



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, 1. dio

Odrediti koliko je tvari u spremniku, reaktoru ili u silosu doista nam ne izgleda kao težak zadatak. No kad se suočimo s tim pitanjem, vidjet ćemo da na raspolaganju stoji iznenađujuće velik broj opcija razvijenih za prevladavanje ili prilagodbu posebnim zahtjevima kojih ne nedostaje. Metode mjerenja razine obradit ćemo, stoga, u dva nastavka.

Razinu kapljevine u spremnicima potrebno je održavati. U suprotnome, spremnik se može u potpunosti isprazniti te doći do oštećenja opreme (npr. pumpe), ili prelijevanja u slučaju otvorenih spremnika, odnosno istjecanja plina u zatvorenim spremnicima. Dakle, razina može bitno utjecati na odvijanje procesa, a najbolji primjer su kemijski reaktori.

Izmjerena razina primjenjuje se za izračun dostavljenih količina u prodaji, proračun zaliha na postrojenjima, operativne i sigurnosne svrhe. Rezultati mjerenja često se primjenjuju u sustavu naplate i moraju biti točni, ponovljivi i pouzdani u skladu s industrijskim ili nacionalnim normama. Visoka točnost zahtijeva se kod prodaje i tarifiranja. S druge strane, obnovljivost i preciznost bitne su za spremnike i reaktore u procesima u kojima je potrebno dobro vođenje i stabilan rad cjelokupnog postrojenja. U tim slučajevima pouzdanost i ponovljivost mjerenja razine važniji su od točnosti.

Razina se obično izražava u postocima ukupne visine (0 – 100 %), a rjeđe fizikalnim jedinicama duljine (m, cm, mm), odnosno visine.

U primjeni najčešće nailazimo na sljedeća mjerna načela:

**Plutanje:** Plovak lakši od kapljevine pluta po površini i slijedi promjenu razine kapljevine. Njegov položaj mjera je razine i količine kapljevine.

**Istiskivanje:** Prema Arhimedovom zakonu, na tijelo uronjeno u kapljevinu djeluje sila uzgona jednaka težini istisnute kapljevine. Stoga se tijelo nešto veće gustoće od kapljevine uranja u tu kapljevinu, a količina istisnute kapljevine, mjerena težinom tijela u kapljevinu, rabi se za određivanje razine.

**Razlika tlakova:** Razlika tlakova između dviju točaka u spremniku ovisi o razini kapljevine i njezinoj gustoći. Ako je razlika u gustoći između tekućina znatna, npr. u slučaju plina i kapljevine, izmjerena razlika tlakova mjera je visine kapljevine.

**Kapacitivno:** Metalna sonda uronjena je u spremnik. Kapacitet kondenzatora koji čine sonda i stijenka spremnika ovisi o razini. Mjerenjem kapaciteta koji ovisi o dielektriku između ploča kondenzatora određuje se razina kapljevine u spremniku.

Ta načela spadaju u kontaktna mjerenja razine. Postoji i velika skupina **beskontaktnih** mjernih pretvornika razine koje ćemo prve predstaviti.

### Kontinuirano mjerenje ili indikacija razine

Pretvornike za kontinuirano mjerenje razine nalazimo u svim procesnim pogonima. Spremnici su različitih veličina i oblika. Neka osjetila nisu ugrađena izravno u posudama, već u tzv. *bypass*-komorama povezanim usporedno s posudama. *Bafer*-spremnici i međuspremnici nalaze se često na postrojenjima. Jednostavniji su za mjerenja jer ne zahtijevaju visoku točnost, dok kotlasti reaktori i spremnici s miješanjem ili agitacijom mogu biti problematični za mjerenje.

