

## Indukcione zavojnice za merenje kvazistacionarnih magnetnih polja niskog intenziteta

Saša D. Milić

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija

[s-milic@ieent.org](mailto:s-milic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Kratke indukcione zavojnice sa vazдушnim jezgrom velikog radijusa i velikog broja zavojaka se mogu uspešno koristiti kao indukcioni senzori za detekciju kvazistacionarnih magnetnih polja niskog intenziteta, kao što su npr. magnetna polja brodova. U radu je detaljno prikazana primena ovih senzora, a zatim je predložena praktična metodologija određivanja svih neophodnih parametara senzora. Određena je osetljivost senzora sa realnim brojnim vrednostima, izračunata induktivnost na nekoliko načina i pokazano je, uz pomoć većeg broja postojećih formula, da je njeno računanje zahtevan i složen proces. Prikazani su praktični rezultati merenja brodskog magnetizma i proračuni svih parametara zavojnice. Izvršena je komparativna analiza svih rezultata i detaljno su komentarisana uočena odstupanja.

**Ključne reči:** indukciona zavojnica, indukcioni senzor, vazdušno jezgro, sistem za detekciju magnetnih polja brodova, induktivnost, vremenska konstanta.

### 1. Uvod

Procesi projektovanja i izrade bilo kog uređaja se, pre svega, ogledaju u zadovoljenju tehničkih zahteva koji su postavljeni pred konstruktora. Posebne teškoće konstruktorima zadaju tehnički zahtevi za uređajima kojih nema na tržištu, ili su veoma retki, kao što su uređaji za detekciju magnetnih polja brodova. Ti uređaji imaju funkciju da regulišu saobraćaj tako što, detektujući magnetna polja, detektuju prolaz svakog plovnog objekta u definisanoj zoni, kao što su: ulazi i izlazi iz luka, brodskih prevodnica ili saobraćajnih plovnih kanala. Za ovakve potrebe detekcije polja brodova, najčešće se, kao senzori

u detekcionim sistemima, koriste tzv. kratke indukcionne zavojnice sa vazdušnim jezgrom velikog poprečnog preseka i sa velikim brojem zavojaka.

U 2. poglavlju je dat prikaz veće gabaritnih "kratkih" indukcionih zavojnica sa vazdušnim jezgrom čiji je poluprečnik mnogo veći od dužine zavojnice. Pojam "kratke" označava da je njihova dužina značajnije manja od njihovog prečnika.

U 3. poglavlju je dat tehnički aspekt primene indukcionih zavojnica kao indukcionih senzora za detekciju broskog magnetizma. Prikazana je konceptualna šema sistema daljinskog nadzora broskog magnetizma i uprošćeni metod izračunavanja vertikalne komponente broskog magnetnog polja koju detektuje indukcionni senzor.

U 4. poglavlju je dat proračun neophodnih parametara indukcionne zavojnice na osnovu tehničkih zahteva, odnosno na osnovu zahtevane osetljivosti, radne učestanosti i donje granice merenja indukcije kada se ona korisiti kao indukcionni senzor za detektovanje sporopromenljivih tj. kvazi-stacionarnih magnetnih polja učestanosti. Prikazani su praktični rezultati merenja vertikalnih komponenti magnetne indukcije za nekoliko tipova brodova.

U 5. poglavlju je posebno obraćena pažnja na određivanje induktivnosti zavojnice s obzirom na teškoće koje postoje u tom procesu. Poznato je da je induktivnost indukcionih zavojnica sa vazdušnim jezgrom, velikim brojem zavojaka i velikim gabaritima komplikovano odrediti jer ne postoji egzaktan matematički proračun koji se može univerzalno primeniti na različite konstrukcije ovakvih zavojnica. Prikazani su i poredbeno analizirani proračuni induktivnosti dobijeni primenom nekoliko poznatih metoda. Napravljen je simulacioni model i prikazani su rezultati određivanja amplitudne i fazne karakteristike projektovanog senzora.

## 2. Proračun elektromagnetne indukcije indukcionne zavojnice

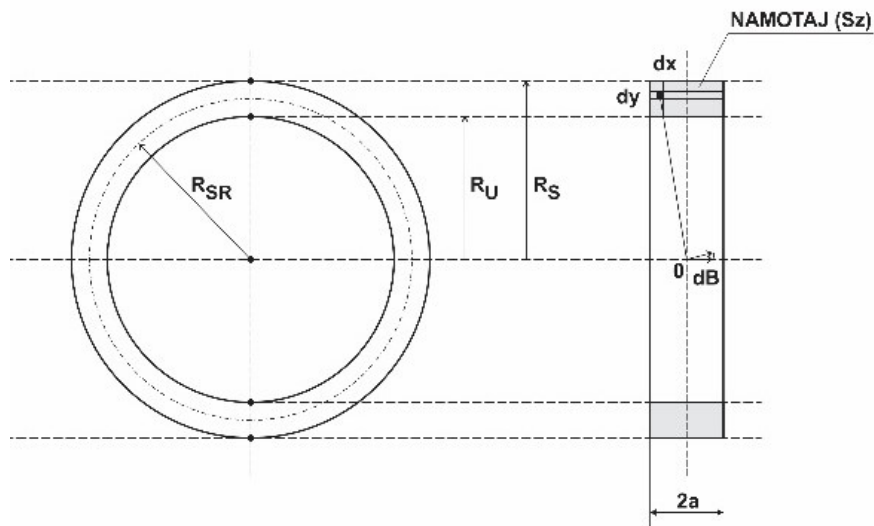
S obzirom da se radi o indukcionnoj zavojnici, posmatračemo promenu komponente magnetne indukcije u vremenu ( $dB/dt$ ) koja se poklapa sa osom senzora. Kakvogod da je promena magnetske indukcije, ona usled promene  $dB/dt$  izaziva indukovanu elektromotornu silu (EMS) u zavojnici.

