

PREIZKUŠANJE NA VAKUUMSKO TESNOST – NEPORUŠITVENA AKUSTIČNA METODA

Branislav Arsenijevič¹, Jože Gasperič²

¹Medivak, d. o. o., Šolska 21, 1230 Domžale

²Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

STROKOVNI ČLANEK

POVZETEK

Članek obravnava iskanje netesnosti z neporušitveno akustično metodo, akustične senzorcje in detektorje s posebnim poudarkom na ultrazvočni metodi. Vendar ta tehnika ni omejena le na vakuumске ali visokotlačne naprave in sisteme, ampak se uporablja tudi za iskanje drugačnih »netesnosti«, kot so npr. električno iskrenje, koronski pojavi na daljnovodih, preboji na izolatorjih itd. Opisani so primeri uporabe v letalski, avtomobilski in nuklearni industriji ter v strojogradnji in ladjedelništvu.

Gljučne besede: vakuumška tesnost, akustična metoda, ultrazvočno iskanje netesnosti

Leak testing – Non-destructive acoustic technique

ABSTRACT

In this article the nondestructive acoustic leak testing as well as acoustic sensors and detectors are described. The ultrasonic leak testing is widely discussed. This technique is not limited only to the vacuum and pressurized equipment and systems but is also applied for acoustic detection for location of high voltage electrical sources (corona discharges and high voltage insulation breakdown and arcing). At the end some applications in aerospace, automotive and nuclear industry as well as in shipbuilding and machine manufacture are presented.

Key words: vacuum tightness, acoustic method, ultrasonic leak testing

1 PRINCIPI ZVOČNEGA IN ULTRAZVOČNEGA PREIZKUŠANJA TESNOSTI

1.1 Uvod

V prejšnji številki Vakuumista [1] smo predstavili neporušitveno metodo iskanja netesnosti z mehurčki, to pot pa obravnavamo iskanje netesnosti z neporušitveno akustično metodo.

Ultrazvočna detekcija je tehnika, ki se uporablja za ugotavljanje tesnosti vakuumskih in drugih sistemov, ki so pod nadtlakom, pa tudi za ugotavljanje poškodb in napak mehanskih in električnih elementov in naprav, ki so pri tem povezani z oddajanjem akustičnih signalov.

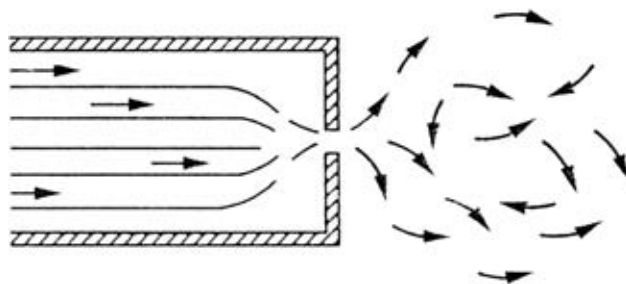
Tok tekočine oz. plina, ki izhaja iz netesnega mesta, ustvarja zvočne valove, ki so povezani s turbulenco (vrtinčenjem), kavitacijo ali z visoko hitrostjo iztekanja. Nastali zvok se lahko prenaša po okoliškem atmosferskem zraku ali po materialu. Ugotavljamo ga z usmerjenimi mikrofoni (sondami) na večjih razdaljah od netesnega mesta ali pa s stičnimi (kontaktnimi) sondami. Pri tem moramo paziti, da zvočna pot ni

prekinjena, tj., da med netesnostjo in akustičnim senzorjem ni ovir, kot so npr. materiali, ki absorbirajo zvok in ustvarjajo t. i. »zvočno senco«. Lahko nastane tudi odboj zvoka na ravnih trdnih površinah, tj. odmev, ki ima lahko drugačno smer kot zvok, ki nastaja pri viru.