Indikatori razine (engl. *point level*, *level switch*) često su ugrađeni zajedno s kontinuiranim mjerilima razine za provjeru ili dojavu visoke i niske razine (alarmi!). Međutim, mogu se primjenjivati i samostalno kad je dovoljna samo indikacija popunjenosti ili ispraznjenosti spremnika. Kad je u pitanju sigurnost i zaštita okoliša primjenjuju se redundantni indikatori razine na mjernim načelima koja su drugačija od primarnih mjerila razine. Tako dobivamo nezavisnu zaštitu od prelijevanja ili pražnjenja spremnika, odnosno pojave opasnih stanja.

### Ključna pitanja pri odabiru mjernih pretvornika razine

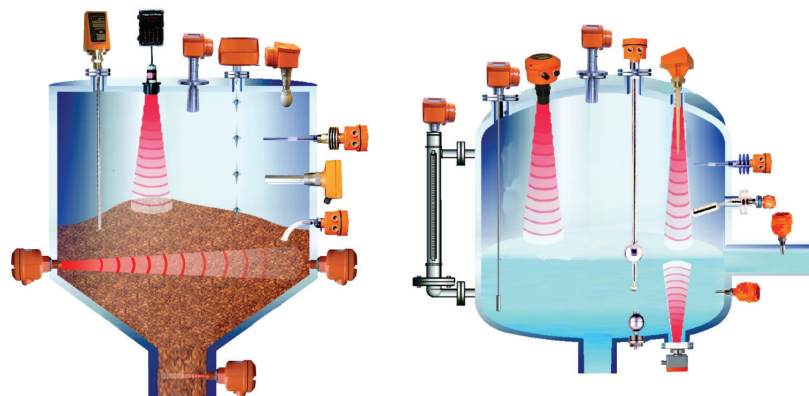
- Može li se senzor razine umetnuti u posudu ili je potrebna vanjska montaža?
- Je li potrebno kontinuirano mjerenje razine ili je dovoljna indikacija određene razine (npr. preniske ili previsoke)?
- Može li senzor biti u kontaktu s procesnim medijem ili mora biti izoliran?
- Tolerira li se pad tlaka u posudi ili prekid procesa kad je potrebno servisirati ili zamijeniti osjetilo razine?
- Je li medij u spremniku viskoznan, muljevit ili pjenast? Radi li se o kapljevitost, praškastost, ljepljivosti tvari ili krutim česticama?

Razmatranjem navedenih točaka na samom početku bitno ćemo skratiti popis mjernih pretvornika koji dolaze u obzir. Odabir se dalje sužava razmatranjem konstrukcijskih materijala, traženom točnosti, radnom temperaturom itd. Kad se mjeri razina krutina, mulja, pjene ili granični sloj između dvaju slojeva kapljevine, treba se savjetovati sa stručnjacima, a osnovne savjete objavit ćemo u drugom nastavku ovog priloga.

\* Prof. dr. sc. Nenad Bolf  
e-pošta: [bolf@fkit.hr](mailto:bolf@fkit.hr)

## Beskontaktno mjerenje razine

Najčešće tehnike beskontaktnog mjerenja razine su ultrazvučna, mikrovalna (radarska), nuklearna, laserska i vagarska. Svaka ima i dobrih i loših strana. Npr. radarska je relativno skupa kad je potrebna veća točnost mjerenja, dok je nuklearna tehnika ograničena na relativno male posude, a treba pripaziti i na sigurnost. Laseri nalaze primjenu za mjerenje rasutih krutina i praha. Sustavi za vaganje imaju također svoju nišu primjene za različite posude (kotlasti reaktori, dozatori, spremnici i sl.). Od navedenih najčešće se primjenjuje ultrazvučno mjerenje. Primjenu nalaze u procesnoj industriji, ali i za mjerenje protoka u otvorenim tokovima (kanalima).



