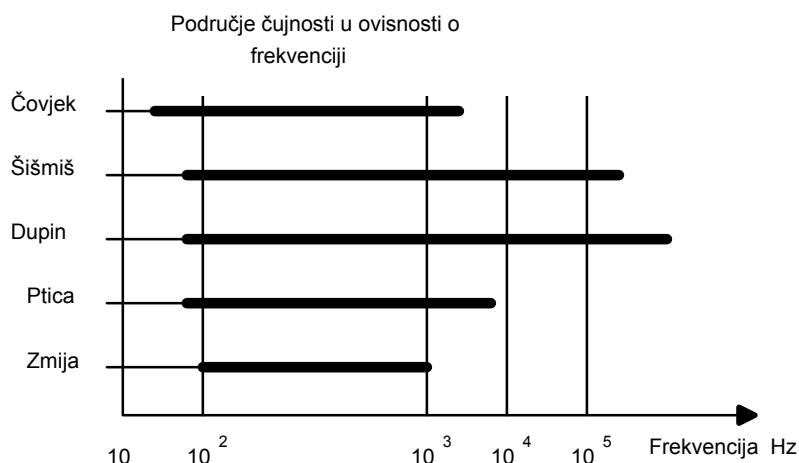


3.2 MJERENJE ZVUČNIH SIGNALA

3.2.1 Povijesni razvoj

Dugo je vremena proučavanje zvučnih pojava bilo isključivo vezano za glazbu i glazbene instrumente. Tek u XIX st. bilježi se znatan napredak akustike kao grane fizike. Razvoj radiofonije i elektronike daju veliki napredak u razvoju akustike. Ažuriraju se sredstva industrije radi pronalaženja boljih uređaja za komuniciranje. Razvijaju se izvori ultrazvuka te se primjenjuju u kemiji, medicini, navigaciji, ispitivanju materijala, ribolovu. Usporedno sa usavršavanjem uređaja za zapisivanje i reprodukciju glazbe i govora raste i potreba za suzbijanje buke koja sve više ometa život u gradovima i industrijskim centrima.

Pojam zvuka podrazumijeva pojavu koju možemo registrirati sluhom. Dio fizike koji proučava zvučne pojave naziva se akustika. Zvuk je longitudinalni mehanički val koji se može prostirati u čvrstim tijelima, tekućinama i plinovima. Zvukom se prenosi energija. Jako glasan zvuk, npr. vrlo glasnog orkestra, sadrži energiju ekvivalentnu svjetlosnoj i toplinskoj energiji jedne žarulje. Mehaničke valove koje registrira ljudsko uho nazivamo zvukom u užem smislu. To su longitudinalni valovi frekvencije od 20 Hz do 20000 Hz, koji mogu zatitrati bubnjić našeg uha i tako proizvesti osjećaj zvuka. Zvučni valovi frekvencije niže od 20 Hz nazivamo infrazvuk, a valove više frekvencije od 20000 Hz ultrazvuk. Te frekvencije čovjek ne čuje.



Slika 3.23 Područje čujnosti u ovisnosti o frekvenciji [12]

3.2.2 Postanak zvučnih valova

Otvorimo li naglo sobna vrata zastori na otvorenom prozoru pomaknu se van jer se tlak zraka u sobi naglo povećao, odnosno čestice zraka su se zgusnule (kompresija). Pri zatvaranju vrata tlak zraka u sobi se smanji odnosno čestice zraka se razrijede (ekspanzija) i zastor se pomakne u sobu. Uzastopnim otvaranjem i zatvaranjem vrata zastor će titrati oko ravnotežnog položaja. Kroz medij se širi zvučni val u vidu zgušćenja i razrjeđenja, a kada medija nema zvuk se ne čuje.