Najbolj pogosto se uporablja detekcija uhajanja plina iz netesnih mest. Plin uhaja iz preizkušanca, ki je pod nadtlakom, zaradi tlačne razlike, kar povzroča sikajoč zvok s širokim frekvenčnim spektrom, ki sega v ultrazvočno področje in ga zlahka detektiramo. Občutljivost ultrazvočnih detektorjev je mnogo večja, kot je občutljivost človeškega sluha v slušnem območju (od 30 Hz do 16 kHz), medtem ko so ultrazvočne frekvence (območje nad 20 kHz) zvokov za uho neslišne. Pri uhajanju plina skozi netesno mesto pa zaradi turbulence (vrtinčenja) molekul nastaja predvsem za uho neslišni ultrazvok. Na **sliki 1** je prikazano vrtinčenje izhajajočega plina iz luknjice, kar povzroča nastajanje ultrazvoka.

Ultrazvočne detektorje lahko uporabljamo tudi za preizkušanje cevovodov za različne pline, ventile, bate, zavore na komprimiran zrak, za preizkus tesnosti avtomobilskih zračnic, za zapahe, cisterne, parne sisteme, kompresorje, pnevmatske regulacijske sisteme, orodja na komprimiran zrak, za ugotavljanje netesnosti izpušnih sistemov itd., kar bo opisano z nekaj primeri v zadnjem poglavju.

Ultrazvočne detektorske naprave se v osnovi uporabljajo za detekcijo zvoka, ki izhaja iz materialov s prenapeto strukturo (npr. pri krivljenju ali trganju materialov, kjer nastajajo velike deformacijske sile). V medicini uporabljajo stetoskope (zdravniške »slušalke«) kot sonde za slušne preiskave notranjih človeških organov (pljuč, srca), medtem ko so jih v preteklosti uporabljali tudi drugje (v tehniki) kot sonde za ugotav-



Slika 1: Turbulenca iztekajočega fluida skozi luknjico povzroča ultrazvočne signale, ki naznanjajo netesnost [2].

Iljanje mest puščanja. Uporabljali pa so tudi druge preproste pripomočke, kot so cevi, lijaki, kosi lesa, ki so jih prislanjali na ušesa.

Nizkofrekvenčni zvok se razširja v okolico kroglno (če ni absorberjev in odbojev zvoka). Visokofrekvenčni zvok, kamor spada tudi ultrazvok, ki ima kratko valovno dolžino v primeri z velikostjo vira, pa teži k temu, da se razširja v obliki usmerjenega pramena (curka).

Nekateri akustični detektorji netesnosti delujejo v slisnem, tj. v zvočnem področju. Ti so navadno sestavljeni iz avdioojačevalnikov, ki povečajo jakost zvoka, ne da bi spremenili njegovo frekvenco.

Netesnosti, ki jih ugotavljamo z zvočnimi ali ultrazvočnimi detektorji, so lahko **akustično aktivne** ali **pasivne**.

1.2 Akustično aktivne netesnosti

Aktivne netesnosti oddajajo zvok, ki nastane zaradi vrtinčenja toka izhajajočega fluida (plina). Pri tem se razvije ultrazvočna energija (pretvorba dela kinetične energije izhajajočega fluida), ki ustvarja akustični signal in tega lahko detektiramo in merimo. Taki signali nastajajo tudi pri netesnostih vakuumskih sistemov, ko teče okoliški plin (zrak) v vakuumsko posodo. Zvočna energija se razvije pri turbulenci, ki nastane pri prehodu iz laminarnega pretoka v turbulentni. Ultrazvočne vibracije plinskih molekul so vir signalov, ki povedo, da je tam netesnost.

1.3 Akustično pasivne netesnosti

Pasivne netesnosti so značilne za usmerjeni (laminarni) tok skozi netesnost. Pri tem ne nastajajo zvočni signali, povezani z netesnostjo. Pasivne netesnosti lahko detektiramo le, če uporabljamo ultrazvočne generatorje, ki ustvarjajo ultrazvočne valove, ki iz notranjosti preizkušanca, kamor jih postavimo, prodrejo skozi netesnost proti zunanji ultrazvočni sondi. Ultrazvočne generatorje pa uporabljamo tudi v drugih primerih, npr., ko preizkušanca ne smemo izpostaviti nadtlaku ali vakuumu, ker njegova konstrukcija ne bi vzdržala večjih pritiskov.