Slika 1 – Mjerni pretvornici razine – kontinuirano mjerenje i indikatori razine

### Ultrazvučni pretvornici razine

Ultrazvučni pretvornici šalju i primaju ultrazvučni pulsni signal frekvencije 20 – 200 kHz koji se širi brzinom zvuka. Signal dolazi do površine medija i odbija se nazad do prijemnika. Mjeri se vrijeme potrebno da puls stigne do površine i reflektira se nazad. Signal se širi u obliku stošca koji se pod određenim kutom širi od osjetila prema mediju. Nakon odbijanja od površine medija puls se vraća na prijemnik signala, koji ga zatim obrađuje i pretvara u izlazni signal pretvornika. Vrijeme putovanja signala je izravno proporcionalno udaljenosti od površine.

Ultrazvučni pretvornici razine odlično su rješenje su za beskontaktno mjerenje razine veoma viskoznih kapljevina kao što su teška ulja, masnoće, lateks i kaše, kao i krutih tvari poput cementa, pijeska, žitarica i peleta.

Budući da se brzina zvuka u zraku mijenja s vlažnosti i temperaturom, na ultrazvučne senzore razine utječu i promjena vlage, temperature i tlaka. S promjenom temperature mijenjaju se karakteristike piezokristala koji emitira ultrazvučne pulseve, što izaziva promjenu frekvencije emitiranog pulsa. Da bi se izbjegla pogreška u mjerenju, postoji ugrađeno osjetilo temperature za kompenzaciju signala. Kad se ultrazvučni pretvornici primjenjuju zajedno s osjetilima vlažnosti i temperature ili referentnom udaljenosti, može se primijeniti automatska korekcija što mjerenje čini izuzetno točnim.

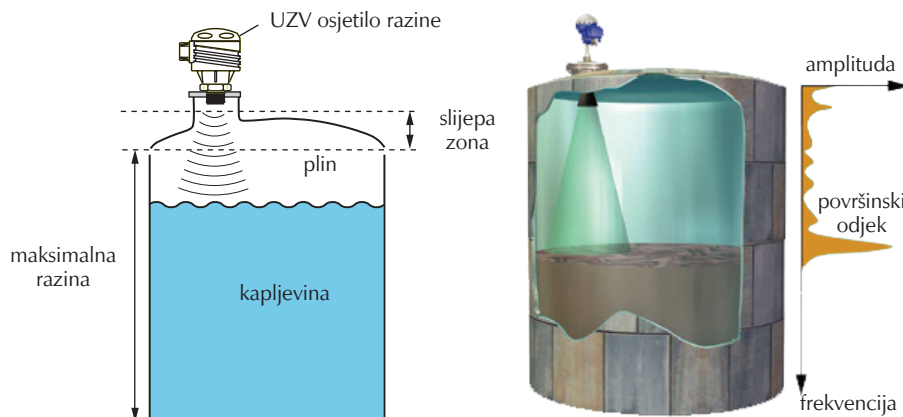
Turbulencije, pjenjenje, pojava pare i promjene koncentracije procesnog medija također utječu na odziv ultrazvučnog pretvornika. Turbulencija i pjena onemogućuju pravilno odbijanje

zvučnog vala s površine. Para deformira i/ili apsorbira zvučni val. Promjena koncentracije uzrokuje promjenu količine energije zvučnog vala koja se reflektira natrag na senzor. Ti problemi rješavaju se primjenom vodilica vala (engl. *wave guides*) i zaštitnih komora (engl. *stilling wells*).

Za točnost mjerenja važno je da je osjetilo ugrađeno pod pravim kutom (90°) prema mjerenoj površini. Ako tome nije tako, signal se neće reflektirati izravno prema osjetilu, pa izmjereno vrijeme neće biti proporcionalno stvarnoj razini. Čak i mala neusklađenost senzora u odnosu na površinu materijala smanjuje količinu zvučnog vala koji detektira pretvornik. Uz to, u posudi ne bi smjelo biti prepreka kao što su nosači, pregrade ili ljestve jer se javlja "lažni eho".

Zbog velike amplitude pulsa ponekad se javlja mehaničko vibriranje osjetila (engl. *ringing*). Te vibracije moraju se prigušiti prije obrade signala. To je razlog postojanja "slijepe zone" u kojoj se ne može mjeriti. To je udaljenost koju je potrebno ostaviti od mjesta emitiranja pulsa do maksimalne moguće razine medija, slika 2.