Zvuk se ne mora širiti samo kroz zrak već i kroz čvrsta tijela i tekućine. Često se događa da čovjek prislanja uho na željezničke tračnice ne bi li čuo dolazak vlaka. Iz toga možemo zaključiti da se zvučni val širi brže kroz čvrsti medij nego kroz plin. To je zbog toga jer su čestice u čvrstom stanju međusobno povezane silama dok se kroz plin (zrak) poremećaj širi isključivo sudaranjem molekula plina. Za postanak zvuka potrebno je dosta jako i brzo titranje, a mjesto gdje se to događa nazivamo izvor zvuka. Izvor zvuka nije izoliran sustav već

je povezan sa sredstvom koje prenosi zvuk. Ono neprestano oduzima energiju izvora i djeluje na njega silama reakcije prigušujući tako njegovu amplitudu.

Veličinu Δp nazivamo akustičkim tlakom. Može se pokazati da su promjene tlaka Δp i brzine titranja povezani relacijom:

$$\Delta p = \varphi \cdot v \cdot u$$

gdje je v brzina prostiranja vala kroz medij, a φ gustoća medija.

3.2.3 Odbijanje zvuka [12]

Valovi zvuka odbijaju se od neke prepreke i vraćaju se na mjesto izvora. Ta pojava naziva se *jeka*. Prava jeka dobiva se ako je vremenski razmak između prvotnog i reflektiranog zvuka barem 0,1 s.

3.2.4 Brzina zvuka

Zvuk se može širiti kroz sva sredstva, kao longitudinalni val. Brzina zvučnog vala ovisi o svojstvima sredstava. Posebno zanimljiv slučaj je širenje zvuka kroz zrak. Brzina zvuka ovisi o gustoći plina φ , promjeni gustoće $\Delta\varphi$ i tlaka Δp i može se izraziti relacijom.

$$v = \sqrt{\frac{(\varphi + \Delta\varphi) \cdot \Delta p}{\rho \cdot \Delta\rho}}.$$

Pri prolasku zvučnog vala nepoznate su promjene tlaka i temperature, pa se proces može smatrati povratnim (reverzibilnim). Proces je relativno brz pa se proces može smatrati i adijabatskim (nema izmjene topline s okolinom). Prolaskom vala kroz idealan plin (zrak donekle možemo smatrati idealnim plinom) tlak i volumen se brzo mijenjaju, pa je prijenos

topline kroz plin gotovo zanemariv. Možemo pretpostaviti da su stlačivanje (kompresija) i širenje (ekspanzija) plina općenito adijabatski procesi.

Brzinu zvuka možemo izraziti pomoću veličina karakterističnih za pojedine plinove:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{M}}.$$

$\mathfrak{R}$ je plinska konstanta, M molna masa plina, a T apsolutna temperatura, κ je adijabatska konstanta vrijedi da je:

Brzina širenja zvučnih valova za zadani plin proporcionalna je korijenu iz apsolutne temperature.

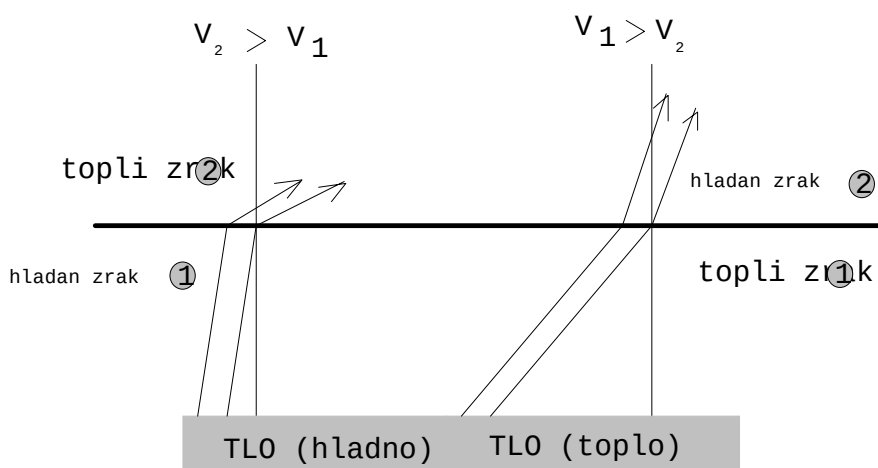
Ako se uzme da se zrak ponaša kao dvoatomni plin, te za adijabatsku konstantu stavimo $\kappa = 7/5$ i molnu masu $M = 28,95$ pri temperaturi $T = 273$ K, dobije se približna vrijednost za brzinu zvuka u zraku od 331 ms^{-1} .