U osnovi proračun indukcionne zavojnice (sl.1) se zasniva na primeni Bio-Savarovog zakona (1), [1]:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2} \quad (1)$$

gde su:

- $I$  - struja
- $\vec{dl}$  - diferencijal vektora dužine
- $\vec{r}_0$  - jedinični vektor
- $r$  - rastojanje
- $\mu_0$  - magnetna permeabilnost vakuuma



Slika 1. Indukciona zavojnica

Polazna jednačina u detaljnom proračunu magnetne indukcije indukcione zavojnice većih gabarita i velikog broja zavojava (sl.1) je jednačina elektromagnetne indukcije u osi jednog strujnog zatvorenog kružnog zavojava (2), [2]:

$$B(x) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{y^2}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

Indukcione zavojnice većih dimenzija zahtevaju složeniji proračun induktivnosti nego zavojnice manjih dimenzija. Posmatraćemo ovu indukcionu zavojnicu kao "kratki" šuplji solenoid (bez jezgra) čiji je poprečni presek dat na sl.1. Naziv "kratki" označava da je širina zavojnice mnogo manja od njenog srednjeg poluprečnika tj. da je  $2 \cdot a \ll R_{SR}$ .

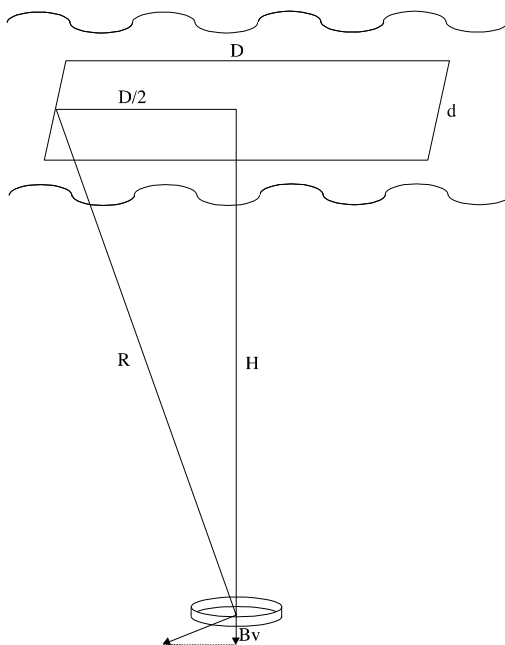
### 3. Tehnički aspekt primene indukcione zavojnice kao indukcionog senzora

Kratke indukcione zavojnice sa vazdušnim jezgrom, velikim brojem zavoja i velikim gabaritima se često koriste kao magnetni senzori za detekciju malih i sporopromenljivih (kvazistacionarnih) magnetnih polja. Tako se mogu detektovati objekti, poput brodova, koji se kreću u magnetnom polju Zemlje i time izazivaju promenu  $dB/dt$ . Da bi se objasnila praktična primena ovakvih senzora, korisno je sagledati jednu karakterističnu oblast njene upotrebe. Ovde ćemo u tu svrhu prikazati i pojasniti način merenja i detekcije brodskog magnetizma.

U prvoj aproksimaciji, sa aspekta vertikalne komponente magnetske indukcije, brod možemo posmatrati kao jednostavnu strujnu konturu pravougaonog oblika koja se nalazi na površini vode (sl.2). Magnetsko polje ove strujne konture predstavlja vertikalnu komponentu magnetske indukcije broda. Na osnovu Bio-Savarovog zakona, primenjenog na prav provodnik ograničene dužine [2]:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \quad (3)$$

gde su  $\theta_1$  i  $\theta_2$  uglovi koji definišu granice integracije u Bio-Savarovom zakonu, a ugao  $\alpha$  definiše vertikalnu komponentu magnetske indukcije.