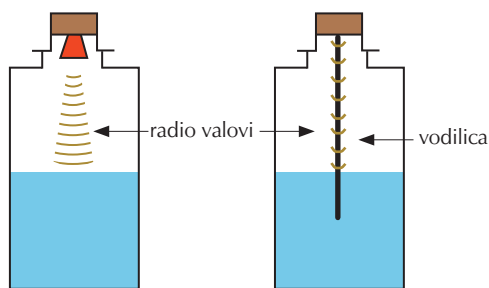
Napredna elektronička i softverska obrada signala čini ultrazvučno mjerenje "inteligentnim". Postoje tako ultrazvučna mjerila koja rade kao indikatori razine, kontinuirana mjerila, ili oboje. Mikroprocesor i relativno mala potrošnja energije omogućuje komunikaciju radi umjeravanja i filtriranja signala, daljinski bežični nadzor ili mrežnu komunikaciju. Ultrazvučni pretvornici danas imaju široku primjenu zahvaljujući povoljnoj cijeni i funkcionalnosti.



Slika 2 – Ultrazvučno mjerenje razine

### Mikrovalni (radarski) pretvornici razine

Radarsko mjerenje razine temelji se na mjerenju vremena potrebnog da se mikrovalni signal (GHz) emitiran s osjetila, nakon refleksije od površine medija čija se razina mjeri, vrati na prijemnik signala. Antena osjetila odašilje mikrovalove prema površini medija. Frekvencija mikrovalova kontinuirano se modulira. Prijemnik signala prima dio energije koja se reflektira od površine, a određuje se vrijeme potrebno da signal stigne natrag do pretvornika (engl. *time of flight*), slika 3.



Slika 3 – Mjerenje razine radarskim pretvornikom

Standardne tehnike, prikazane na slici 3, su:

- a) neinvazivne (pulsni radar i kontinuirani val s moduliranom frekvencijom);
- b) invazivne (primjenjuje se vodilica – žica ili šipka uronjena unutar spremnika).

Potonji se primjenjuju u prašcima i medijima niske dielektričnosti koji nisu dobri reflektori elektromagnetske energije. No, postoje ista mehanička ograničenja koja uzrokuju probleme kao i kod kapacitivne tehnike mjerenja.

Mikrovalovi se šire brzinom svjetlosti. Vrijeme širenja proporcionalno je udaljenosti  $d$ :

$$d = (c \cdot t) / 2,$$

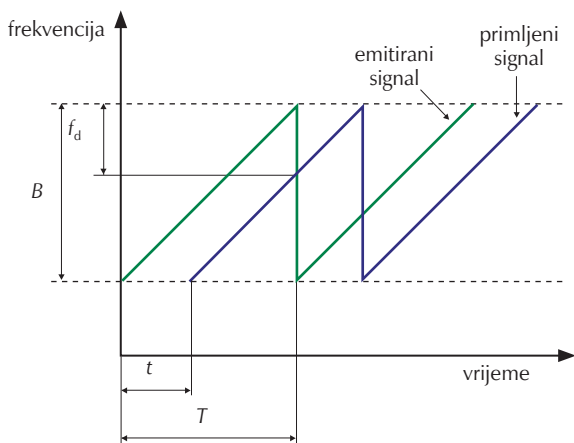
pri čemu su  $d$  – udaljenost,  $t$  – vrijeme širenja vala i  $c$  – brzina svjetlosti.

