

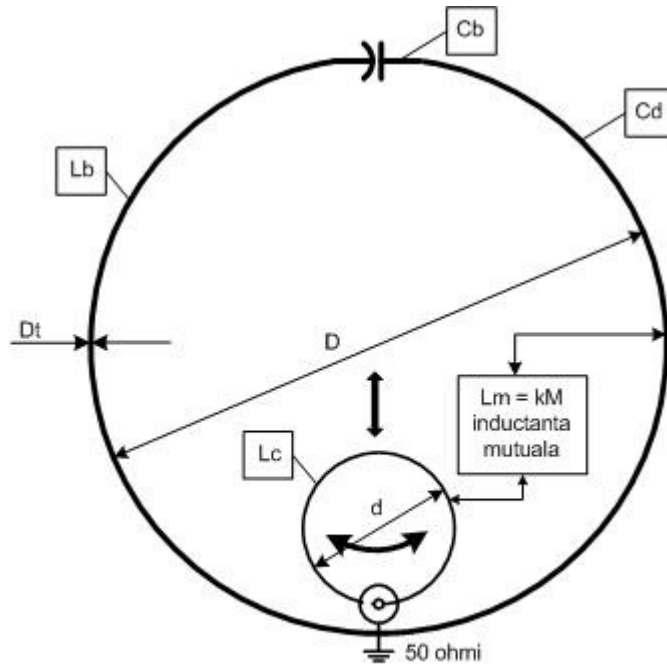
Adaptarea fină a unei antene magnetice alimentată printr-un cuplaj inductiv cu buclă Farady.

Cristian Colonati – YO4UQ

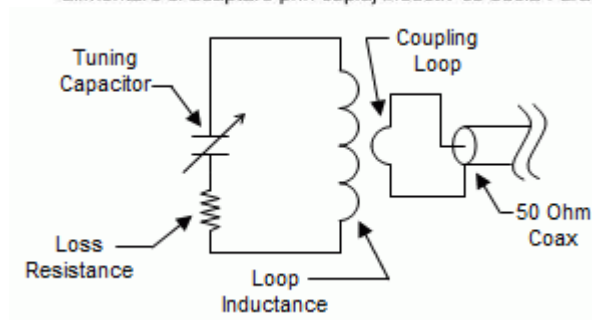
Abstract.

În comparație cu adaptarea antenelor magnetice prin cuplaj gamma (Γ) foarte bine dezvoltat atât teoretic cât și practic, despre cuplajul cu buclă inductivă referințele teoretice și recomandările practice sunt sumare și relativ insuficient fundamentate. În expunere se prezintă o încercare teoretică simplă, ajutată de măsurători pe o realizare practică, în scopul ameliorării cunoștințelor despre funcționarea și reglajul fin al adaptării antenelor magnetice alimentate cu buclă inductivă.

Schema de principiu a unei antene magnetice alimentate și adaptate prin cuplaj inductiv cu buclă Faraday.



Schema de principiu pentru antena magnetica cu alimentare si adaptare prin cuplaj inductiv cu bucla Faraday



În schema de principiu avem următoarele semnificații:

D = diametrul buclei principale din țevă de cupru 22mm

d = diametrul buclei de cuplaj inductiv (Faraday) din cablu coaxial RG8 A/U Mil

Dt = diametrul tubului de țevă 22mm

Cb = capacitatea de acord a antenei, condensator variabil $5 \div 100\text{pF}$ vid

Cd = capacitatea distribuită a buclei principale

Lb = inductanța buclei principale

Lc = inductanța buclei de cuplaj inductiv

$L_m = kM =$ inductanța mutuală dintre cele două bucle unde $M = \sqrt{L_b \cdot L_c} = (L_b \cdot L_c)^{1/2}$ iar $0 \leq k \leq 1$ este coeficientul de cuplaj care depinde de poziția relativă a celor două inductanțe și de factorii constructivi ai celor două bucle: lungime, suprafață (semnul $\sqrt{\quad}$ se citește "radical din").

Antena magnetică, parametrii constructivi ai buclei principale.

Antena circulara din țevă de cupru de $D_t = \Phi 22\text{mm}$ cu diametrul buclei principale de $D = 1,1\text{m}$ și un perimetru de $P = 3,5\text{m}$.

Inductanța buclei antenei (1 spiră) măsurată cu LC-metrul electronic al lui YO9HVP este de $L_b = 1,98\mu\text{H}$.

Acordul se face cu un condensator variabil cu vid cu flanșe circulare cu ecartul $C_b = 5 \div 100\text{pF}$ la 5kV .

Pentru unele măsurători, în locul acestuia, a fost folosit un condensator fix cu vid de $C_b = 53,4\text{pF}$ la 5kV .

Capacitatea distribuită proprie a buclei dată de dimensiunile mecanice de material și evidențiate de mai multe programe pentru dimensionarea antenelor magnetice este dată la valoarea de $C_d = 9\text{pF}$.

Antena magnetică, parametrii constructivi ai buclei Faraday de cuplaj inductiv.

A fost aleasă cea mai simplă formă constructivă pentru bucla de cuplaj inductiv.

Diametrul recomandat de literatura de specialitate este de aproximativ $d = 1/5 \cdot D = 110/5 = 22\text{cm}$.

În condițiile prezentului experiment a fost luat un diametru foarte puțin mai mare $d = 25\text{cm}$.

Constructiv bucla de cuplaj a fost realizată din cablu coaxial RG8 A/U Mil de înaltă calitate.