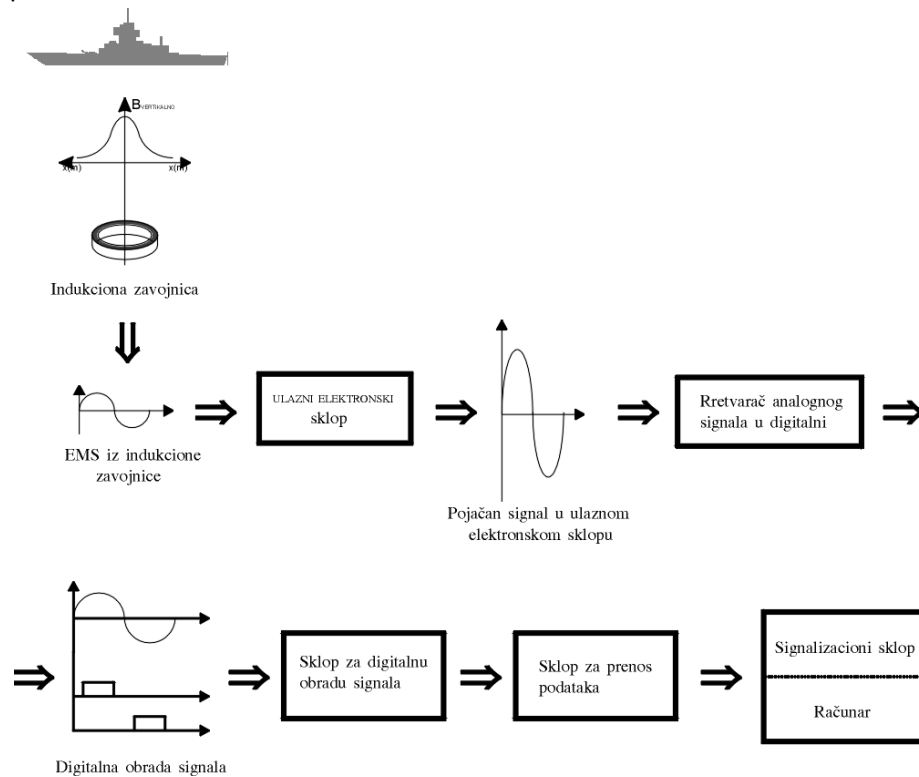


Slika 2. Aproksimacija broda strujnom konturom

Daljim proračunom se dolazi do izraza za vertikalnu komponentu magnetske indukcije cele konture (tj. prve aproksimacije vertikalne komponente brodskog magnetizma), čiji se pravac poklapa sa vektorom površine inducionog senzora:

$$B_v = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{d \cdot D}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + H^2} + \frac{d \cdot D}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + H^2} \right) \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 + H^2}} \quad (4)$$

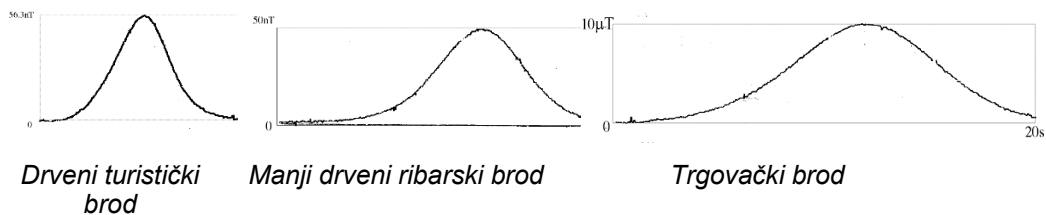
Posmatrajući uprošćene talasne oblike signala sa sl.3 vidimo kako se vrši, prvo transformacija signala u samom senzoru, a zatim i obrada signala tj. elektromotorne sile koja se dobija na izlazu senzora. Polazeći od premise da treba meriti vertikalnu komponentu brodskog magnetizma, kao najizraženiju, zaključujemo da pozicija senzora-zavojnice treba da bude takva da promena fluksa kroz njenu površinu treba da bude maksimalna. Iz prethodno rečenog proizilazi da se indukcion sensor - zavojnica pozicionira na dnu reke, mora ili kanala tako da se vektor njegove površine postavi normalno na površinu dna, čime se omogućava maksimalna osetljivost senzora. Svaki drugi položaj umanjuje vrednost signala za kosinus ugla između normale na dno i vektora površine senzora.



Slika 3. Sistem daljinskog nadzora za detekciju prolaska brodova

Radi ilustracija, na sl.4 su date realne vrednosti vertikalnih komponenti magnetne indukcije nekoliko tipa brodova, snimljene sistemom daljinskog nadzora – sl.3).

Na sl.3 je dat uprošćen prikaz automatskog sistema daljinskog nadzora koji služi za detekciju prolaska brodova. Važno je istaći da su za realizaciju ulaznog elektronskog pojačavačkog i filterskog sklopa (sl.3 – blok „ulazni elektronski sklop“) korišćeni instrumentacioni operacioni pojačavači sa niskom potrošnjom s obzirom na zahtevanu autonomiju rada u režimu baterijskog napajanja.



Slika 4. Vertikalne komponente magnetne indukcije za različite tipove brodova

Vrednosti magnetnih indukcija i vreme trajanja signala su direktne posledice količina feromagnetnih materijala od kojih su napravljeni brodovi (korita, motori, vrsta robe koju prevoze...) i brzine kretanja preko indukcionog senzora.