Signal koji dolazi na prijmnik ima različitu frekvenciju od signala koji se u tom trenutku emitira s antene. Razlika frekvencija,  $f_d$ , povezuje emitirani i primljeni signal, a proporcionalna je udaljenosti  $d$  od površine medija:

$$f_d = (2 \cdot B \cdot d) / (T \cdot c),$$

pri čemu su  $B$  – širina pojasa modulacije frekvencije,  $d$  – udaljenost,  $T$  – trajanje modulacije i  $c$  – brzina svjetlosti. Iz ove relacije slijedi udaljenost površine od antene, odnosno razine, slika 4:

$$d = (f_d \cdot T \cdot c) / (2 \cdot B).$$



Slika 4 – Određivanje razlike frekvencija

Mikrovalni pretvornici prikladni su za primjenu u vlažnom i/ili prašnjavom okruženju, tamo gdje je prisutna para i gdje varira temperatura. Mikrovalovi nemaju problema s parom i temperaturom poput ultrazvuka. Radi se o elektromagnetskim valovima kojima nije potreban medij za prijenos energije pa su prikladni i

za mjerenje pri niskom apsolutnim tlakovima (vakuum). Mikrovalovi se reflektiraju od objekata visoke dielektričnosti poput metala i vodljivih kapljevina. Također ih apsorbiraju (u različitim stupnjevima) izolatori i tvari male dielektričnosti poput plastike, stakla, papira, prašaka i drugih čvrstih tvari.

Mikrovalni pretvornici izvode se u dvije osnovne tehnike modulacije signala:

1. reflektometrija u vremenskoj domeni (engl. *time-domain reflectometry*, TDR) koja mjeri vrijeme i dijeli ga s brzinom svjetlosti, kao i ultrazvučni pretvornici;
2. Dopplerov način mjerenja s tehnikom FMCW (engl. *frequency-modulated continuous-wave*) u kojoj se ne mjeri vrijeme, već razlika frekvencija što omogućuje točnije mjerenje razine.

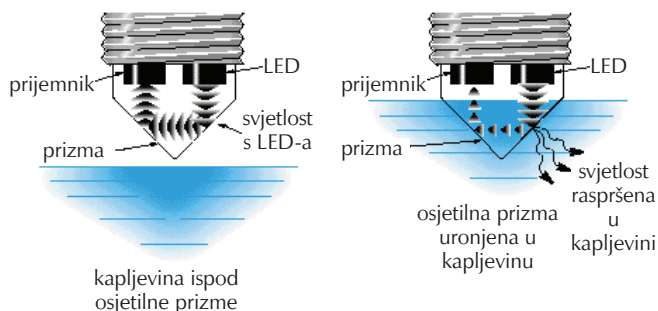
Mjerenje se, kao i kod ultrazvučnih pretvornika, provodi na različitim frekvencijama, od 1 do 30 GHz. Općenito, što je frekvencija veća, mjerenje je točnije i skuplje.

Na mjerni signal ne utječe stvaranje naslage na staklenom ili plastičnom oknu kroz koji prolazi snop, niti visoka temperatura, tlak ili vibracije. Ti pretvornici ne zahtijevaju fizički kontakt s procesnim materijalom, tako da se odašiljač i prijmnik mogu postaviti na sigurnoj udaljenosti. Imaju i sve prednosti ultrazvučni pretvornika: mikroprocesor za obradu signala i praćenje, komunikaciju i dijagnostiku. Uz to, rješavaju neka ograničenja primjene ultrazvuka: rad pod visokim tlakom i vakuumom, visoke temperature, prašina, slojevi i pare i temperature. Glavni nedostatak je relativno visoka cijena takvih mjernih pretvornika.

### Optički indikatori razine

Optički indikatori primjenjuju se za mjerenje sedimenata, kapljevina sa suspendiranim krutim tvarima i granica kapljevina–kapljevina. Ti senzori detektiraju smanjenje ili promjenu prijenosa IC svjetlosti koja se emitira iz infracrvene diode (LED), slika 5. Uz pravilan odabir konstrukcijskih materijala i mjesta ugradnje mogu se mjeriti vodene, organske i korozive kapljevine.