1.4 Dejavniki, ki vplivajo na detekcijo akustične netesnosti

Ultrazvočna detekcija je odvisna od naslednjih parametrov:

- občutljivosti ultrazvočne detekcije
- ultrazvočne frekvenčne ločljivosti
- akustičnega zaslanjanja (»senčenja«)
- viskoznosti fluida (tekočine, plina)
- hitrosti fluida

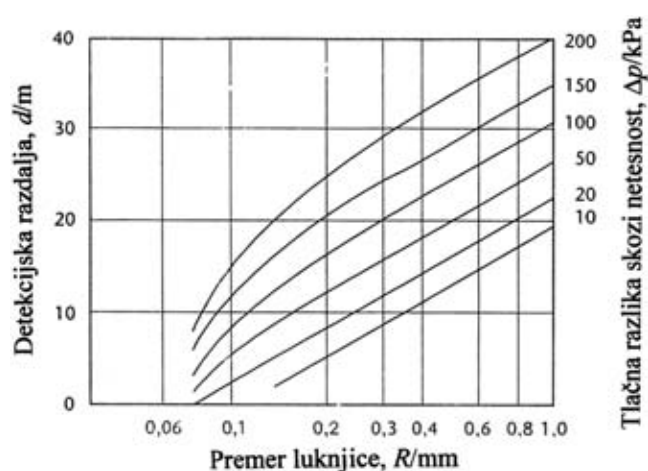
- tlačne razlike
- velikosti netesnosti

Največja značilnost ultrazvočne detekcije pa je frekvenčni obseg ultrazvočne energije, ki se tvori ob netesnostih. Energijski spekter frekvenc pri netesnostih je med 30 kHz in 50 kHz. Posebej je izrazit maksimum pri **40 kHz**.

Nekatere tekočine imajo tako viskoznost, da ne prodrejo skozi netesnost (npr. netesnost v cevi, kjer se pretakajo), toda zrak ali drug plin lahko od zunaj prodre skozi njo. Take netesnosti imenujemo viskozno odvisne. Velika hitrost pretoka tekočine pri nizkih tlakih ustvarja razmere, ki dovoljujejo majhne hitrosti plinov (pri visokem tlaku), ki jih te tekočine vlečejo skozi netesno mesto. V teh razmerah ni pričakovati, da bi ultrazvočna sonda odkrila šum, značilen za puščanje, in s tem njegovo mesto, lahko pa odkrije v tekočini ujet plin, ki povzroča **kavitacijo** ali **turbulentni šum**.

Tehnika ultrazvočne detekcije in ugotavljanje puščanja oz. netesnosti je uporabna tako dolgo, dokler obstaja dovolj velika tlačna razlika skozi netesnost, ki povzroča turbulenco in ustvarja zvočno energijo.

Jakost pretoka plina skozi netesnost naj bi bila večja od $1 \cdot 10^{-3}$ mbar L/s pri 0°C (to je tudi največja občutljivost ultrazvočne metode), da bi se ustvaril šum zaradi turbulence, kajti laminarni pretok ga ne ustvarja. Občutljive ultrazvočne sonde zaznajo šum že na razdalji 30 m od vira. Na **sliki 2** je diagram, ki prikazuje razdaljo od vira šuma, ki ga povzroča iztekajoči plin skozi okroglo odprtino različnega premera pri tlačni razliki 1–20 bar.



Slika 2: Odvisnost detekcijske razdalje ultrazvočne sonde od premera luknjice, ki je vir ultrazvočnega šuma, pri različnih tlačnih razlikah [2]

2 AKUSTIČNI SENZORJI IN DETEKTORJI

2.1 Kontaktni in nekontaktni akustični senzorji

Kot **kontaktni akustični senzor** se uporablja ultrazvočni piezokeramični pretvornik (angl. *transducer*), ki ima močan odziv, posebno občutljiv za netesnostne šume iz notranjosti preizkušanca, ki ustvarjajo vibracije na njegovi površini. Ker akustika netesnosti ustvarja širok spekter naključnih шумov, ima večina instrumentov za akustično preizkušanje pasovne filtre. Kontaktni senzorji so mnogo bolj občutljivi za netesnostni šum kot tisti, ki so posredno povezani z virom in sprejemajo šume po okoliškem zraku kot prenosnem mediju. Občutljivost kontaktnega sensorja je največja, kadar je med njim in materialom z netesnostjo t. i. ultrazvočni spoj, kar pomeni, da je čelo sensorja premazano z oljem ali mastjo oz. s smolnatim materialom ali adhezivom in pritisnjeno na preizkuševani material, tako da ni vmesne zračne plasti. Pri izbiri teh materialov pa moramo biti pozorni, da niso reaktivni in bi zato povzročali korozijo pri preizkušancih ali erozijo akustične emisije (tj. šuma), ki prekinja netesnostni šum.