#### 4. Definisanje parametara indukcione zavojnice

S obzirom da je ovde reč o indukcionalnoj zavojnici kao indukcionalnom senzoru, potrebno je odrediti i njenu osetljivost kao senzora. Osetljivost indukcionog senzora predstavlja najmanju vrednost  $dB/dt$  [T/s] koja izaziva EMS dovoljnu da se obradi u elektronskom sklopu koji obrađuje signale dobijene od senzora. Indukcioni senzor koji radi na bazi indukcione zavojnice sa vazдушnim jezgrom se projektuje na osnovu zahtevane osetljivosti tj. na osnovu zahteva da se može detektovati najmanja vrednost osne komponente magnetske indukcije, koja se menja po sinusnom zakonu sa definisanom nominalnom učestanošću (5), (6):

$$B = B_m \cdot \sin \omega t \tag{5}$$

$$\frac{dB}{dt} = \omega \cdot B_m \cdot \cos \omega t \tag{6}$$

za  $t=0$  s se dobija maksimalni gradijent (7):

$$\frac{dB}{dt} = \omega \cdot B_m = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \quad (7)$$

Pomoću velikog broja zavojaka i velike efektivne površine svakog pojedinačnog zavojka se obezbeđuje dovoljna osetljivost senzora, odnosno dovoljna detektabilna promena magnetnog polja tj. indukovane elektromotorne sile  $e=d\Phi/dt$ .

Prvo je neophodno postaviti tehničke zahteve, odnosno definisati karakteristike kratke indukcione zavojnice koju hoćemo da koristimo kao indukcioni senzor.

Pretpostavimo sad da su metrološki zahtevi realne vrednosti definisane na osnovu većeg broja izmerenih vertikalnih komponenti magnetnih indukcija brodova:

- minimalna vrednost indukcije u osi senzora koja se može detektovati  $B_m=10\text{nT}$
- nominalna učestanost  $f=0.5\text{Hz}$
- amplituda indukovane elektromotorne sile  $E_m=200\mu\text{V}$

Na osnovu postavljenih zahteva se računa osetljivost:

$$\frac{dB}{dt} = \omega \cdot B_m = 2 \cdot \pi \cdot 0.5 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ nT} = 31.4 \frac{\text{nT}}{\text{s}} \quad (8)$$

Proračun EMS (e) (9), (10) je sproveden pod pretpostavkom da se promena magnetske indukcije vrši po sinusnom zakonu (1) i (2) i prethodno navedenim zahtevima:

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -N \cdot S \cdot \frac{d(B_m \cdot \sin \omega t)}{dt} \quad (9)$$

$$e = -N \cdot R_{SR}^2 \cdot \pi \cdot B_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (10)$$

Amplituda indukovane elektromotorne sile  $E_m$  ujedno predstavlja i ukupnu osetljivost ulaznog elektronskog sklopa za dalju obradu signala iz senzora. Kada u jednačinu (10) uvrstimo konkretne vrednosti dobija se:

$$E_m = N \cdot S \cdot \omega \cdot B_m = N \cdot R_{SR}^2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \quad (11)$$

Iz (11) dobijemo da nam je leva strana izraza funkcija dve nepoznate, broja zavojaka  $N$  i površine poprečnog preseka senzora  $S$ , odnosno, broja zavojaka  $N$  i kvadrata srednjeg poluprečnika  $R_{SR}^2$  (12) i (13):

$$N \cdot S = \frac{E_m}{\omega \cdot B_m} = \frac{E_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_m} \quad (12)$$

$$N \cdot R_{SR}^2 = \frac{E_m}{\pi \cdot \omega \cdot B_m} = \frac{E_m}{2 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot B_m} \quad (13)$$

Karakteristike ulaznog sklopa sa Sl.3 (potiskivanje šuma, propusni opseg i pojačanje) definišu donju granicu EMS:

$$E_m = 200 \mu V$$

pa zamenom brojnih vrednosti dobijamo:

$$N \cdot S = 6366.2 \text{ [zav} \cdot \text{m}^2] \quad (14)$$

$$N \cdot R_{SR}^2 = 2026.4 \text{ [zav} \cdot \text{m}^2] \quad (15)$$

Sad je potrebno odrediti obe nepoznate veličine, broj zavojaka i srednji poluprečnik zavojnice. Postavićemo sledeće konstrukcione zahteve:

Srednji poluprečnik zavojnice:  $R_{SR} = 200 \text{ mm}$

Širina zavojnice:  $2 \cdot a = 100 \text{ mm}$

Poluprečniku bakarne žice:  $r_d = r_{Cu} = 0.1 \text{ mm}$

Zamenom brojnih vrednosti u (24) se dobija:

$$N = 50660 \text{ [zav]}$$

Površina poprečnog preseka namotaja ( $S_Z$ ) je:

$$S_Z = N \cdot r_d^2 \cdot \pi \quad (16)$$

$$d = R_S - R_U = \frac{S_Z}{2 \cdot a} \approx 16 \text{ mm} \quad (17)$$

odnosno:

$$R_S = 208 \text{ mm}$$

$$R_U = 192 \text{ mm}$$

Računanje otpornosti zavojnice se može izvršiti preko srednjeg poluprečnika s obzirom da je debljina namotaja senzora mnogo manja od njegovog srednjeg poluprečnika ( $d \ll R_{SR}$ ):

$$R_Z = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S_{Cu}} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2 \cdot N \cdot R_{SR}}{r_{Cu}^2} \quad (18)$$

gde su:

$\rho_{Cu}$  - specifična otpornost bakra ( $1.68 \cdot 10^{-8} \Omega m$ )

$l$  - dužina bakarnog provodnika (žice)