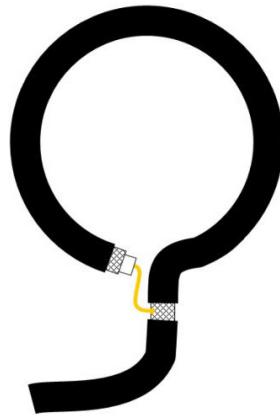


Fig. 1 - Bucla Faraday de cuplaj inductiv



Fig. 2 – Bucla Faraday constructiv față



Fig. 3 – Bucla Faraday constructiv spate

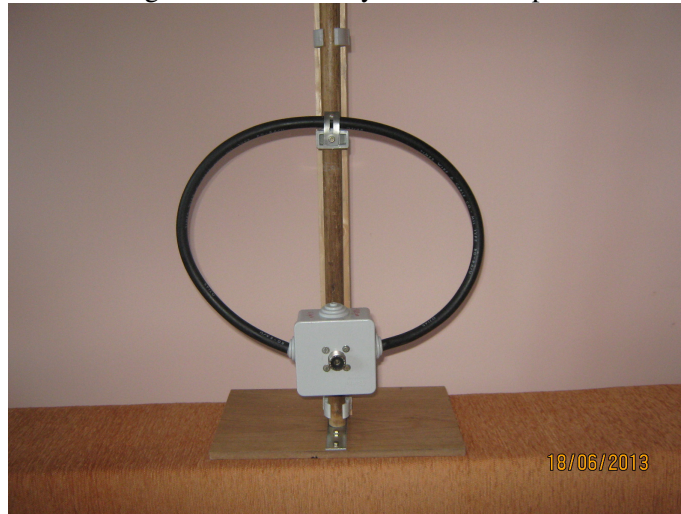


Fig. 4 – Bucla Faraday pe montură glisantă față



Fig. 5 – Bucla Faraday pe montură detaliu lateral

Bucla de cuplaj inductiv a fost realizată pe o montură separată pentru a putea să fie deplasată în sus sau în jos în raport cu bucla principală sau să fie rotită în plan vertical față de planul buclei principale. Din definiția inductanței mutuale dacă se modifică coeficientul k se modifică inductanța mutuală și după cum vom vedea și inductanța totală a ansamblului antenei. Inițial montura buclei de cuplaj se așează în același plan cu bucla principală, în punctul cel mai de jos, vis-a-vis de condensatorul variabil de acord C_b .



Fig. 6 – Vedere de ansamblu antena magnetică și bucla de cuplaj inductiv, separate.



Fig. 7 – Antena și bucla de cuplaj inductiv în ansamblul funcțional (cu veverițe de pluș... hi)

Măsurători asupra parametrilor unei antene magnetice cu alimentare și adaptare prin cuplaj inductiv cu buclă Faraday.

Pentru determinarea parametrilor în condițiile de amator am folosit două echipamente de măsură: un LC-metru electronic (made YO9HPV) și analizorul de antene miniVNA cu programul Ig_MiniVNA dezvoltat de F4CLB. Pentru unele analize detaliate au fost folosite fișierele eșantionate de miniVNA și prelucrate cu programul Zplots al lui AC6LA. Pentru acuratețea măsurătorilor inițiale a fost folosit, în locul condensatorului variabil, un condensator fix cu vid de capacitate declarată de 50pF 5kV (made în URSS – multumiri lui YO4BTB - Virgil). Rezultatul măsurătorilor și valoarea declarată a parametrilor:

- Inductanța buclei principale $L_b = 1,98\mu\text{H}$
- Inductanța buclei de cuplaj inductiv $L_c = 0,12\mu\text{H}$
- Capacitatea principală de acord măsurată cu LCmetru $C_b = 53,4\text{pF}$
- Capacitatea distribuită a buclei principale $C_d = 9\text{pF}$ (conform mai multor programe de evaluare funcție de forma și dimensiunile buclei principale). Se poate consulta imediat www.66pacific.com, Online calculator, Magnetic Loop Antennas, Metric.
- S-a măsurat frecvența de rezonanță a ansamblului astfel construit cu ajutorul analizorului de antenă miniVNA pentru SWR minim și s-a obținut frecvența de $F = 12510,4\text{kHz}$.
- Inductanța totală este:

$$L = L_b + L_c + k.M = L_b + L_c + k.\sqrt{L_b.L_c} = L_b + L_c + k.(L_b.L_c)^{0,5}$$

Simbolul $\sqrt{\quad}$ se citește ca “radical din”. Cu valorile cunoscute:

$$L = 1,98 + 0,12 + k.M = 2,1 + k.M \text{ unde: } M = \sqrt{L_b.L_c} = \sqrt{1,98.0,12} = 0,487\mu\text{H}$$

- Capacitatea totală este $C = C_b + C_d + C_x$ unde C_x sunt capacități parazite accidentale care nu pot fi măsurate. Dacă măsurătorile de rezonanță se realizează cu miniVNA în condițiile unui spațiu liber de

proximități metalice sau alte obiecte: pe o terasă liberă sau în mijlocul unei camere degajate, în curte, etc.
Cx se poate neglija.

- Capacitatea totală devine: $C = 53,4 + 9 = 62,4\text{pF}$

Din binecunoscuta formulă a lui Thomson:

$$F^2 = 25330 / L.C$$

avem pentru datele măsurate:

$$12,5104^2 [\text{MHz}] = 25330 / L[\mu\text{H}].C[\text{pF}] = 25330 / [(2,1 + k.M).62,4] = 25330 / [(2,1 + k.0,487).62,4]$$

Singura necunoscută în această formulă este coeficientul de cuplaj k.

Făcând un calcul simplu oținem: $k = 0,838$ de unde inductanța totală de acord rezultă $L = 2,628\mu\text{H}$.

Consecință imediată!

Dacă bucla de cuplaj inductiv se mută către sus sau se rotește din planul principal se modifică coeficientul inductanței mutuale k care depinde numai de poziția reciprocă a celor două inductanțe iar implicit și valoarea inductanței totale L. Consecința este că se modifică doi parametri de funcționare: frecvența de rezonanță și adaptarea, SWR-ul. Acest lucru se observă imediat cu ajutorul unei noi scanări cu ajutorul miniVNA. Modificarea coeficientului de inducție mutuală se face în sensul scăderii acestuia. Să vedem teoretic care ar fi influența scăderii acestuia cu 0,1, adică care va fi frecvența de lucru pentru un $k = 0,738$. Se obține o inductanță totală mai mică de $L = 2,459\mu\text{H}$ și o nouă frecvență de rezonanță de $F^2 = 25330/2,459.62,4 = 165,079$ pentru care $F = 12,848\text{MHz}$ adică un ecart de 338kHz. Pentru o modificare a lui k cu numai 5% se obține teoretic o deviație de frecvența de cca. 250kHz. În același timp se produce și o modificare a raportului de unde staționare SWR prin modificarea parametrilor $|Z|$, R_s , $|X_s|$.

