritišće na zemlju i čini atmosferski tlak. Isto vrijedi i za stupac kapljevina. Vertikalni stupac kapljevina u posudi stvara pritisak na dno zbog težine stupca uslijed djelovanja gravitacije. Što je veća vertikalna visina kapljevina, to je veći tlak bez obzira na širinu ili oblik posude. Na taj način mjerenjem tlaka zaključujemo o razini (visini) kapljevina u posudi poznavajući njezinu gustoću, slika 1:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

pri čemu su p hidrostatski tlak, ρ gustoća tekućine (kg m^{-3}), g akceleracija sile teže, a h visina stupca iznad mjerne točke.



Slika 1 – Mjerenje tlaka na dnu posude¹

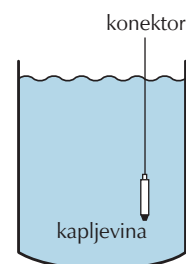
Senzori hidrostatskog tlaka mogu biti uronjeni ili ugrađeni s vanjske strane. Za te senzore važno je odabrati kemijski kompatibilne materijale koji su u kontaktu s procesnim medijem.

Budući da ovi pretvornici mjere porast tlaka s dubinom koji ovisi o gustoći, pretvornik mora biti umjeren za pojedini medij. Uz to veće varijacije temperature uzrokuju promjene gustoće što treba uzeti u obzir kad se tlak preračunava u razinu.

Potopne sonde

Pri mjerenju razine s potopnom sondom (engl. *submersible pressure transmitter*) mjeri se hidrostatski tlak kapljevina na temelju čega se određuje razina.

Kod otvorenih spremnika potopna sonda koja visi na kablu uranja se na dno spremnika ili cijevi. Sonda je izvedena tako da je elektronički dio dobro zabrtvljen od kapljevina u koju je uronjena, slika 2. U spremnicima s malim tlakovima važno je odzračiti stražnji dio mjernog pretvornika na atmosferski tlak jer će promjena okolnog (barometarskog) tlaka uzrokovati mjernu pogrešku.



Slika 2 – Potopne sonde mjere tlak koji se preračunava u razinu

Prednosti tlačnih mjerila su niska nabavna cijena, dobro poznata univerzalna tehnologija, jednostavan odabir, kompatibilnost s raznim medijima. Pjenjenje, promjena vodljivosti ili dielektrične konstante ne utječu na mjerenje i pouzdanost.

Za mjerenje razine kapljevina u zatvorenom spremniku (pod tlakom) mjerilo relativnog tlaka mjerit će hidrostatski tlak kapljevina, ali i tlak iznad kapljevina. Stoga je, da bismo odredili razinu, potrebno mjeriti razliku tlakova (diferencijalni tlak), Δp . U tom će slučaju pretvornik mjeriti tlak pri dnu spremnika i iznad očekivane najveće razine kapljevina. Razlika tlaka bit će mjera razine.

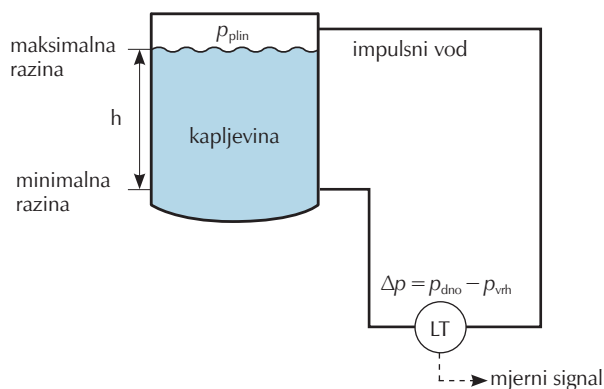
Pretvornici se spajaju na spremnik pomoću prirubnice ili navoja. Pažnju treba obratiti na temperaturu plina/para u zatvorenom spremniku. Ako temperatura nije visoka, na grani pretvornika s manjim tlakom (engl. *low side*) može se primijeniti tzv. suhi spoj (engl. *dry leg*) pri čemu je plin/para u izravnom doticaju s dijafragmom mjernog pretvornika. Ako se pak radi na višim temperaturama (npr. kotao), mora se izvesti mokri spoj (engl. *wet leg*). Njime se vod napuni medijem koji izolira pretvornik od topline. Standardni pretvornici mogu podnijeti temperaturu do približno 120 °C. Ako se za više temperature i dalje preferira hidrostatsko mjerenje, postoji bolje, ali skuplje rješenje. Daljinske membranske brtve (engl. *remote diaphragm seals*) na slici 3 primjenjuju se kad je temperatura previsoka, procesni medij viskozozan ili sadrži krute čestice i sl.