Če ni mogoče iskati netesnosti z direktnim dotikom sensorja s površino preizkušanca, uporabljamo **mikrofone** kot **nekontaktno akustične senzorje** za sprejem ultrazvočnih signalov, ki se širijo od netesnosti po zraku ali tekočini (vodi). Taki senzorji (mikrofoni) so najbolj prikladni za aktivne zunanje netesnosti. Občutljivost in usmerjenost mikrofonskih detektorjev za zaznavanje akustičnih signalov (šumov) iz oddaljenosti lahko povečamo s paraboličnimi reflektorji ali gumijastimi fokusirnimi nastavki.

Ultrazvočni detektorji so grajeni za frekvenčno območje od 30 kHz do 50 kHz, druge, »slučajne« frekvence so dušene, kar zmanjšuje interferenco s šumi, ki jih povzročajo delujoči stroji ali drugi viri šuma v okolici. Ugotovljeno je bilo, da ustvarja izhajajoči plin iz preizkušanca, ki je pod nadtlakom, sicer širok spekter frekvenc, vendar je amplitudni vrh jakosti šuma pri frekvenci okoli 40 kHz.

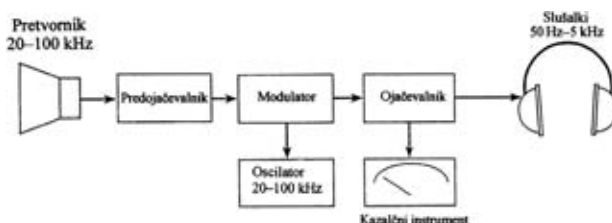
Če ne moremo ali ne smemo preizkušanca evakuirati ali ga natlačiti s plinom ali drugim fluidom, ki bi na netesnih mestih povzročili turbulenco pri izhajanju ter s tem šum, si pomagamo z **ultrazvočnim generatorjem**, ki oddaja ultrazvok določene frekvence, ki je nastavljiva. Generator daje stožčasti zvočni pramen, ki je frekvenčno moduliran (območje od 36 kHz do 44 kHz). Le-tega postavimo v notranjost preizkušanca (navadno gre za velike prostornine preizkušancev), zunanjo površino pa preiskujemo s sondo (mikrofonom), dokler nenadoma ne naraste ultrazvočni signal. Tedaj so namreč skozi netesnost prodrli ultrazvočni valovi generatorja, ki se sicer od notranjih sten

odbijajo in ne prodrejo na drugo stran. Ta način aktivne zvočne tehnike je odvisen od prenosnih lastnosti netesnosti in medija, ki je v in ob njej. Pri ekstremno majhnih netesnostih je treba ultrazvočni pramen generatorja »naciljati« proti ultrazvočni sondi, ki je na drugi strani stene, v kateri je netesnost. To lahko storimo s sinhronim premikanjem generatorja in sonde. Tehnika ultrazvočnega preizkušanja tesnosti ima največjo občutljivost okoli $1 \cdot 10^{-3}$ mbar L/s, česar ni vedno lahko doseči.

2.2 Zgradba instrumentov za detekcijo in konverzijo ultrazvočnih signalov netesnosti

Detektorji, ki se uporabljajo pri ultrazvočnem preizkušanju tesnosti, imajo enostavno zgradbo, ki spominja na navaden radijski sprejemnik z amplitudno modulacijo. Funkcijo antene ima pri ultrazvočnem detektorju senzor. Ta detektira (zaznava) akustične valove, ki pridejo po zraku iz vira, ali longitudinalno zvočno valovanje, ki ga proizvaja umetni akustični vir (ultrazvočni generator), kajti plin ali tekočina v netesnosti (npr. razpoki) prevaja zvok iz notranjosti preizkušanca na zunanji ultrazvočni detektor ali nasprotno. V tem primeru gre za detekcijo zvočnega signala z direktnim kontaktom s površino preizkušanca.