Tablica 3.1 Brzine zvuka pojedinih tvari [13]

Sredstvo	v / ms^{-1}	Sredstvo (plin)	$t \text{ } ^\circ \text{C}$	v / ms^{-1}
Alkohol	1143	Zrak	0	331
Aluminij	5104	Zrak	20	344
Bakar	3560	Zrak	100	366
Voda	1461	Zrak	1000	700
Morska voda	1500	Vodik	0	1263
Željezo	5130	Vodena para	0	401
Živa	1407	Ugljični dioksid	0	258
Staklo	5500	Neon	0	437
Guma	54	Kisik	0	317
Olovo	1322	Helij	0	971

Iz tablice je vidljivo da se zvuk brže širi u toplom zraku nego u hladnom. Kako temperatura zraka opada sa visinom, zvučni se valovi lome tako da "skreću" uvis i čujnost je slabija. To se događa sredinom dana kada je tlo jako zagrijano.

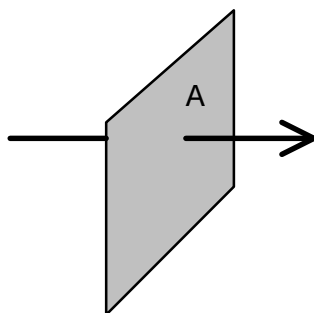
Noću dolazi do brzog hlađenja tla pa se zbiva suprotan proces i čujnost je jača.



Slika 3.24 Lom valova zvuka uslijed promjene temperature

3.2.5 Intenzitet zvuka [12]

Intenzitet zvučnog vala je energija koju zvučni val prenese u jediničnom vremenu kroz jediničnu površinu smještenu okomito na smjer širenja zvuka ($I = P/A$). Jedinica za intenzitet zvuka je W m^{-2} .



Slika 3.25 Prikaz intenziteta zvučnog vala

U praksi susrećemo intenzitete zvuka od najslabijih, koje uho jedva čuje, do najjačih koji uzrokuju bol, pa čak mogu i izazvati smrt. Uzima se da je zvuk intenziteta:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$$

prag čujnosti i s njim se uspoređuju ostali intenziteti. Najjači zvučni intenziteti su oko 10 W/m^2 . Omjer između intenziteta najjačeg i najslabijeg zvuka je 10^{13} , Pa je praktičnije računati s logaritmima omjera intenziteta.

Zbog toga se uvodi pojam **razine zvuka** L kao deseterostruki logaritam omjera intenziteta, što izračunavamo formulom.

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} .$$

Razina zvuka L mjeri se u decibelima (dB). Zvuk na pragu čujnosti ima 0 dB, dok zvuk od 130 do 140 dB počinje uzrokovati bol u uhu.

Tablica 3.2 Prikaz čujnosti nekih izvora zvuka

Izvor	Razina zvuka L / dB	Intenzitet I / W m^{-2}
Zrakoplov na 30 m	140	100
Prag bola	120	1
Rock koncert	110	≈ 1
Sirena na 30 m	100	$1 \cdot 10^{-2}$
Unutrašnjost auta pri 100 km/h	75	$3 \cdot 10^{-5}$
Prometna ulica	70	$1 \cdot 10^{-5}$
Razgovor na 50 cm	65	$3 \cdot 10^{-6}$
Tihi radio	40	$1 \cdot 10^{-8}$
Šapat	20	$1 \cdot 10^{-10}$
Šuštanje lišća	10	$1 \cdot 10^{-11}$
Prag čujnosti	0	$1 \cdot 10^{-12}$