$S_{Cu}$  - poprečni presek bakarnog provodnika

$r_{Cu}$  - poluprečnik poprečnog preseka žice

pa se zamenom brojnih vrednosti dobija:

$$R_z = 34044 \Omega$$

## 5. Proračun induktivnosti indukcione zavojnice

Merenje induktivnosti zavojnica pomoću naizmeničnih mernih mostova (Maksvel-Vinov, Hejov, Keri-Fosterov, Vagnerov...) takođe može da bude problematično zbog: osetljivosti i nelinearnosti induktivnih i kapacitivnih elemenata mosta, zbog velike induktivnosti i male učestanosti (u konkretnom slučaju), pri određivanju vremenskih konstanti, zbog zahtevane tačnosti učestanosti naizmeničnog izvora (npr. na određivanje nepoznate induktivnosti upotrebom Maksvelovog mosta ne utiče frekvencija izvora, dok pri određivanju nepoznate induktivnosti upotrebom Hejovog mernog mosta mora se voditi računa o učestanosti izvora) itd. Ako se dodatno u razmatranje uzmu zavojnice sa jezgrima različitih feromagnetnih materijala, onda se problem merenja induktivnosti dodatno usložnjava zbog još izraženije nelinearnosti i gubitaka u jezgru, ali to već nisu teme ovog rada.

Modelovanje kratke indukcione zavojnice velikih dimenzija i velikog broja zavojaka je veoma složen problem. Naročito je teško odrediti induktivnost takve zavojnice. Ovaj problem je prepoznao još Maksvel davne 1873. godine [3]. Ono što je odavno prepoznato je da induktivnost takve većegabaritne zavojnice raste sa kvadratom njenog broja zavojaka i sa porastom njenog poluprečnika [4]. Pojavom snažnih računara i matematičkih metoda proračuna koje se zasnivaju na metodi konačnih elemenata, ovi proračuna su u novije vreme postali tačniji. Međutim i primena ove metode je složen proces i zahteva detaljno poznavanje geometrije zavojnice i definisanje početnih uslova. Čest način proračuna magnetne indukcije, magnetnog fluksa, indukovane elektromotorne sile i induktivnosti indukcionih zavojnica se svodi na pojednostavljen pristup proračunu. To podrazumeva da je za proračun potreban broj zavojaka i srednja vrednost poluprečnika zavojnice, pri čemu se zanemaruje njena geometrija u celini. Proračunavanje parametara indukcionih zavojnica većih dimenzija sa vazдушnim jezgrom i sa velikim brojem zavojaka (od 50000 do 100000 navojaka) je često složen postupak iz razloga što je nemoguće proračune vršiti samo na osnovu srednjeg zavojka zbog velike greške koja se tada javlja. Ovde u radu je dato nekoliko pristupa proračuna induktivnosti, koji se mogu nazvati inženjerskim, jer na konkretnom primeru zavojnice pokazuje primena postojećih metoda, od koji su neke i danas aktuelne jer se na njima baziraju on-line kalkulatori i inženjerske praktične formule.

Posmatračemo kratku indukcionu zavojnicu kao šuplji solenoid (bez jezgra) sa sl.1. Cilj nam je da izračunamo induktivnost date zavojnice koju koristimo kao senzor detekcije sporopromenljivog magnetnog polja u opsegu od 0Hz-1Hz (gornju granicu učestanosti je moguće proširiti i do nekoliko Hz, jer se tako daje mogućnost da se mere magnetna polja veoma brzih čamaca i jahti) i minimalne amplitude magnetne indukcije od  $B=10\text{nT}$  (vrednost je određena minimalnim magnetnim poljem koje senzor treba da detektuje).

Sa ciljem da se ukaže na složenost problema računanja induktivnosti ovog tipa zavojnica, ovde je izloženo više pristupa u njihovom određivanju:

### 5.1. Proračun induktivnosti na bazi Groverove jednačine

Za datu zavojnicu, izračunaćemo induktivnost na bazi Groverove jednačine za kružnu zavojnicu sa četvrtastim poprečnim presekom i proizvoljnim dimenzijama [5-7]:

$$L_Z = 0.019739 \cdot \frac{2 \cdot R_{SR}}{2 \cdot a} \cdot R_{SR(cm)} \cdot N^2 \cdot K \quad [\mu\text{H}] \quad (19)$$

Za određivanje koeficijenta  $K$  (19) potrebno je odrediti Nagaokin koeficijent  $k_N$  (20) i Groverov  $k_G$  (21):

$$\frac{2 \cdot a}{2 \cdot R_{SR}} = 0.25 \stackrel{\text{TABLICE}}{\Rightarrow} k_N = 0.3654 \quad (20)$$

$$\frac{d}{2 \cdot a} = 0.16 \stackrel{\text{TABLICE}}{\Rightarrow} k_G = 0.0298 \quad (21)$$

$$K = k_N - k_G = 0.3356 \quad (22)$$

pa se zamenom brojnih vrednosti u (19) dobija:

$$L_Z \approx 1360 \text{ H.}$$

### 5.2. Proračun induktivnosti na bazi Vilerove jednačine

Za datu zavojnicu, izračunaćemo induktivnost na bazi Vilerove jednačine (dimenzije u cm) [5-7]:

$$L_Z = \frac{31.6 \cdot R_U^2 \cdot N^2}{6 \cdot R_U + 9 \cdot (2 \cdot a) + 10 \cdot (R_S - R_U)} \quad [\mu\text{H}] \quad (23)$$

pa se zamenom brojnih vrednosti dobija:

$$L_Z \approx 1352 \text{ H}$$

### 5.3. Proračun na bazi jednačine za induktivnost diska

Za datu zavojnicu, izračunaćemo induktivnost na bazi jednačine za proračun indukcije diska [4] sa dodatim članom  $N^2$  koji množi taj izraz (24):