Concluzia nr.1 și măsurători ETAPA 1

Literatura de specialitate și practica radioamatorilor a rezolvat problema adaptării antenelor magnetice printr-o conexiune gamma Γ cunoscută și pentru multe alte antene. Nu am întâlnit în documentația baleiată detalii despre adaptarea prin cuplaj inductiv. Singurele referiri sunt făcute cu privire la dimensiunea buclei cu un diametru de aproximativ de 1/5 din D. Există un program de dimensionare pentru antene magnetice furnizat de DG0KW – Klaus, care propune o dimensionare a buclei funcție de frecvență și gradul de degajarea al locului de amplasare. În schimb VK5KLT spune că, citez:

“A loop diameter ratio of 5:1 typically yields a perfect match over a 10:1 or greater frequency range of main loop tuning. Simple transformer action occurs between the primary loop and the feed loop coupled circuit due to the highly reactive field near the resonant primary loop which serves to greatly concentrate magnetic flux lines which cut the small untuned feed loop.”

Am încercat să verific această afirmație „de acord perfect într-o gamă largă de frecvențe” prin determinarea parametrilor de funcționare pentru antena descrisă mai sus, cu ajutorul miniVNA, din 500 în 500 de kHz în intervalul de 9000 la 28000 kHz, cât a permis variația condensatorului variabil.

Variația SWR-ului este descrisă în graficul alăturat măsurătorile fiind făcute pentru poziția cea mai de jos a buclei Faraday de cuplaj inductiv. Bine înțeles că a fost înlocuit condensatorul fix cu un condensator variabil cu vid cu ecartul 5pF la 100pF. Alături de graficul SWR sunt dați sub formă tabelară și ceilalți parametri determinați de miniVNA pentru fiecare punct analizat. Este adevărat că pentru domeniul analizat 9MHz la 28MHz, variația SWR în intervalul 1,02:1 până la 1,56:1 nu este deranjantă, ea intrând în limitele admisibilului în activitatea de radioamator dar nici nu este o adaptare perfectă.

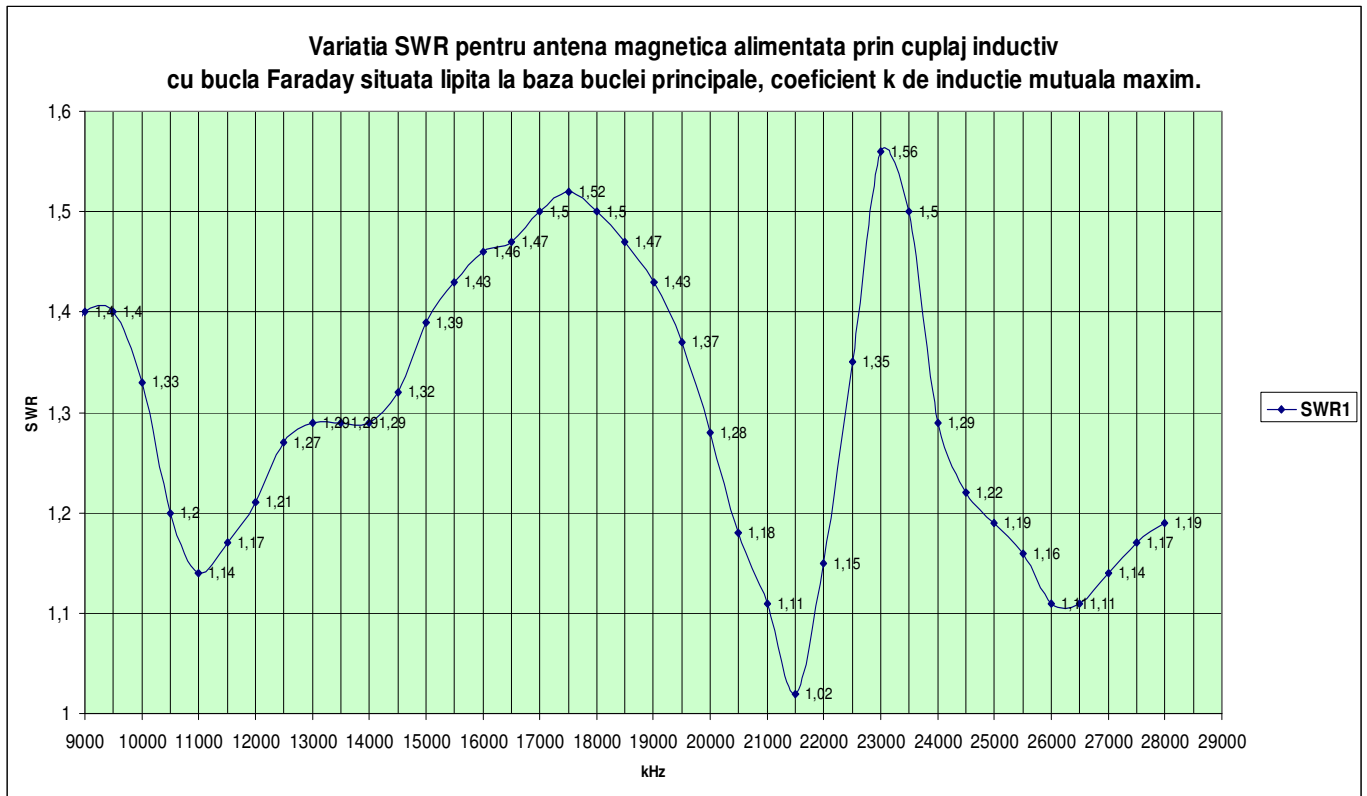


Fig.8 – Variația SWR pentru magnetic LOOP cu buclă Faraday în intervalul 9MHz – 28MHz