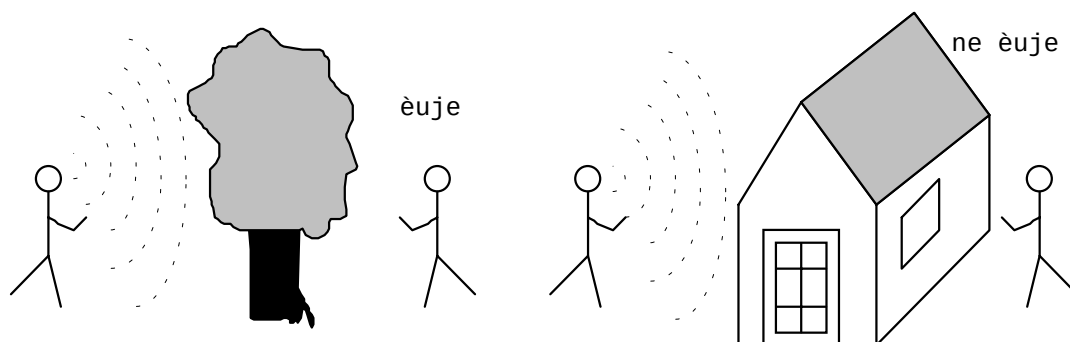
3.2.6 Glasnoća zvuka

Glasnoća zvuka subjektivni je osjećaj jakosti zvuka u našem uhu. Ona ovisi o intenzitetu i o frekvenciji zvuka (buke). Zvukovi jednakih intenziteta, ali različitih frekvencija izgledaju uhu različito glasni. Za određivanje glasnoće zvuka treba neki neposredni zvuk usporediti s nekim referentnim zvukom. U tu svrhu dogovor je da se upotrebljava frekvencija 1000 Hz. Jedinica za glasnoću zvuka je **fon**. Uho je najosjetljivije za područje frekvencija od 600 do 4000 Hz.

3.2.7 Interferencija i difrakcija zvučnih valova [12]

Valovi zvuka također pokazuju svojstvo interferencije. Kada se dva vala susretnu u nekoj točki prostora oni interferiraju odnosno njihove elongacije se zbrajaju po načelu superpozicije. Frekvencije valova koji interferiraju mogu biti jednake ili različite.

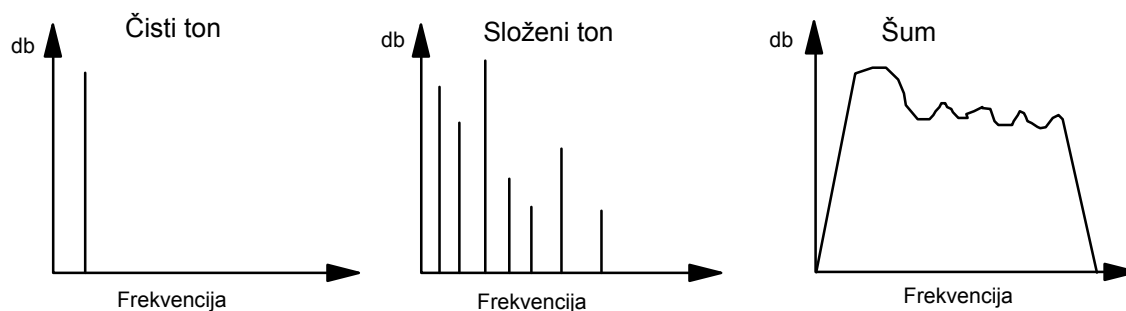
Valovi zvuka pokazuju i pojavu ogiba (difrakcije). Ogib je to izrazitiji što je prepreka manja u usporedbi sa valnom duljinom. Slikovito možemo reći zovemo li neku osobu koja se nalazi iza kuće ona nas vjerojatno neće čuti. Ako se osoba nalazi iza drвета ona će nas čuti.