Uobičajena primjena cijenom povoljnih optičkih indikatora je indikacija granice između mulja i vode u taložnicima. Primjenom tehnike impulsne modulacije i IC diode velike snage može se eliminirati smetnja okolnog svjetla, upravljati LED-om s većim pojačanjem i umanjiti učinci stvaranja naslage na sondi.



Slika 5 – Optički indikator razine

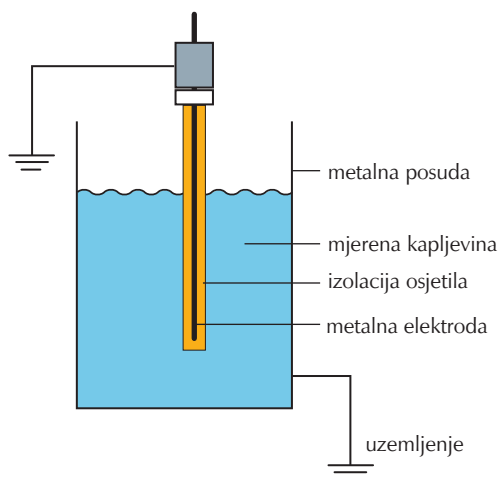
Alternativni pristup kontinuiranom optičkom mjerenju razine je primjena lasera. Lasersko svjetlo je koncentriranije i stoga lakše prodire kroz prašnavu ili parnu atmosferu. Laser se reflektira na većini čvrstih i kapljevinih površina. Vrijeme putovanja zrake može se izmjeriti preciznim mjerilom vremena da bi se odredila udaljenost mjerene površine od senzora. Laserski pretvornici se i dalje ograničeno primjenjuju u industriji zbog troškova i održavanja. Za održavanje parametara rada optika se mora često čistiti.

## Kontaktne metode mjerenja razine

### Kapacitivni pretvornici razine

Kapacitivno mjerenje razine temelji se na razlici relativnih dielektričnosti motrene kapljevine i zraka ili plina iznad te kapljevine. Pri mjerenju se u posudu s kapljevnom stavlja jedna ili slog dviju elektroda tako da one tvore kondenzator, odnosno kapacitivno osjetilo razine. Dielektrik tog osjetila jednim je dijelom kapljevina, a drugim dijelom zrak ili plin. Njihov odnos ovisi o razini, stoga i kapacitet tako dizajniranog osjetila ovisi o razini. Stavi li se osjetilo u prikladan mjerni spoj, tvorit će kapacitivni pretvornik, slika 6.

Sonda ugrađena u spremnik s kapljevnom osjeća promjenu razine, a te promjene se elektronički pretvaraju u kapacitet i vrijednost otpora, pa se dalje procesiraju i pretvaraju u analogni signal. Sonda i stijenka posude čine dvije ploče kondenzatora, s kapljevnom koja ima ulogu dielektrika. Ako stijenka spremnika nije vodljiva, uzimaju se dvije sonde ili se rabi vodljiva vrpca.



Slika 6 – Kapacitivno mjerenje razine

U praksi se obično primjenjuje osjetilo s pločama ili koncentričnim elektrodama. Kapacitet kondenzatora s usporednim pločama jest:

$$C_p = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d},$$

pri čemu su  $\epsilon_r$  relativna dielektričnost, a  $\epsilon_0$  dielektričnost vakuumu ( $8,8542 \cdot 10^{-12}$  As/Vm), a  $d$  udaljenost između elektroda.

Trenutačna razina dijeli osjetilo na dva kondenzatora, jedan s kapljevnom kao dielektrikom, a drugi sa zrakom kao dielektrikom. Označimo li kapacitet prvog s  $C_k$ , a kapacitet drugog s  $C_z$  ukupni kapacitet osjetila jest  $C_p = C_k + C_z$ , što za osjetilo s pločastim kondenzatorom znači:

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{a \cdot h}{d} + \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{a(L-h)}{d} = \epsilon_0 \frac{a}{d} [\epsilon_{r2} L - (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2})h].$$

pri čemu je  $a$  širina elektrode,  $h$  razina i  $L$  ukupna duljina elektrode.