F (kHz)	SWR	Z	RL	Ph	Rs	Xs
8845	1,37	47,97	16,14	97,83	45,73	14,47
9000	1,4	44,14	15,62	112,26	42,18	13,32
9500	1,4	47,73	15,5	98,18	45,2	15,44
10000	1,33	54,15	16,97	73,2	52,23	14,47
10500	1,2	50,35	20,66	89,38	49,15	9,24
11000	1,14	55,07	23,42	44,16	54,83	5,18
11500	1,17	54,78	22,24	52,61	54,48	6,69
12000	1,21	59,53	20,25	25,34	59,5	4,86
12500	1,27	62,81	18,67	13,2	62,7	3,38
13000	1,29	63,55	18,08	16,72	63,38	4,62
13500	1,29	64,32	17,85	11,96	64,23	3,47
14000	1,29	64,21	17,96	10,03	64,15	2,87
14500	1,32	64,11	17,26	25,16	63,66	7,56
15000	1,39	61,78	15,73	49,09	59,88	15,2
15500	1,43	62,97	15,03	48,74	60,71	16,7
16000	1,46	57,5	14,5	67,57	54,08	19,52
16500	1,47	49,58	14,39	76,19	46,09	18,12
17000	1,5	47,74	14,03	96,95	44,16	18,14
17500	1,52	44,03	13,68	108,56	40,74	16,7
18000	1,5	38,91	13,97	129,68	37,05	11,89
18500	1,47	38,7	14,5	133,9	37,28	10,41
19000	1,43	36,04	15,09	157,83	35,71	4,89
19500	1,37	36,99	16,14	163,99	36,85	3,25
20000	1,28	39,04	18,2	179,82	39,04	0,03
20500	1,18	42,55	21,83	174,19	42,54	0,7
21000	1,11	45,27	26	171,91	54,27	0,64

21500	1,02	49,25	37,73	98,89	49,78	1,28
22000	1,15	53,62	23,3	59,12	53,26	6,28
22500	1,35	56,41	16,56	65,63	54,36	15,06
23000	1,56	57,12	13,15	71,61	52,31	22,95
23500	1,5	51,78	13,92	84,81	47,77	19,98
24000	1,29	46,69	17,85	105,75	45,29	11,36
24500	1,22	45,87	20,02	115,78	45,13	8,2
25000	1,19	44,41	21,36	134,08	44,07	5,45
25500	1,16	44,93	22,71	137,07	44,7	4,48
26000	1,11	45	25,29	165,4	44,99	1,24
26500	1,11	45,08	25,65	172,26	45,08	0,64
27000	1,14	43,84	23,65	177,18	43,84	0,28
27500	1,17	42,79	22,19	177,71	42,79	0,27
28000	1,19	42,98	22,13	168,39	42,86	1,36

Fig.9 – Variația parametrilor antenei magnetice cu buclă Faraday în intervalul 9MHz – 28MHz

Măsurători ETAPA 2.

În etapa a doua de măsurători, pe aceeași structură și în aceleași condiții ambientale, s-a ridicat bucla de cuplaj inductiv cu cca. 3,5cm și s-a urmărit cu miniVNA până când s-a obținut pe frecvența de 14089kHz cel mai bun SWR de 1:1,02 după cum se vede în Fig.11. S-a lăsat bucla de cuplaj nemișcată și s-au reluat eșantionările parametrilor antenei cu miniVNA între 9000 și 28000kHz.

De această dată pasul de eșantionare s-a făcut pentru comoditate cu 1MHz. Datele detaliate din această a doua sesiune de eșantionare sunt prezentate în tabelul din Fig.10. În continuare au fost preluate datele cu pasul de 1MHz și de la prima măsurătoare și împreună cu cele din cea de a doua au fost puse pe graficul din Fig. 12. Față de prima măsurătoare, în cea de a doua se observă o îmbunătățire remarcabilă a SWR în intervalul 9000 ÷ 21000kHz unde practic acesta este sub valoarea de 1:1,15 pe tot acest interval.

Din tabelul parametrilor detaliați ai celei de a doua măsurători se mai observă că și valoarea lui R_s rămâne foarte aproape de valoarea ideală de 50 ohmi care asigură transferul optim de putere către antenă.

Pentru acest acord ideal la frecvența de 14090kHz a fost făcută și o prelucrare cu Zplots a parametrilor măsurați cu miniVNA și salvați ca fișier [nume].csv. În Fig. 13 este reprezentată grafic această analiză precum și valoarea parametrilor la SWR 1:2. În diagrama Smith inclusă în furnitura Zplots se vede variația impedanței, a parametrilor R_s și X_s , inclusiv semnul acesteia negativ-capacitiv pentru SWR 1:2 la frecvența de 14109kHz.

Despre Zplots găsiți și la <http://www.radioamator.ro/articole/view.php?id=705>.

Să vedem ce se întâmplă dacă după aceste condiții de acord și adaptare ideală intervenim asupra buclei de cuplaj inductiv? Bucla s-a mișcat prin rotație cu cca. 10 grade. Cuplajul mutual inductiv nu a mai fost același, coeficientul de cuplaj k s-a modificat. În consecință atât frecvența de rezonanță (Fig. 14) cât și parametrii de adaptare (Fig. 15) s-au modificat. Modificarea devine evidentă și în diagrama Smith.

Constatări și comentarii finale.

- Dece s-a făcut această mică și simplă demonstrație? S-a făcut pentru a încerca să arătăm că în funcționarea antenei magnetice cu atacul prin cuplaj inductiv intervine și inductanța mutuală care chiar dacă nu poate fi măsurată direct poate fi determinată prin calcul.
- Bucla de cuplaj inductiv a avut diametrul și inductanța proprie puțin mai mari decât cele recomandate de 1/5 din D (20% din diametrul buclei principale), pentru a permite mărirea sau micșorarea inductanței mutuale și a celei totale față de valoarea recomandată.
- Cu ajutorul variației fine a coeficientului de cuplaj al inductanței mutuale se poate face adaptarea antenei magnetice până la valori incredibil de bune 1:1,02 ÷ 1:1,1.
- Variația coeficientului de cuplaj k al inductanței mutuale se poate face în două feluri: prin glisarea buclei în planul antenei sau prin rotirea buclei de cuplaj astfel încât să facă un unghi cu planul antenei. În aceste condiții se poate obține diminuarea SWR până la valori foarte mici într-o acoperire acceptabilă a 4 benzi 10, 14, 18 și 21MHz.
- Deci atenție la eventuala construcție a unei antene magnetice alimentate prin cuplaj inductiv față de poziția buclei mici în raport cu planul antenei principale și distanța acesteia față de bază, punctul diametral opus condensatorului variabil.