* Prof. dr. sc. Nenad Bolf
e-pošta: bolf@fkit.hr



Slika 3 – Prirubnice i vodovi za daljinsko mjerenje razlike tlakova

Daljinski pretvornici tlaka s tzv. dijafragmom su pretvornici tlaka spojeni na udaljene brtve dijafragme impulsnim vodovima ispunjenim kapljevnom poput silikona. Njima se može mjeriti samo jedan relativni tlak (jedna brtva dijafragme) kod otvorenih spremnika ili razlike tlakova (dvije brtve dijafragme) za zatvorene spremnike, slika 4. Tlak plina/para sada pritišće membranu udaljene dijafragme koja pritišće kapljevnu u vodu koja pak pritišće membranu pretvornika koja pritišće kapljevnu unutar pretvornika koja, konačno, pritišće osjetilni element pretvornika.



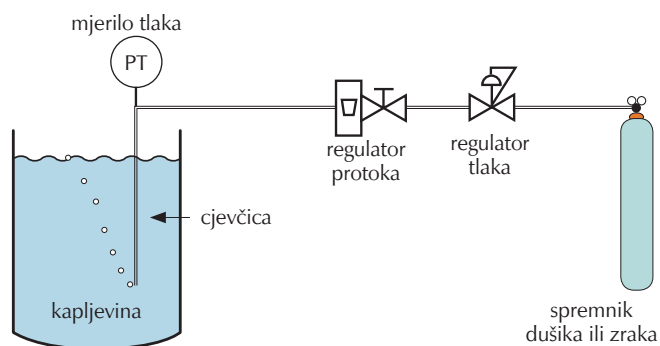
Slika 4 – Mjerenje razine u zatvorenom spremniku primjenom pretvornika razlike tlakova²

Mjerenje razine propuhivanjem

Pneumatski sustavi s mjehurićima plina (zraka) (engl. *air bubbler*) nemaju pokretne dijelove, što ih čini pogodnima za mjerenje razine u sustavima kanalizacije, odvodne vode, mulja iz kanalizacije, septičkih jama ili vode s velikim količinama suspendiranih krutina. Jedini dio senzora koji je u kontaktu s kapljevnom je cjev(čica) malih dimenzija (obično 1/4 ") iz koje izlaze mjehurići, slika 5. Pretvornik tlaka mjeri tlak koji stvara težina kapljevne. Na mjernom mjestu nema električnih komponenata, pa je dobar izbor za klasificirane opasne zone.

Za točno mjerenje potrebno je održavati mali protok kroz cjevčicu, čime se tlak posljedično prenosi na mjesto pri dnu spremnika (uz mali pad tlaka koji nastaje protokom kroz cjevčicu).

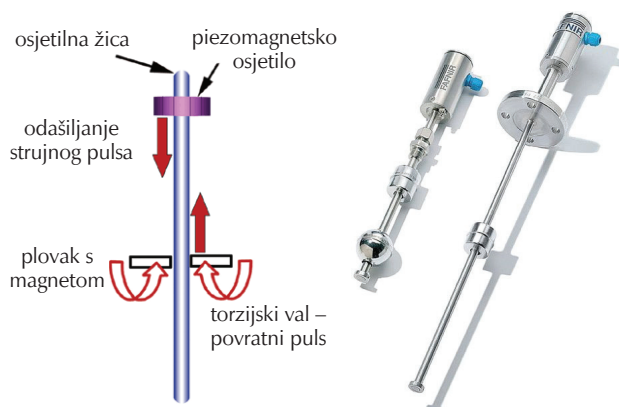
Da bi pad tlaka u cjevčici bio nizak, protok treba biti oko 0,5 l min⁻¹. Protok se može održavati regulatorom protoka uz varirajući nizvodni (*downstream*) tlak. To će još poboljšati mjerenje jer minimalizira tzv. *offset*. Tlak na mjerilu protoka treba biti postavljen na vrijednost dovoljno visoku da prevlada povratni tlak razine kapljevne i minimalni pad tlaka na regulatoru protoka. Dovodni tlak od približno 2 bar dovoljan je za mjerenje razina do 10 m.