Predojačevalnik s frekvenčno širino od 20 kHz do 300 kHz se uporablja za ojačenje sprejetih zvočnih signalov, le-te drugi ojačevalnik (modulator) meša s frekvenco oscilatorja, ki je nastavljiva. Nastanejo štiri frekvence, in sicer: (1) »originalna« frekvenca ultrazvočnega signala od netesnosti, (2) »originalna« oscilatorska frekvenca, (3) vsota obeh frekvenc in (4) razlika obeh (originalnih) frekvenc. Zadnje omenjena je v slišnem področju. Ta (slišna) frekvenca je nato ločena in ojačana ter peljana na slušalke ali zvočnik. Tako postanejo neslišni ultrazvočni signali s konverzijo (pretvorbo) slišni v območju zaznave človeškega sluha (od 30 Hz do 16 kHz). Originalni detektirani ultrazvočni signal od netesnosti peljemo tudi z zadnje ojačevalne stopnje na (kazalčni) instrument, ker je njegova zaznava bolj občutljiva za spremembo jakosti zvoka, kot je človeško uho. Blok-shema ultrazvočnega detektorja je prikazana na **sliki 3**. Bolj zahtevni detektorji so opremljeni z akustičnimi spektralnimi



Slika 3: Blok-shema ultrazvočnega detektorja

analizatorji, ki razlikujejo med normalnim šumom strojev, npr. zvok, ki ga oddajajo rotirajoči deli (ležaji, sklopke), in zvoki zaradi netesnosti ali hidravličnega pretočnega šuma. Pri »zračnih« (nekontaktnih) ultrazvočnih detektorjih pa so dodani električni filtri za odstranjevanje šuma ozadja.

2.3 Kontrola in kalibracija ultrazvočnega detektorja

Pred vsako detekcijo je treba detektor kontrolirati, ali sploh deluje. Pri tem si pomagamo na različne načine. Najbolj preprost način je, da vzamemo majhno stisljivo plastenko. Če jo hitro stisnemo in spustimo, gre zrak skozi odprtino in ustvari zvok. Ta »umetni signal« lahko detektiramo z mikrofonsko sondo na razdalji do 10 m. Tudi žvenketanje s ključi ali kovanci se lahko s pridom uporablja za kontrolo delovanja detektorja.

Kalibracijo ultrazvočnega detektorja izvajamo z ultrazvočnim generatorjem (»tongeneratorjem«). Idealni kalibracijski vir je, če postavimo tak generator v cev z notranjim premerom 100 mm in višino 500 mm. Ta cev mora imeti hermetično zaprto dno. Zvočni izhod generatorja usmerimo proti zgornji odprtini. Zaslonimo jo s pokrovom, ki ima luknjico premera 0,5 mm, in generator vklopimo. (Generator naj ima novo napajalno baterijo.) Med kalibracijo ultrazvočni generator direktno pritisnemo na luknjico v pokrovu. Odklon instrumenta ultrazvočne sonde, ki je oddaljena okoli 15 m, nastavimo na določeno vrednost s potenciometrom. Ta referenčna kalibracijska nastavitvev naj ostane zaradi kasnejšega preverjanja kalibracije.

3 PREIZKUŠANJE TESNOSTI Z ULTRAZVOKOM

3.1 Prednosti in omejitve ultrazvočnega preizkušanja tesnosti

Verjetno je največja prednost ultrazvočnega preizkušanja tesnosti, da je ta tehnika uporabna pri vseh fluidih (tekočinah, parah, plinih), če so le dani fizikalni pogoji za nastajanje zvoka, ki je povezan z netesnostmi ali okvarami. Ta mnogostranost izključuje potrebo po uporabi slednih plinov. Če netesnost povzroči nastanek zvoka v okoliškem zraku, jo lahko detektiramo tudi do razdalje 30 m in več. To daje prednost, če je treba nadzorovati velike sisteme, npr. plinovode, naftovode, vodovodno omrežje, pri čemer je največja pozornost usmerjena na varjene spoje in prirobnice. Ultrazvočno detekcijo koristno uporabljamo pri novih cevovodih z nadtlakom, še preden so jarki, v katere so položeni, zasuti. Kasneje je to mnogo težje, ker zrnati zemeljski material močno slabi vse vrste nihanj.