- Dintre metodele de alimentare descrise în literatura de specialitate, pe care le găsiți succint prezentate în bibliografia [4] N4SPP – Frank Dorenberg – Magnetic Loop Antenna for 80 – 20 mtr, alimentarea prin cuplaj inductiv prezintă unele avantaje:
 - Lărgimea de bandă de numai $BW = 40$ kHz pentru un SWR de 1:2 pe o anumită frecvență este compensată de un raport semnal/zgomot bun asigurând o recepție liniștită.
 - Față de alimentarea nesimetrică prin cuplaj gamma alimentarea prin cuplaj inductiv nu generează curent de mod comun și nu are nevoie de balun de curent și nici de simetrizare. Păstrează o simetrie perfectă pentru directivitatea față-spate și față de nurile laterale.
 - Bucla Faraday atenuează efectele interferențelor de natura câmpurilor electrice și electrostatice.
 - Antena funcționează ca un transformator în aer alimentat prin bucla secundară și nu există nici o altă cuplare.
- În <http://yo4uq.jimdo.com> la capitolul „Cărți și Articole” mai sunt prezentate diagramele de acord și adaptare fină pentru o antenă magnetică cu diametrul de 70cm adusă la frecvențe rezonanță pentru valoarea a 3 condensatoare fixe de 39pF, 50pF și 120pF. De asemeni găsiți sub formă compresată toate fișierele descărcate de către miniVNA în format .csv care pot fi analizate cu Zplots. Pentru cei care nu au un miniVNA poate fi un exercițiu util și interesant de lucru pe niște fișiere reale eșantionate cu miniVNA.
- Pe cât de simplă pare la prima vedere construcția unor antene magnetice acestea sunt structuri radiante complexe din punct de vedere funcțional, cu modele de radiație și caracteristici de polarizare diversificate.
- Metodele de alimentare, adaptarea la bucla de rezonanță principală, factorii de formă geometrică precum și dimensionările sunt încă un teren vast de experimentare și cercetări teoretico-matematice.
- Documentația despre antene magnetice este extrem de bogată pe Internet cu referințe teoretice și practice în nenumărate variante. În prezenta expunere s-au făcut referințe numai la câteva materiale care au ajutat la elaborarea articolului într-o formă accesibilă, fără implicații teoretice și matematice deosebite.
- Inventivitatea radioamatorilor pentru realizarea acestui tip de antenă a demonstrat disponibilitățile mari de adaptare a execuției la materialele existente și condițiile locale de utilizare. Rămâi practic uimit de câte soluții au putut fi găsite pentru realizările practice ale acestui tip de antenă.
- În condițiile realizării izolației termice a blocurilor este din ce în ce mai greu accesul pe terasele superioare pe care s-a refăcut izolația hidrofugă. O antenă magnetică vă poate ajuta să activați mai departe în trafic, cu pretenții mai modeste, dar cu o calitate superioară a emisiunii: fără armonice, fără unde staționare, cu o recepție liniștită și cu legături chiar spectaculoase în bezile de radiocomunicații digitale, cu antena montată în balconul propriu. Cu un montaj corect: filtre de rețea la stație și o priză de pământ, TVI și BCI practic nu există. Cu puteri între 30 și 70 watt se poate lucra în mod curent în modurile PSK sau RTTY.

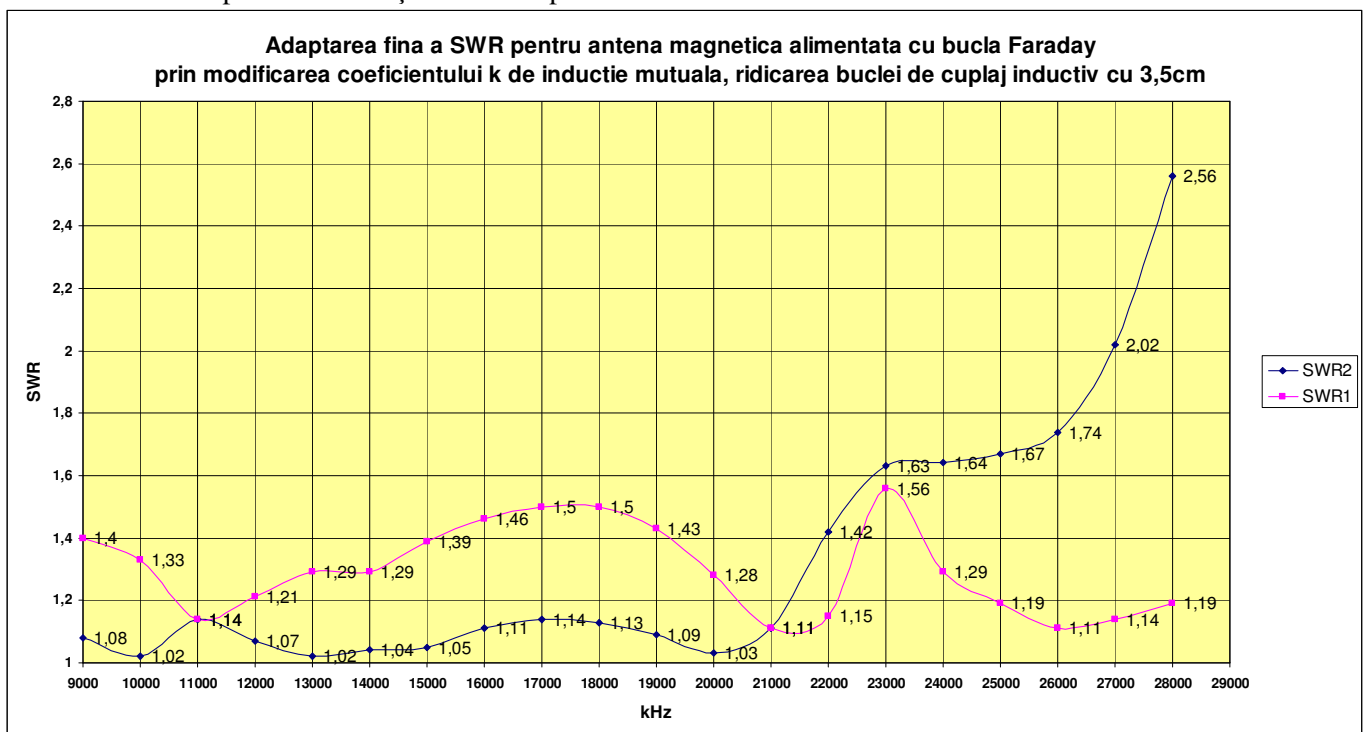


Fig. 12 Graficul comparativ al SWR pentru adaptarea fină cu bucla inductivă Faraday