Slika 5 – Mjerenje razine propuhivanjem³

Magnetostruktivni pretvornici razine

Magnetostruktivna osjetila razine izvedena su tako da je u plovak, koji putuje gore i dolje po vodilici u kojoj se nalazi magnetostruktivna žica, umetnut trajni magnet. Primjenjuju se za kontinuirano mjerenje razine visoke točnosti za širok spektar kapljevne. Plovak se odabire shodno gustoći kapljevne i kemijskoj kompatibilnosti s mjerenim medijem.



Slika 6 – Načelo djelovanja magnetostruktivnih pretvornika razine⁴

Za određivanje položaja plovka prati se brzina torzijskog vala duž žice, slika 6. Osjetilna žica povezana je s jedne strane na piezo-keramičko osjetilo, a s druge strane je učvršćena. Pretvornik šalje kratak strujni puls niz žicu, čime se uspostavlja magnetsko polje – u tom trenutku počinje se mjeriti vrijeme. Magnetsko polje dolazi u međudjelovanje s poljem koje stvaraju magneti ugrađeni u plovak. U kratkom vremenu dok struja prolazi na žici stvara se torzijska sila – ta sila putuje nazad do piezo-osjetila koje detektira torzijski val i bilježi vremenski interval od početka strujnog impulsa do dolaska na osjetilo. Na taj način se detektira lokacija plovka i preračunava u signal iz kojeg se računa trenutna razina.

Prednost tog načina je u točnosti i činjenici da signal ne ometa pjena, divergencija vala ili tzv. "lažni" eho. Jedini pokretni dio je plovak.

Zbog visoke točnosti primjenjuje se kod komercijalnih transakcija. Također se često primjenjuje na magnetskim vizualnim pretvornicima. U toj je varijanti magnet ugrađen u plovak koji putuje unutar mjernog stakla ili cijevi. Magnet djeluje na senzor koji je vanjski ugrađen na mjerilo. Ta se izvedba primjenjuje za kotlove i pri visokim temperaturama ili tlakovima.

Magnetostrikcija (lat. *magnes*, genitiv *magnetis* < grč. *Μαγνήτις λίθος*: kamen iz Magnezije + kasnolat. *strictio*: stezanje) je pojava pri kojoj se mijenja duljina tijela načinjenih od feromagnetičnih materijala pod utjecajem magnetskoga polja. Težnja potkovastoga tijela od feromagnetičnoga materijala da se u longitudinalnom magnetskom polju ispravi također se pripisuje toj pojavi. Uzrok magnetostrikcije je promjena kristalne rešetke feromagnetičnoga materijala pod utjecajem magnetskoga polja, jer se njezini dijelovi nastoje postaviti u smjeru magnetskoga polja. Pojava magnetostrikcije iskorištena je u tehnici za produkciju zvučnih valova visoke frekvencije (ultrazvuk) i velikih amplituda s pomoću magnetostrikcijskih rezonatora.⁵

Magnetostrikcija je odgovorna za zvuk koji proizvode transformatori i drugi uređaji sa željeznim jezgrama koji rade na izmjeničnu struju. To je slična pojava piezoelektričnom efektu. Fizikalne pojave promjene mehaničkih svojstava ili geometrijskog oblika pod djelovanjem magnetskog polja nazivaju se izravnim magnetomehaničkim učincima, a pojave kad se mehaničkim naprežanjem mijenja magnetizacija uzorka nazivaju se inverznim magnetomehaničkim učincima.