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2}{4 \cdot \pi} \cdot R_S \cdot P \cdot F \quad (24)$$

Uz uslov da je  $(R_S - R_U) \ll R_{SR}$  važi relacija (25):

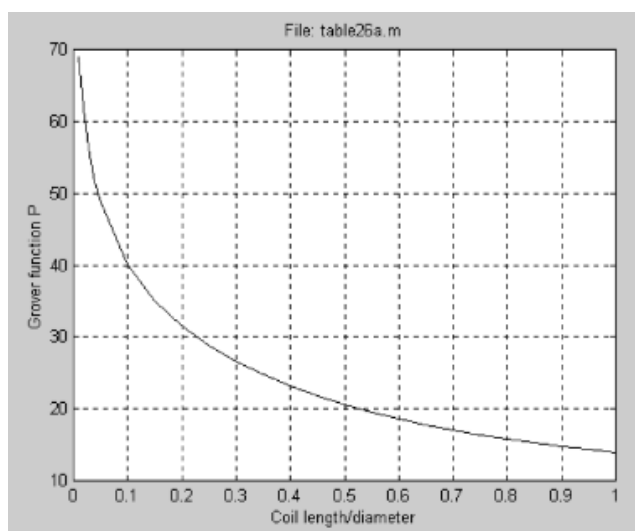
$$P = f\left(\frac{R_S - R_U}{2 \cdot R_{SR}}\right) \quad (25)$$

Za  $F \approx 1$  i  $R_{SR} \gg d$  se dobija (26):

$$\frac{2 \cdot a}{2 \cdot R_{SR}} = \frac{0.1m}{2 \cdot 0.2m} = 0.25 \Rightarrow P = 27.5 \quad (26)$$

gde se korekcionni koeficijent  $P$  izračunava sa grafika (sl.5). Zamenom brojnih vrednosti se dobija:

$$L_Z \approx 1412 \text{ H}$$



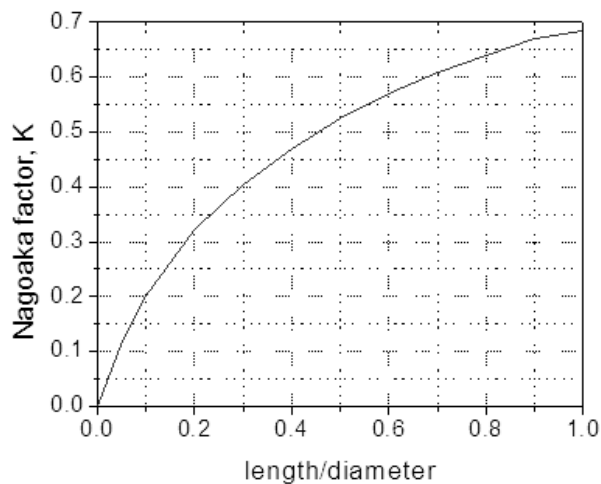
Slika 5. Zavisnost Groverovog koeficijenta od odnosa širine i prečnika zavojnice

#### 5.4. Proračun induktivnosti na bazi Nagaokine jednačine

Za datu zavojnicu, izračunaćemo induktivnost na bazi Nagaokine jednačine (27) i interpoliranog Nagaokinog koeficijenta (28) koji zavisi od odnosa širine i prečnika zavojnice (sl.6):

$$L_Z = \pi \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{R_{SR}^2}{2 \cdot a} \cdot K \quad (27)$$

$$K\left(\frac{2 \cdot a}{2 \cdot R_{SR}}\right) = K(0.25) = 0.36 \quad (28)$$



Slika 6. Zavisnost Nagaokinog koeficijenta od odnosa širine i prečnika zavojnice

Zamenom brojnih vrednosti se dobija:

$$L_Z \approx 1459 \text{ H}$$

#### 5.5. Proračun induktivnosti na bazi empirijske jednačine

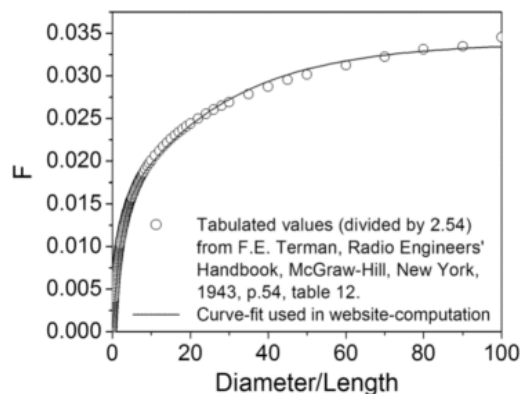
Za datu zavojnicu, izračunata je induktivnost pomoću *on-line* kalkulatora koji proračun vrši na bazi trivijalne empirijske jednačine [8]:

$$L = N^2 \cdot 2 \cdot R_{SR} \cdot F \quad (29)$$

gde se korekcionni faktor  $F$  izračunava sa sl.7.