Težave pri ultrazvočnem preizkušanju nastajajo takrat, ko je zvok, ki izvira iz netesnosti, preglašen s šumom ali hrupom iz okolice, kjer se uporablja detektor. Pri detekciji na večjih razdaljah od vira signala lahko nastanejo težave pri ugotavljanju mesta tega vira zaradi odbojev zvoka, ki prihajajo iz različnih smeri, vendar imajo navadno manjšo jakost.

3.2 Kombinirana tehnika odkrivanja netesnih mest (ultrazvočna detekcija z mehurčki)

Ultrazvočna detekcija se uporablja tudi pri preizkušanju tesnosti z mehurčki s premazovanjem ali potapljanjem preizkušanca v tekočino, npr. v vodo z dodatkom detergenta za zmanjšanje površinske napetosti [1]. Ultrazvočna sonda je obešena nad vodno kopeljo in detektira akustične signale pri eksploziji mehurčkov na njeni površini. Ni treba, da te mehurčke tudi vidimo. Pri netesnostih mehurčki nastajajo in izginjajo tekoče (navadno v enakih časovnih intervalih). Pri majhnih netesnostih deluje čas čakanja in vizualnega opazovanja pojava mehurčka na operaterja bolj utrudljivo kot poslušanje ojačenega signala, ki nastane ob razpoku mehurčka. Podobno je pri premazovanju »sumljivih« mest z milnico ali primerno tekočino z majhno površinsko napetostjo, kjer z eno roko premazujemo (ali obrizgavamo) površino preizkušanca, z drugo roko pa nad premazanim mestom držimo usmerjeno sondo ultrazvočnega detektorja.

Kombinirani sistem je občutljiv za netesnosti, ki so manjše od $2 \cdot 10^{-3}$ mbar L/s. Nekateri proizvajalci navajajo tudi občutljivost do $1 \cdot 10^{-6}$ mbar L/s.

3.3 Preizkušanje tesnosti industrijskih in transportnih sistemov pod nadtlakom

Z ultrazvočno tehniko kontroliramo tesnost razdelilnih sistemov v industrijskih obratih in transportnih sistemih. Ugotavljanje mesta netesnosti je mnogo hitrejšo kot z metodo z mehurčki, ki je za velike sisteme včasih tudi nemogoča, predvsem če je dostop omejen in je vidljivost slaba. Ultrazvočna metoda tudi ne zahteva temeljitejšega čiščenja površine preizkušanca, kot je to pri metodi z mehurčki. Za iskanje netesnosti uporabljamo tako kontaktne kot nekontaktne (mikrofonske) sonde.

V naftni industriji nadziramo tesnost cevovodov in prirobnic, ki imajo premere tudi do 1,5 m. Cevovode v splošnem preizkušamo na tesnost pred polnitvijo. V industrijah, kjer uporabljajo vodno paro pod pritiskom, uporabljamo usmerjeno zračno ultrazvočno sondo, veliko večjih netesnosti, ki oddajajo slišne zvočne signale, pa se da odkriti kar s poslušanjem.

Pri nizkotlačnih sistemih (npr. centralna kurjava v stavbah) pa je odkrivanje netesnih mest bolj težavno,

ker je jakost slišnega zvoka majhna. Tu je uporaba ultrazvočnega detektorja obvezna, saj lahko z njim poiščemo netesna mesta, ki so mnogo manjša od tistih, ki jih slišimo, detektor pa dodatno še prezre slišne šume iz okolice.

4 PRIMERI UPORABE ULTRAZVOČNE TEHNIKE ZA ISKANJE NETESNIH MEST

Že v prejšnjih poglavjih smo navedli nekaj primerov uporabe te tehnike za iskanje netesnosti. Vendar ta tehnika ni omejena le na vakuumske ali visokotlačne naprave in sisteme, ampak se uporablja tudi za iskanje drugačnih »netesnosti«, kot so npr. električno iskrenje, koronski pojavi na daljnovodih, preboji na izolatorjih itd.