Zanimljivost

Dana 28. ožujka 1979. tisuće ljudi je evakuirano s Otoka tri milje u Pensilvaniji (SAD), kad se pokvario rashladni sustav nuklearnog reaktora. Ta havarija nastala je jer su regulatori razine isključili protok rashladne vode prema reaktoru pošto su detektirali da je rashladna voda dosegla vrh spremnika. Voda, zapravo, nije dosegla vrh posude, već je vode bilo premalo, pa je došlo do ključanja i do prekrivanja vrha.

Detektori razine

Detektori razine (engl. *point level sensors*) određuju diskretno razinu kapljevina, odnosno dojavljuju samo određenu razinu. Ta vrsta osjetila primjenjuju se kao alarm u slučaju previsoke ili preniske razine kapljevina, dočim se kontinuiranim mjerenjem neprekidno prati razina u spremnicima.

Detektori razine kapljevina

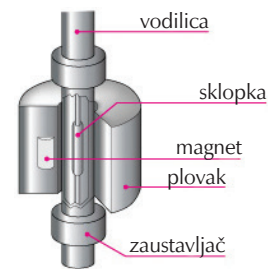
U tipične detektore razine kapljevina spadaju magnetski i mehanički plovci, tlačni senzori, senzori elektrovodljivosti ili elektrostatički (kapacitivnost ili induktivitet) detektori. Za detekciju se mogu primijeniti i beskontaktna mjerila koja se rabe za kontinuirano mjerenje (prikazana u prvom dijelu priloga o mjerenju razine) kao što su ultrazvučno, radarsko ili optičko.

Plovci

Magnetski, mehanički i drugi plutajućih detektori otvaraju ili zatvaraju mehaničke sklopke, bilo izravnim kontaktom sa sklopkom, bilo magnetskim djelovanjem. Sklopka s plovkom (engl. *float switch*) jednostavni je detektor razine. Plovak koji u sebi ima magnet što se pomiče kako se mijenja razina kapljevina pokreće hermetički zatvoren sklop unutar cijevi. Kod magnetske sklopke (engl. *reed switch*) prebacivanje se desi kad trajni magnet unutar plovka dostigne razinu aktiviranja, slika 7. Kod mehanički aktiviranog plovka prebacivanje se događa kao rezultat pomicanja plovka prema minijaturnom (mikro) prekidaču.

Plovke karakterizira ponovljivost i otpornost na stres, vibracije i promjene tlaka. Prikladni su za različite medije, čemu se prilagođava i materijal od kojeg su izrađeni. Zahtijeva minimalno odr-

žavanje, a instalacija je jednostavna. Potrebno je razmotriti kemijsku kompatibilnost, temperaturu, gustoću, uzgon i viskoznost.



Slika 7 – Plovak na vodilici. U plovku je magnet, a magnetska sklopka se nalazi na vodilici u visini radne točke. Sklopka se otvara ili zatvara kako plovak ide gore ili dolje na vodilici.

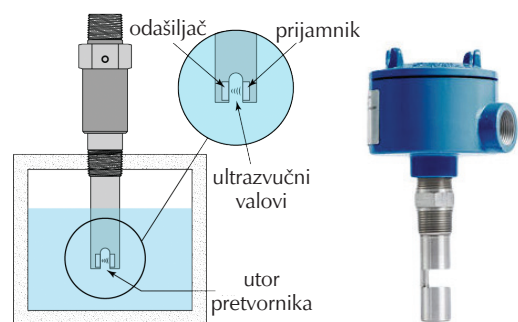
Plovak se može dizajnirati tako da bude zaštićen od turbulencije i valova. Kod organskih otapala treba provjeriti jesu li kemijski kompatibilni. Ne bi se trebali primjenjivati s kapljevina visoke viskoznosti, muljevima ili ljepljivim kapljevina koje se mogu lijepiti za vodilicu ili plovak.

Posebna primjena plutajućih senzora je određivanje granice faza u sustavima za odvajanje ulja i vode. Primjenjuju se dva plovka dviju veličina tako da odgovaraju gustoći ulja i gustoći. Na vodilicu je moguće ugraditi i senzor temperature. Magnetski detektori popularni su zbog jednostavnosti, pouzdanosti i niske cijene.