Dobijena vrednost indukcije je:

$$L_Z \approx 1508 \text{ H}$$

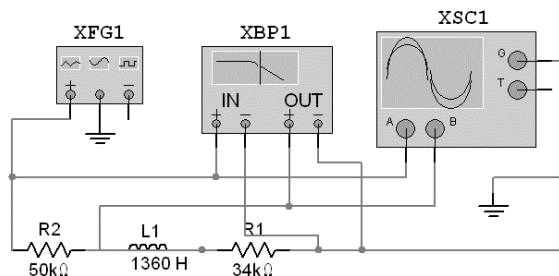


Slika 7. Zavisnost koeficijenta  $F$  od odnosa prečnika i širine zavojnice

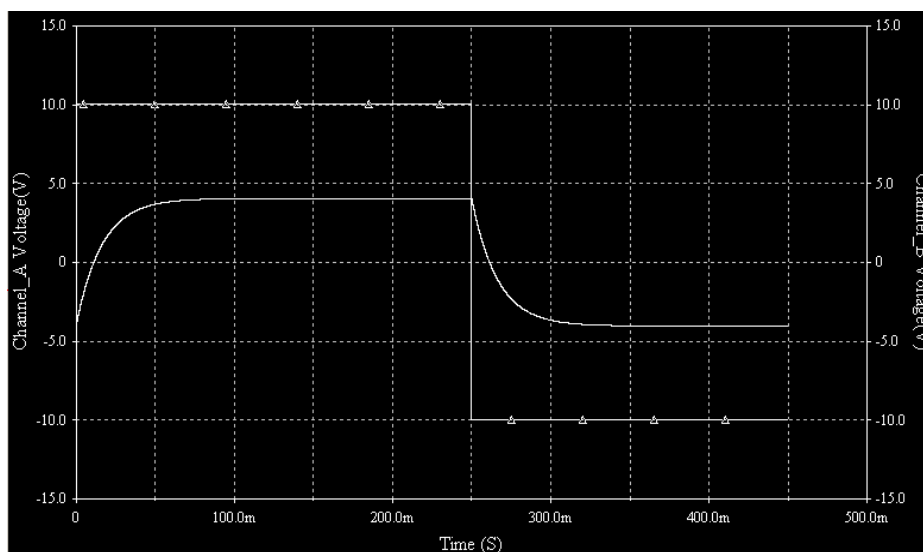
## 6. Amplitudska i fazna karakterisitka senzora

Usvojicemo da je induktivnost zavojnice  $L_2=1360$  H. Ova vrednost je najpribližnija tačnoj vrednosti jer je dobijena složenim proračunom uz pomoću Groverove jednačine (19) koja uzima u obzir veliki broj zavojaka, velike dimenzije zavojnice i njenu konstrukciju, odnosno karakteristične odnose pojedinih dimenzija preko Groverovog i Nagaokinog koeficijenta. Ne bi mnogo pogrešili i da smo se bazirali na Vilerovom proračunu kroz koji je dobijeno  $L_2=1352$  H. Ostali rezultati dobijeni navedenim metodama više odstupaju s obzirom da ne uzimaju dovoljno u obzir konstrukcione karakteristike posmatrane zavojnice.

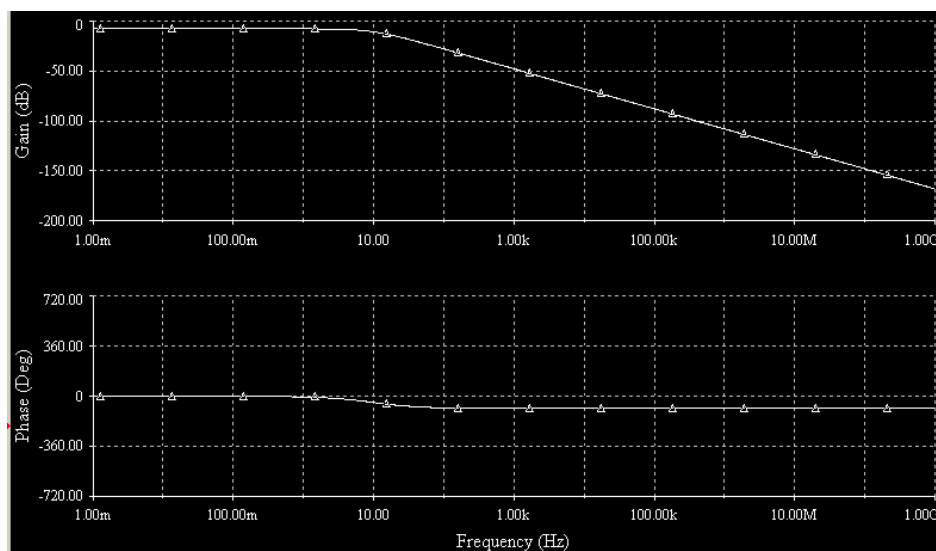
Na sl. 8 je prikazana simulaciona šema. Na red sa zavojnicom ( $R_1=34$  k $\Omega$  i  $L_1=1360$  H) je dodat šant otpornosti  $R_2=50$  k $\Omega$ . U simulacionom programu su dobijeni talasni oblici naponskih signala (sl.9) i određene amplitudna i fazna karakteristika (sl.10).