F(kHz)	SWR	Z	RL	Ph	Rs	Xs
9000	1,08	49,06	28,7	105,04	48,93	3,48
10000	1,02	49,12	38,55	138,65	49,11	0,77
11000	1,14	44,08	23,65	103,46	44,05	1,65
12000	1,07	47,06	29,99	162,76	47,06	0,88
13000	1,02	50,1	38,49	84,99	50,09	1,19
14000	1,04	50,84	33,68	66,16	50,81	1,92
15000	1,05	51,71	33,1	40,47	51,69	1,49
16000	1,11	51,66	26,01	70,91	51,43	4,89
17000	1,14	49,37	23,95	95,72	48,98	6,21
18000	1,13	47,26	24,59	118,59	47,01	4,88
19000	1,09	46,25	27,64	160,12	46,23	1,31
20000	1,03	49,13	36,67	126,51	49,12	1,16
21000	1,11	54,44	25,82	33,78	54,35	3,1
22000	1,42	61,14	15,15	54,19	58,68	17,16
23000	1,63	52,81	12,45	83,05	47,2	23,7
24000	1,64	43,39	12,27	107,86	38,92	19,17
25000	1,67	35,35	11,98	134,78	33,03	12,6
26000	1,74	30,83	11,39	153,43	29,83	7,74
27000	2,02	24,85	9,04	173,31	24,76	2,21
28000	2,56	19,55	7,17	178,94	19,54	0,39