(1) **Letalska industrija.** V tej industriji preizkušajo tesnost tako vetrovnik kanalov in drugih proizvodnih naprav kot letal samih, njihovih gorivnih in hidravličnih sistemov, vse kar je povezano z vakuumom, s sistemi za prezračevanje in preskrbo s kisikom ter tesnjenje zapahov, vrat, skratka celotne notranjosti, ki mora biti med poletom letala pri določenem tlaku.

(2) **Ladjedelnštvo.** Pri gradnji ladij preizkušajo zware s simultanim načinom uporabe tongeneratorja in sonde. Klimatizacijske naprave, hladilne sisteme in izpušne sisteme preizkušajo na tesnost po metodah, ki smo jih opisali v prejšnjih razdelkih.

(3) **Avtomobilska industrija.** Za ugotavljanje tesnosti zapiranja sesalnih in izpušnih ventilov v motorski glavi uporabljajo kontaktne sonde. Ko motor ne deluje, postavijo bat motorja v lego, kjer je kompresija največja, na steblo ventila pa pritisnejo kontaktno ultrazvočno sondo. Če zaznajo vibracije zaradi sikanja zraka, je to znak, da ventil ne tesni. Na enak način preizkušajo vsak posamezni ventil, poleg tega pa še celoten izpušni sistem.

Tudi zračnice velikih tovornjakov, ki jih napolnijo z zrakom, najprej kontrolirajo z manometrom, nato vizualno in na koncu z ultrazvočno sondo. Na enak način preizkušajo tudi pnevmatike brez zračnic. Vodni preizkus zato ni potreben.

Zelo uporabna je ultrazvočna sonda za preizkušanje zavornega sistema, sistema za vbrizgavanje goriva pri dizelskih motorjih, hladilnih sistemov pri tovornjakih hladilnikih itd.

(4) **Strojegradnja.** Ultrazvočni šum, ki ga detektira kontaktna sonda, nastaja pri drgnjenju ali periodičnem dotikanju dveh kovinskih delov ali površin. Ta šum je posebno glasen, če deli, ki se drgnejo, niso mazani. Na enak način lahko kontroliramo delovanje ležajev in drugih mehanskih gibajočih se delov, če so zunaj toleranc in brez maziva. Tako lahko ležaje in druge dele strojev zamenjamo, preden nastane okvara. Z ultrazvočno kontaktno sondo lahko tudi ugotovimo, ali je med postopkom mazanja (injeciranja maziva) prišlo mazivo v zadostni meri v ležaj oz. strojni del.

(5) **Nuklearna industrija.** Podjetje Westinghouse Electric Corporation je razvilo svoj preizkuševalni sistem za nadzor tesnosti primarnega reaktorskega hladilnega sistema in parnih cevovodov nuklearnih elektrarn. Ta sistem je instaliran v mnogih evropskih nuklearkah. Sistem nadzira 96 mest. Sestavni deli tega sistema pa obsegajo senzorne, instrumente za procesiranje signala, delovno postajo in industrijske osebne računalnike s prenosnim protokolom in komunikacijskim internetnim protokolom. Če kateri koli senzor zazna povečanje nastavljenih vrednosti za šum, programska oprema na delovni postaji avtomatsko ugotavlja, ali gre za netesnost ali za vklop ali izklop črpalk, odpiranje ali zapiranje ventilov, spremembo nivoja moči itd., ter temu primerno reagira. Na isto delovno postajo so vezani tudi nadzorni sistemi, npr. za vibracije črpalk hladilnega sistema, temperaturo cevovodov, za vlago itd.

5 LITERATURA

- [1] B. Arsenijević, J. Gasperič, *Vakuumist*, 29 (2009) 4, 9–20
- [2] P. O. Moore, *Nondestructive testing handbook*, 3rd ed., Vol. 1 – Leak testing ASNT, 1998
- [3] J. M. Lafferty (ed.), *Foundation of Vacuum Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., N. York, 1998