Na temelju ovog izraza određuje se zavisnost kapaciteta osjetila od razine. Navedeni izraz predstavlja statičku karakteristiku koja se može izraziti u obliku zavisnosti promjene kapaciteta osjetila od razine:

$$\Delta C_p = -\epsilon_0 \frac{a}{d} (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2})h.$$

Sonde osjetila mogu biti izrađene od raznih materijala, čvrste ili savitljive konstrukcije, najčešće se radi o žici izoliranoj teflonom. Postoje također i sonde od nehrđajućeg čelika kad je potrebna veća osjetljivost kod kapljevina male dielektričnosti ili nevodljivih kapljevina ( $\epsilon_r < 4$ ) ili, pak, kapljevina koje imaju zrnast sastav.

Kapacitivni pretvornici razine prikladni su za velik broj krutina, vodenih i organskih kapljevina i kaša. Ta tehnika mjerenja naziva se i RF (radio frekvencijska) jer se pri pretvorbi na kapacitivni krug primjenjuje signal radijske frekvencije. Prikladni su za tvari s  $\epsilon_r$  do 1,1 (npr. koks i leteći pepeo) pa sve do 88 (npr. voda) ili više. Razina muljeva i taloga (npr. kanalizacijski mulj,  $\epsilon_r = 50$ ), kao kapljevite kemikalije poput živog vapna ( $\epsilon_r = 90$ ) također se može mjeriti.

Kapacitivni pretvornici s dvije sonde mogu se upotrebljavati i za indicaciju granice faza između dviju kapljevina koje su nemješljive (npr. ulje-voda).

Elektronička izvedba tih pretvornika uz faznu modulaciju i uporaba viših frekvencija čini senzor prikladnim za primjene u kojima su dielektrične konstante bliskih vrijednosti. Senzor ne sadrži pokretne dijelove, robusan je, jednostavan za upotrebu i čišćenje, a postoje izvedbe prikladne za visoke temperature i tlakove.

Moguće je opasnost od stvaranja i pražnjenja visokonaponskog statičkog naboja koji nastaje trljanjem i gibanjem materijala male dielektričnosti, ali se može ukloniti pravilnim dizajnom i uzemljenjem.

Izbor prikladnog materijala za sonde smanjit će ili ukloniti probleme uzrokovane abrazijom i korozijom. Indikatori razine materijale visoke viskoznosti, poput ulja i masti, mogu podlijevati nakupljanju materijala na sondi. Za kapljevine sklone pjenjenju i radnim uvjetima pri kojim nastaje prskanje ili turbulencija, osjetila se mogu posebno zaštititi od prskanja ili primijeniti tzv. zaštite cijevčice (engl. *stilling wells*).

Kapacitivne sonde imaju ograničenje u primjeni u visokim spremnicima za skladištenje rasutih krutina. Problematične su i sonde veće duljine, koje su obješene i protežu se do dna mjernog područja (20 do 50 m), zbog velikih mehaničkih naprezanja. U takvim slučajevima često dolazi do pucanja kabela.

(Kraj 1. dijela)

### Literatura

- URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Level\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Level_sensor) (18. 4. 2021.).
- Understanding how ultrasonic continuous level measurement works, Walt Boyes, 2013.
- URL: <http://allabtinstru.blogspot.com/2016/09/level-measurement-in-modern.html> (18. 4. 2021.).
- URL: <https://www.controlglobal.com/articles/2013/automation-technology-ultrasonic-contin> (18. 4. 2021.).
- K. Larson, Essentials of Level Instrumentation, Control, Technology Report, Level Measurement, Part 1, Putman Media.
- Rosemont: The Engineer's Guide to Level Measurement, 2013 Edition.
- URL: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-frequency-modulated-continuous-wave-technology-rosemount-en-1265738.pdf> (18. 4. 2021.).