Fig. 10 Datele eșantionate cu miniVNA în sesiunea a doua cu pas de 1 MHz

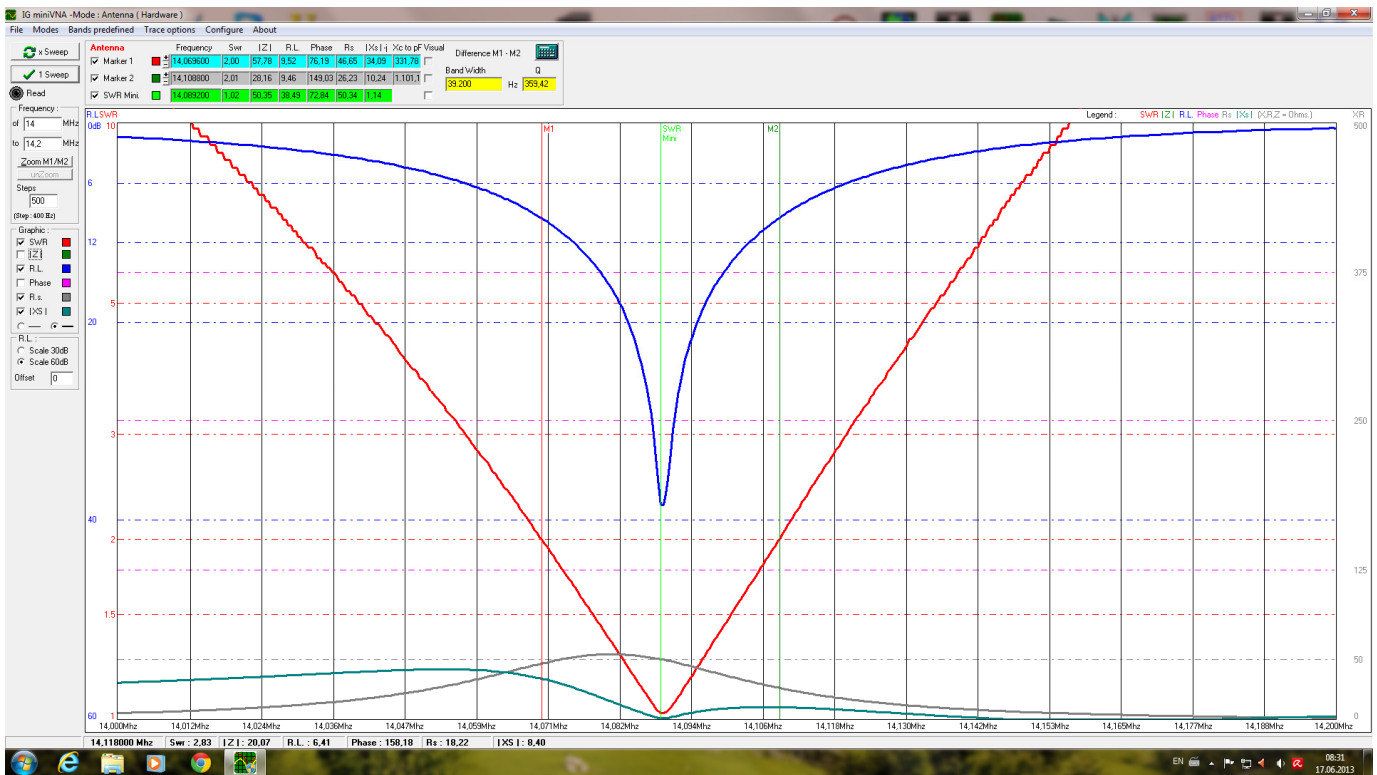


Fig.11 Acordul fin cu bucla de cuplaj inductiv pe frecvența de 14089kHz

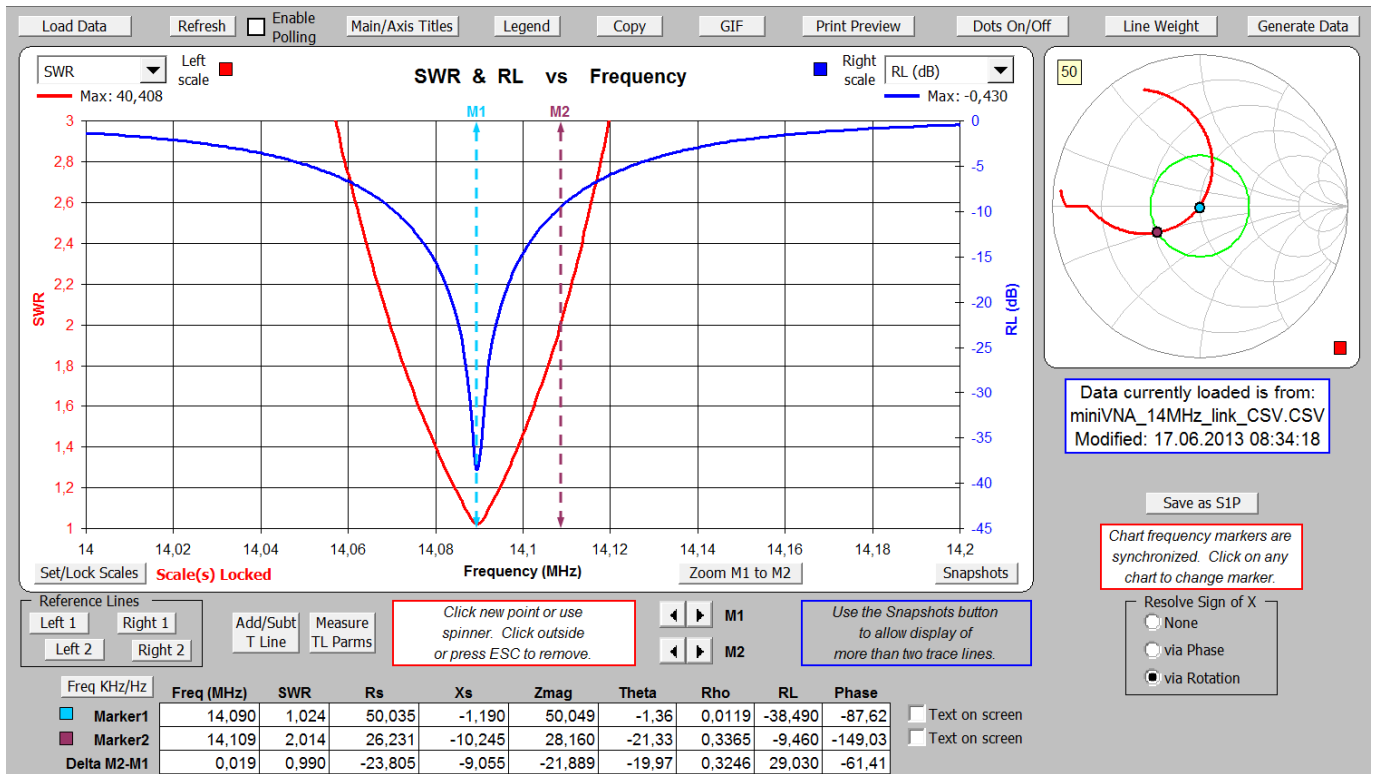


Fig. 13 Analiza parametrilor acordului fin cu programul Zplots și diagrama Smith

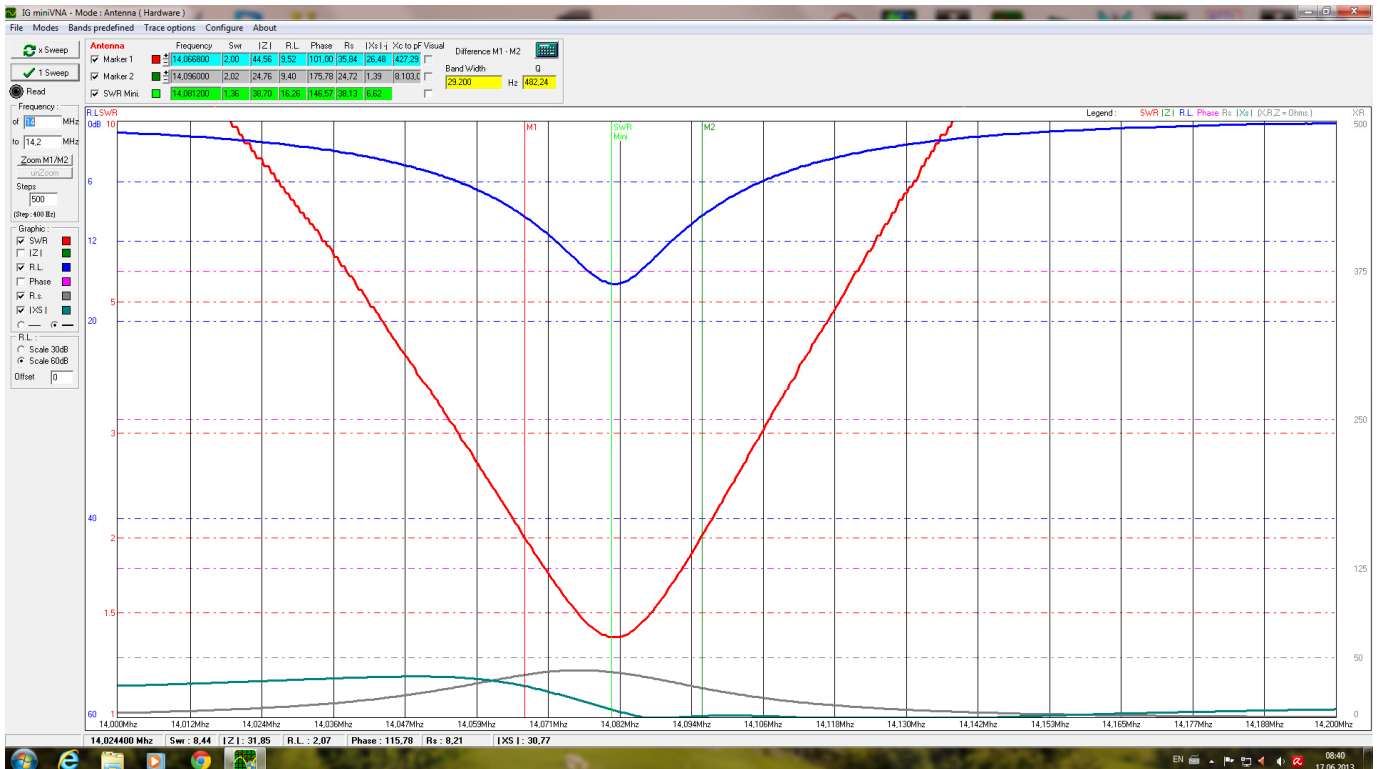


Fig. 14 Curbele SWR, RL, R_s și X_s după dezacordul prin rotirea cu cca.10 grade a buclei Faraday