Kontakna ultrazvučna osjetila

Kontaktne ultrazvučne sklopke detektiraju razinu kapljevina, u točki primjenom ultrazvuka niske razine. Mjerilo se sastoji od osjetila ugrađenog na mjernom mjestu s integriranim pojačalom, slika 8. Osjetilo ima utor (engl. *gap*) obično od $\frac{1}{2}$ " duž kojeg se generira nečujan, visokofrekvencijski ultrazvučni signal. Kad u utor uđe kapljevina, ultrazvučni signal lako prolazi, a relej se prebaci. Kod horizontalno ugrađenih osjetila razina na koju sustav reagira je na približno pola visine utora. Ako se kapljevina spusti ispod te razine, ultrazvučni signal se prigušuje i relej se prebacuje nazad u prethodno stanje.

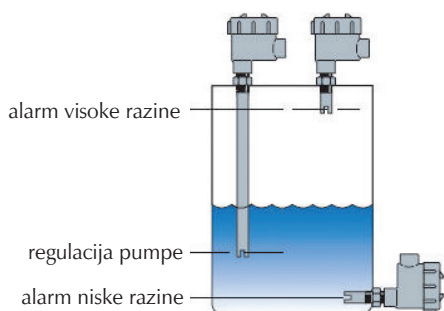
Ta vrsta sklopki rabi se u posudama ili cijevima za automatsku regulaciju pumpi, elektromagnetskih ventila i/ili za alarm previsoke, odnosno preniske razine, slika 9. Sklopke su prikladne za većinu kapljevina i na njih ne utječu naslage, prijanjajuće kapljice, pjena ili para. Osjetilo nije potrebno umjeravati niti ugađati.



Slika 8 – Izvedba ultrazvučnog detektora⁶

Pneumatski detektori razine

Pneumatski detektori razine primjenjuju se u opasnim uvjetima, gdje nema električne energije ili pri radu s teškim muljevima ili



Slika 9 – Tipična primjene ultrazvučnih detektora razine⁷

kašastim materijalom. Budući da se za aktiviranje sklopke rabi kompresija stupca zraka na membranu, procesna kapljevina nije u kontaktu s pokretnim dijelovima senzora. Ti su senzori prikladni za upotrebu s vrlo viskoznim kapljevina poput masti, kao i s kapljevina na bazi vode, ali i korozivnim kapljevina. Radi se o relativno jeftinijoj tehnici detekcije razine.

Detektori razine vodljivosti s elektrodama

Senzori vodljivosti (engl. *conductive (electrode-based) level sensors*) idealni su za detekciju razine vodljivih tekućina kao što je voda, a posebno su pogodni za korozivne kapljevine poput kalcijevih sode, klorovodične kiseline, dušične kiseline, željezova klorida i sličnih kapljevina. Za one vodljive kapljevine koje su korozivne, elektrode senzora rade se od titana, Hastelloya B ili C ili nehrđajućeg čelika 316 i izolirane odstojnicima, separatorima ili držačima od keramike, polietilena i materijala na osnovi teflona.

Dvije elektrode ugrađene su iznad površine vodljive kapljevine koju treba nadzirati. Ako razina kapljevine naraste do točke u kojoj su obje elektrode u dodiru s kapljevina, zatvoren je strujni krug preko elektroda i kapljevina što aktivira sklopni signal. Minimalna vodljivost kapljevina mora biti $10 \mu\text{S cm}^{-1}$. Te uvjete ispunjavaju praktički sve vodljive kapljevine, kao što su voda, kiseline i lužine, s izuzetkom čistih otapala.

Tom metodom mjerenja može se lako i ekonomično detektirati granica faza. Određuje se granična vrijednost između vode i nevodljive kapljevina, posebno kod separatora ulja i benzina.