Slika 3.26 Pojava ogiba zvuka

3.2.8 Izvori zvuk rezonancija [12]

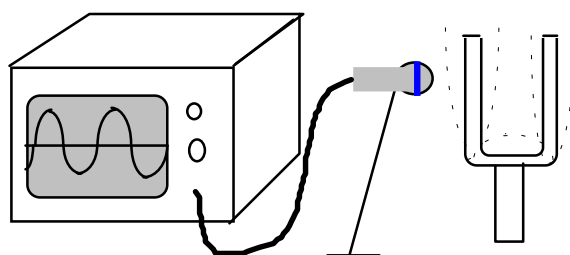
Svako tijelo koje u bilo kojem sredstvu titra smatramo izvorom zvuka. Izvor zvuka stalno "zrači" energiju u obliku zvučnih valova koja se mora nadoknaditi pomoću nekog mehanizma. Ako se energija ne nadoknađuje, val se prigušuje odnosno postupno slabi. U neposrednoj blizini izvora zvuka valovi imaju kompliciran oblik i ovise o pojedinostima svakoga izvora. Kod veće udaljenosti val ima oblik sfere, s izvorom zvuka u središtu i širi se u svim smjerovima. Za pojedine izvore zvuka dovod energije je različit. Svako titranje nije pravilno tako da može nastati val složenog oblika tzv. šum koji putem medija (zraka) udara u bubnjić uha. Ako se širenje vala može opisati sinusnom funkcijom dobivamo ton.



Slika 3.27 Zvučni spektar: a čistog tona, b složenog tona, c šuma [13]

3.2.9 Glazbena vilica

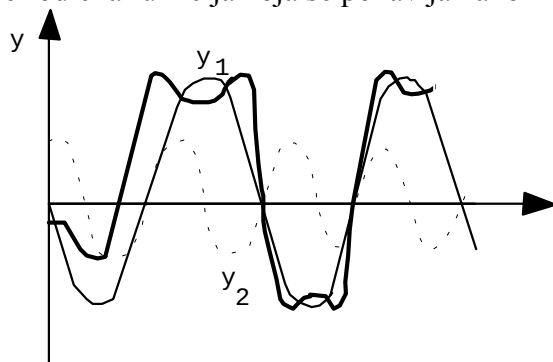
Ako se plosnatoj šipci savijenom u obliku slova U kraci približe i onda naglo puste, ona vibrira s dva čvora i tri trbuha.



Slika 3.28 Prikaz rezonancije zvuka

3.2.10 Harmonijska analiza [12]

Zbrojimo li dva ili više harmonijskih titranja čije su frekvencije višekratnici neke osnovne frekvencije dobijemo rezultanto titranje koje više nije jednostavna harmonijska funkcija već složena periodična funkcija koja se ponavlja nakon neke periode T .



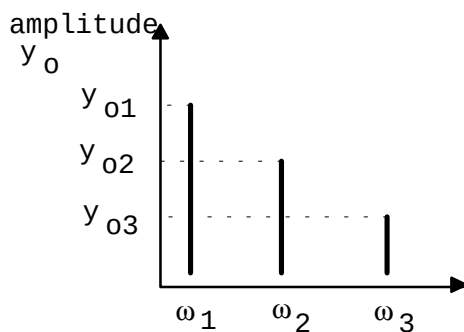
Slika 2.29 Harmonijska analiza složenih periodičnih funkcija

njihov zbroj iznosi:

$$y_1 = 2 \sin \omega t \quad \text{ i } \quad y_2 = 3 \sin \omega t$$

$$y = 2 \sin \omega t \quad + \quad 3 \sin \omega t$$

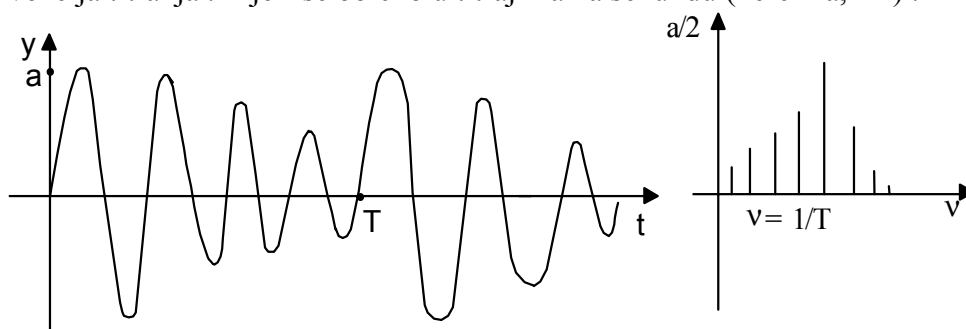
Kružna frekvencija ω naziva se **osnovnom frekvencijom**, a njezini višekratnici 2ω , 3ω , 4ω , zovu se **višim harmonicima**. Zbrajanjem jednostavnih harmonijskih titranja možemo dobiti bilo koju periodičnu funkciju. To je Fourierov red za periodičnu funkciju. U praksi se amplitude viših harmonika sve više smanjuju tako da se Fourierov red aproksimativno sastoji od nekoliko prvih članova. Rastavljanje nesinusoidalne periodične funkcije naziva se **spektralnom analizom**. Rezultati raščlambe složenog titranja u Fourierovom redu mogu se prikazati grafički bilježenjem svih frekvencija čije su amplitude različite od nule. Ovisnost amplitude pojedinih harmonika o takvim frekvencijama predstavlja tzv. spektar složenog titranja (slika 3.30).



Slika 3.30 Spektar složenog titranja

3.2.11 Frekvencija [13]

Recipročna vrijednost perioda titraja T , $f = 1/T$, tj. broj titraja u jedinici vremena, zove se frekvencija titraja. Mjeri se obično u titrajima na sekundu (hercima, Hz).



Slika 3.31 Periodično ponavljanje

Recipročna vrijednost perioda titraja T , $f = 1/T$, tj. broj titraja u jedinici vremena, zove se frekvencija titraja. Mjeri se u obično titrajima u sekundi (hercima, Hz).

Tablica 3. 3 Frekvencija f i valna duljina λ zvuka u zraku ($20^{\circ}C$)

f , Hz	16 000	12 000	8000	4000	1000	600	200	50
λ , cm	2,1	2,8	4,3	8,6	34,2	57,1	171,2	686,0

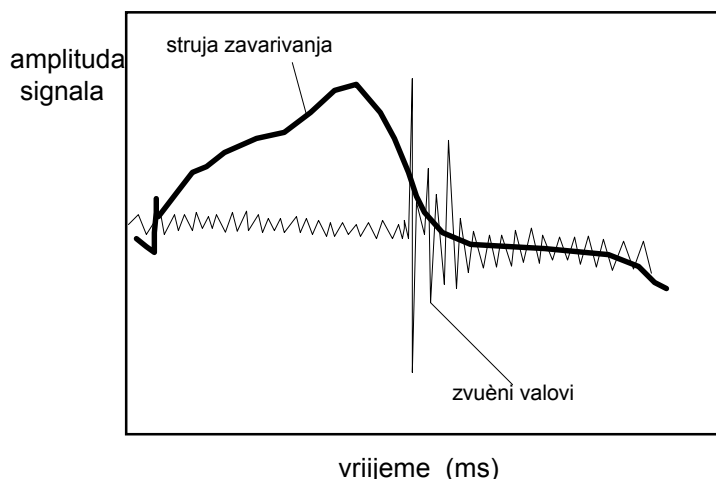
3.3 PRINCIPI SVRHA I MOGUĆNOSTI PRAKTIČNE PRIMJENE

Pored dinamičkog načina praćenja parametara zavarivanja (On - line monitoring), u današnje vrijeme nastoji se razviti zvučno praćenje procesa zavarivanja.

Prije provedbe detaljnih istraživanja zvučnog praćenja procesa zavarivanja, potrebno je riješiti nekoliko problema. U ovom načinu praćenja procesa zavarivanja nailazimo na dvije

varijable. Kao prva varijabla javlja se napon i jakost struje zavarivanja, dok je druga varijabla zvuk procesa zavarivanja. Različite brzine kretanja zvuka i brzine strujanja elektrona (nosioci električne struje) stvaraju velike probleme. Poznato nam je da je brzina zvuka $v_z = 370 \text{ m/s}$, dok je brzina strujanja elektrona puno veća $v_e = 3 \cdot 10^9 \text{ m/s}$ (brzina svjetlosti).