Slika 8. Simulaciona šema



Slika 9. Talasni oblici napona: A kanal – generator, B kanal – zavojnica



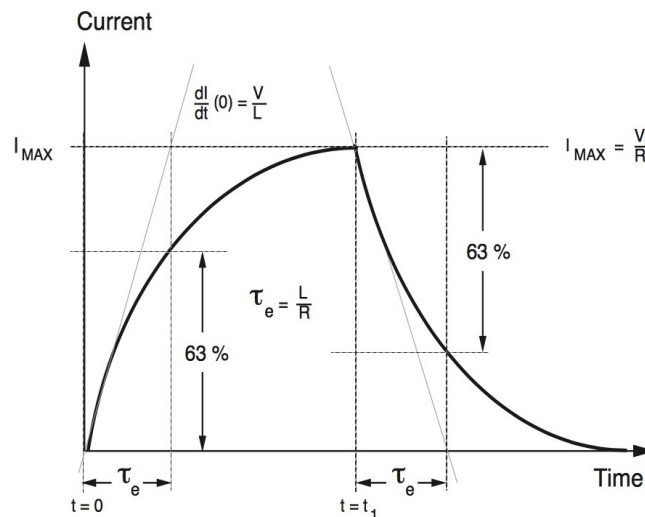
Slika 10. Amplitudska i fazna karakteristika

S obzirom na prirodu merenja i veoma male nivoe mernih signala, veoma je važno da amplitudska karakteristika bude konstantna u proširenom mernom opsegu (1 mHz-10 Hz) da bi se mogla precizno podesiti kaskadna

pojačanja ulaznog elektronskog sklopa (sl.3) koji obrađuje EMS iz indukcione zavojnice.

Vremenska konstanta (sl.11) indukcione zavojnice (30) je:

$$\tau = \frac{L_1}{R_1 + R_2} = \dots = 16.2 \text{ ms} \quad (30)$$



Slika 11. Grafička interpretacija vremenske konstante

## 7. Zaključak

U radu je prikazan kompletan postupak praktičnog projektovanja indukcione senzora sa vazдушnim jezgrom, velikih dimenzija i sa velikim brojem zavoja. Ova vrsta senzora se često koristi za detekciju i merenje kvazistacionarnih magnetnih polja niskog intenziteta kao što su magnetna polja brodova. Izveden je veći broj jednačina i prikazani su svi koraci proračuna potrebnih za određivanje neophodnih parametara indukcione zavojnice tj. senzora.

Posebna pažnja je posvećena proračunu induktivnosti s obzirom na probleme koji postoje kod proračuna induktivnosti kratkih indukcione zavojnica velikih dimenzija sa vazдушnim jezgrom. Nekoliko proračuna induktivnosti je sprovedeno na praktičnom primeru iste zavojnice. Poznavanje vrednosti induktivnosti senzorske zavojnice je bilo korisno (zbog poređenja rezultata) pri proračunu same zavojnice, tj. njenog efektivnog preseka i broja zavoja.

## Literatura

- [1] J. G. Webster, *Measurement, Instrumentation and Sensors*, Ed. Boca Raton: CRC & IEEE Press, 1999.
- [2] B. Popović, *Osnovi elektrotehnike 2*, Građevinska knjiga, Beograd, 1978, strane: 21, 22.
- [3] James C. Maxwell, *Electricity and Magnetism*, vols. 1 and 2, reprinted in Dover Publications, 1954.
- [4] M. T. Thompson, "Inductance Calculation Techniques --- Part II: Approximations and Handbook Methods", *Power Control and Intelligent Motion*, Dec. 1999, pages: 1-11.
- [5] F. W. Grover, *Inductance Calculations: Working Formulas and Tables*, Dover Publications, Inc., New York, 1946.
- [6] R. Lundin, "A handbook formula for the inductance of a single-layer circular coil", *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, issue 9, 1985., pages: 1428-1429. [DOI: 10.1109/PROC.1985.13304](https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13304)
- [7] Morgan Brooks, *Inductance of Coils*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Production Note, 2007.
- [8] Formule i on-line kalkulatori za računanje induktansi, dostupno na sajtu: [http://www.pulsedpower.eu/toolbox/toolbox\\_inductances.html#inductances](http://www.pulsedpower.eu/toolbox/toolbox_inductances.html#inductances)

**Abstract.** Short air core induction coils with a large radius and a large number of turns can be successfully used as induction sensors for detecting low-intensity quasistationary magnetic fields, such as magnetic fields of ships. The application of these sensors is presented in detail, and then a practical methodology for determining all the necessary parameters of the sensor is proposed. The sensitivity of sensors with actual design parameters is determined and inductance is calculated in several ways. The practical results of ship's magnetism measurement and the calculation of all parameters of the coil are presented. A comparative analysis of all results was performed and the observed deviations were thoroughly commented on.

**Keywords:** air core induction coil, induction sensor, system for detection of magnetic fields of vessels, inductance, time constant.



# **Induction Coils for Measuring Low Frequency and Low Intensity Magnetic Fields**

Saša D. Milić

Rad primljen u uredništvo: 03.09.2020. godine.

Rad prihvaćen: 26.10.2020. godine.