Pretvornici za detekciju i kontinuirano mjerenje razine

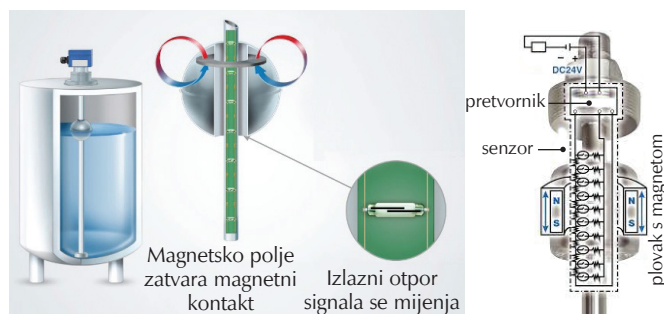
Otpornički senzori razine

Otpornički serijski (lančani) senzori (engl. *resistive chain level sensors*) slični su magnetskim plovcima jer se trajni magnet unutar plovka pomiče gore i dolje po vodilici u koju su pričvršćene sklopke aktivirane magnetom (*reed* relejne sklopke) i otpornička mreža, slika 10. Kad su sklopke zatvorene, otpori se zbrajaju i pretvaraju u strujni ili naponski signal proporcionalan razini kapljevina.

Izbor materijala za plovak i vodilicu ovisi o kemijskoj kompatibilnosti kapljevina, gustoći i drugim faktorima koji utječu na uzgon. Ti senzori prikladni su za mjerenje u kemijskoj, prerađivačkoj industriji, preradi hrane, obradi otpada i dr.

Detektori razine i kontinuirana mjerila razine krutina

Postoji veći broj detektora razine krutina – vibrirajuća, rotirajuća elisa (lopatica), mehanička (dijafragma), mikrovalna (radar), kapacitivna, optička i ultrazvučna.



Slika 10 – Permanentni magnet ugrađen u plovak uz pomoć magnetskog polja "okida" otpornički lanac unutar cjevčice. Ugrađeni pretvornik šalje signal (4 – 20 mA) proporcionalan razini. Na dnu cjevčice može biti ugrađen i senzor temperature.⁸

Vibrirajući detektori razine

Sonde vibrirajućeg detektora dobro su rješenje za sipine i rasute praškove. Projektirani su za detekciju razine vrlo finih prašaka ($0,02 - 0,2 \text{ g cm}^{-3}$), prašaka (gustoća: $0,2 - 0,5 \text{ g cm}^{-3}$) i granulirane krutine ($0,5 \text{ g cm}^{-3}$ ili više). Uz pravilan odabir frekvencije vibriranja i podešavanje osjetljivosti može se određivati i razina fluidiziranih prašaka i elektrostatskih materijala, a nakupljanje medija je minimalno.

Rotirajući detektori razine

Rotirajući detektor razine s lopaticama (engl. *rotating paddle level sensors*) standardna je tehnika mjerenja razine rasutih tvari (sipina). Tehnika zahtijeva zupčasti motor malog broja okretaja koji okreće lopaticu. Kad se lopatica zaustavi na čvrstom materijalu, motor se okreće na svojoj osovine vlastitim momentom dok pribubnica postavljena na motor ne dotakne mehanički prekidač. Lopatice se izrađuju od materijala koji ne dopušta stvaranje naslaga (zbog mokrine ili okolne vlage) ljepljivog materijala.

Literatura

- URL: <https://instrumentationtools.com/basics-of-hydrostatic-level-measurement/> (5. 6. 2021.).
- URL: <https://www.google.com> (5. 6. 2021.).
- URL: <https://www.brooksinstrument.com/en/blog/liquid-level-measurement-using-the-bubbler-method> (5. 6. 2021.).
- URL: <https://www.fierceelectronics.com/components/a-dozen-ways-to-measure-fluid-level-and-how-they-work> (5. 6. 2021.).
- URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetostrickija>, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, 2016. (5. 6. 2021.).
- URL: <https://solutionswithinnovation.com/ultrasonic-gap-switch/> (5. 6. 2021.).
- URL: <https://www.gemssensors.co.uk/customersupport/literature-pdfs/operating-principle-installation-and-maintenance/ultrasonic-installation> (5. 6. 2021.).
- URL: https://www.wika.com/en-en/rlt_3000.WIKA (5. 6. 2021.).
- URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Level_sensor (5. 6. 2021.).
- Keith Larson, Essentials of level instrumentation, Control, Technology report, Level Measurement, Part 1, Putman Media.