Dodatni problem postavljaju konstantne. Brzinu strujanja elektrona možemo promatrati konstantnu, dok brzinu zvuka nikako ne možemo promatrati kao konstantu. Povećanjem udaljenosti mikrofona od zavarivačkog procesa povećava se ukupno vrijeme kašnjenja zvuka.



Slika 3.32 Prikaz zvučnog signala tijekom prijelaza kapljice s elektrode na osnovni materijal [14]

Na neki način danas se pokušava se podvući paralela između snage potrebne za zavarivanje ($P = U \cdot I$), i dominantne frekvencije procesa zavarivanja.

Obradom zvučnih signala pokušava se doći do nekih karakterističnih frekvencija u procesu zavarivanja npr. kada se rastaljena kapljica odvaja od žice za zavarivanje. Obradom zvuka mogli bismo otkriti nepravilnosti tijekom zavarivanja te na taj način izbjeći pojavu pogreške.

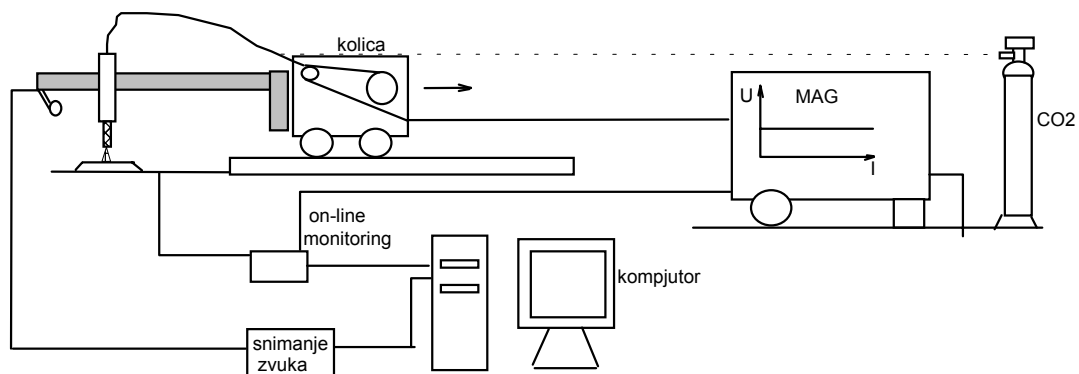
Prvi pokušaj mjerenja zvučnih signala bio je 60-tih godina ovoga stoljeća. Najznačajniji problem nekorištenja ovoga način praćenja procesa zavarivanja je taj što unutar zavarivačkog spektra zvukova uvijek postoji široki spektar zvukova koji nisu zavarivački te utječu na krajnje rezultate. Danas se problem pokušava riješiti primjenom uskopojasnih usmjerenih mikrofona i softwara koji u sebi imaju ugrađene posebne filtre. Uskopojasni mikrofoni bilježe vrlo kvalitetno zvukove samo u neposrednoj blizini. Oni zvukovi kojima je izvor dalje od lociranog mikrofona ostaju nezabilježeni. U laboratorijskim uvjetima moguće je snimiti čist zvuk procesa zavarivanja bez sporednih zvukova. Dominantne frekvencije procesa zavarivanja upisuju se u software i na osnovu njih vrši se usporedba frekvencija dobivenih na terenu. Program uspoređuje frekvencije dobivene na terenu sa frekvencijama dobivenim u laboratoriju. One frekvencije koje se pojavljuju na terenu, a nisu zabilježene u laboratoriju jednostavno se odbacuju. Spomenute varijable danas nalaze primjenu ali kao odvojene.

Postupak praćenja dinamičkih parametara "on - line monitoring" našao je uspješnu primjenu u laboratorijskim i u industrijskim uvjetima. Praćenje zvukova procesa zavarivanja za sada nalazi primjenu samo u laboratorijskim uvjetima.

Rješenjem gore spomenutih problema uveliko ćemo se približiti zavarivanju bez pogreške

Na slici 3.33 shematski je prikazan sustav praćenja:

- dinamičkih parametara zavarivanja
- zvučnih signala procesa zavarivanja



Slika 3.33 Shematski prikaz postavljanja [14]