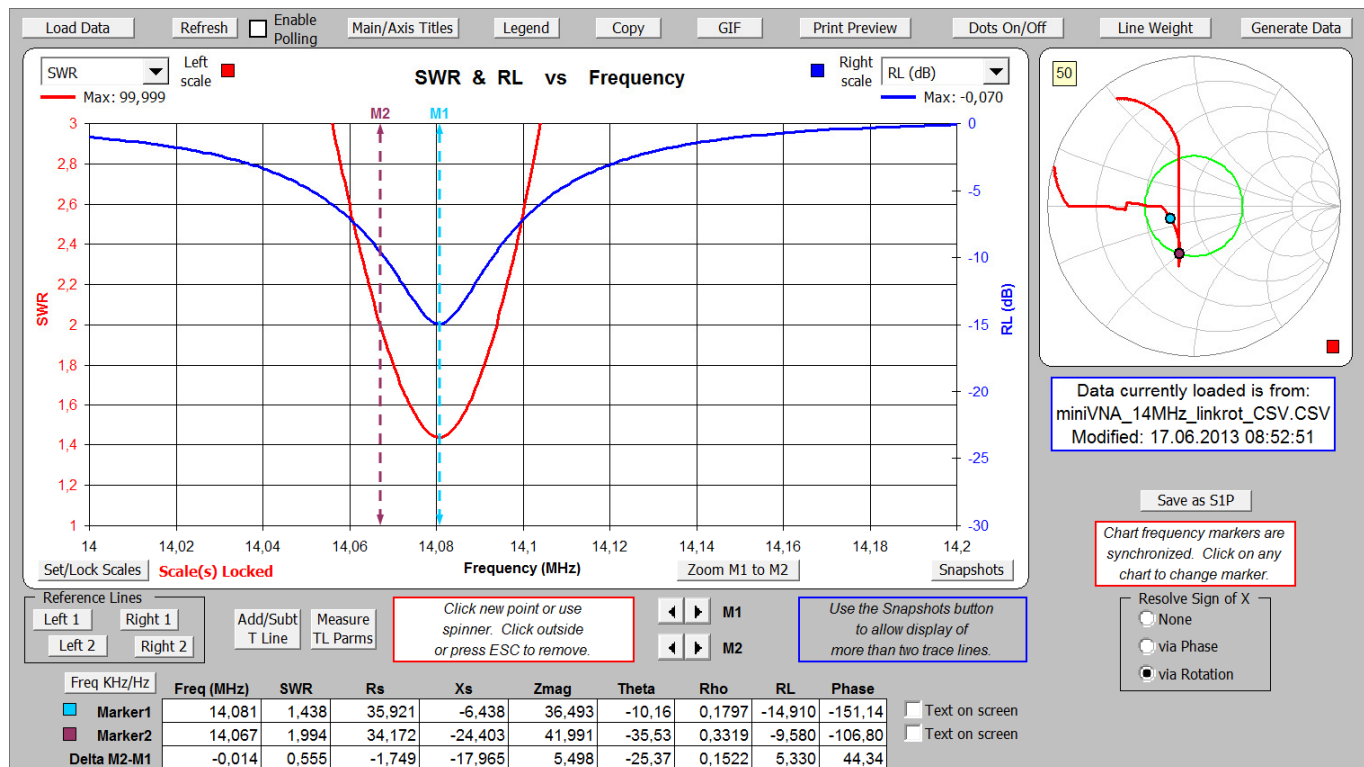


Fig. 15 Analiza parametrilor antenei după rotirea buclei, cu programul Zplots și diagarama Smith

Și o ultimă remarcă înainte de bibliografie:

Imi aduc aminte cu plăcere și nostalgie de instructivele și frumoasele lucrări din laboratoarele de măsurii electrice și electrotehnică din perioada studenției la Institutul Politehnic București unde, cu mijloacele și aparatura acelor ani dar cu personalități de mare talie ale învățământului din România, am învățat “abecedarul” ELECTRICITĂȚII!

Bibliografie:

- [1] YO4UQ – Cristian Colonati – Aproape totul despre antena magnetică, Revista R&R nr. 6 / 1997
Se poate descărca din <http://yo4uq.jimdo.com> sub format .pdf
- [2] YO8CRZ – Forin Crețu – Radiotehnică Teoretică și Practică, Ed. QIM Iași 2013
- [3] VK4KLT – Leigh Turner – An Overview of the Underestimated Magnetic Loop HF Antenna
- [4] N4SPP – Frank Dorenberg – Magnetic Loop Antenna for 80 – 20 mtr.
- [5] AA6TB – Steve Yates – Small Transmitting – Loop Antennas
- [6] F4CLB – Jean Louis Pages – Ig_miniVNA software
- [7] AC6LA – Dan Maguire – Zplots software

Alte articole și programe de calcul pentru antene magnetice:

- <http://www.radioamator.ro/articole/view.php?id=634> referitor la miniVNA
- <http://www.radioamator.ro/articole/view.php?id=705> referitor la Zplots
- http://www.66pacific.com/calculators/small_tx_loop_calc.aspx
- http://www.aa5tb.com/aa5tb_loop_v1.22a.xls
- <http://www.dl0hst.de/magnetlooprechner.htm> descarcă programul lui DG0KW V1.1.0
- <http://www.ac6la.com/zplots.html>

Materiale “expert” pentru specialiști:

- <http://sidstation.loudet.org/antenna-theory-en.shtml>
- <http://www.vlf.it/octoloop/rlt-n4ywk.htm>
- <http://230nsc1.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/curloo.html#c2>
- <http://230nsc1.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html> pentru aducere aminte de „Electricitate și Magnetism”

