



طراحی سلف روی تراشه به روش برنامه ریزی هندسی کاربردی برای طراحی مدارات مجتمع در فرکانس های رادیویی

امیر سعید تدین، محمود کمره ای
گروه مهندسی برق و کامپیوتر
دانشکده فنی دانشگاه تهران
پست الکترونیکی: a.s.tadayyon@ieee.org

چکیده: از دهه ۱۹۷۰ مدارات مجتمع معرفی شده است سعی بر این بوده است که تا آنجا که ممکن است از اجزای بیرون تراشه کاسته شود. سلف، یکی از عناصری است که تا قبل از دهه ۹۰ روی تراشه قابل پیاده سازی نبود. امروزه طراحی فیلترهای روی تراشه برای تراشه های عمل کننده در فرکانس های رادیویی بسیار مورد توجه قرار گرفته و برای بعضی از کاربردها عملی شده است. نوسانگرها، تقویت کننده ها و فیلترها از جمله ساختارهایی هستند که نیاز به سلف دارند و پیاده سازی سلف روی تراشه برای این بلوک ها به تحقق پیوسته است. نرم افزارهای قابل دسترس برای طراحی سلف روی تراشه همه کاره و بسیار وقت گیر هستند. در این مقاله روشی سریع و ساده برای طراحی سلف روی تراشه معرفی میشود.

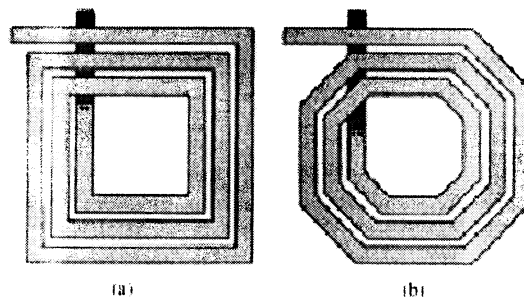
کلمات کلیدی: سلف، برنامه هندسی، حلزونی، روی تراشه، نوسانگر

۱- مقدمه

سلف روی تراشه از افزاره های مهمی است که در کاربرد های مختلف فرکانس بالا به کار میرود. در سالهای اخیر روش های مختلفی برای بهینه سازی سلف روی تراشه به کار رفته است. روشهای اولیه بر ایجاد جداولی از انواع سلف ها و انتخاب سلف بهینه از میان آنها مبتنی بوده است. در سالهای اخیر مدل های دقیقی برای سلف روی تراشه بسط داده شده است و با کمک نرم افزارهای حل کننده میدان قابل استفاده است. دو نرم افزار مشهور به نامهای فست هنری^۱ و اسیتیک^۲ قابلیت مدل سازی و محاسبه انواع سلف، ترانسفورماتور و بالون^۳ را دارند. این نرم افزارها همه کاره هستند و به همین دلیل قابلیت بهینه سازی آنها کند است و کار با آنها زمان بر است. اخیراً روش برنامه ریزی هندسی با مدل تقریبی مطرح شده است که با استفاده از این روش بسیار سریعتر میتوان به جواب رسید.

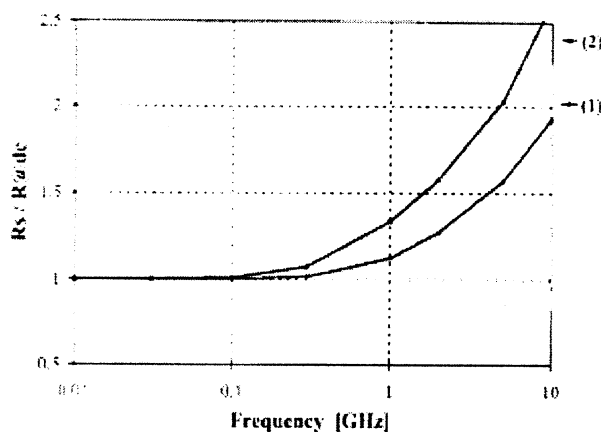
۲- بررسی مدل سلف حلزونی

تنها سلف با قابلیت انبوه سازی روی تراشه سلف حلزونی می باشد که با پیچاندن فلز بصورت حلزونی روی تراشه ایجاد می شود (شکل ۱).



شکل ۱- سلف حلزونی نوع مربعی و هشت ضلعی

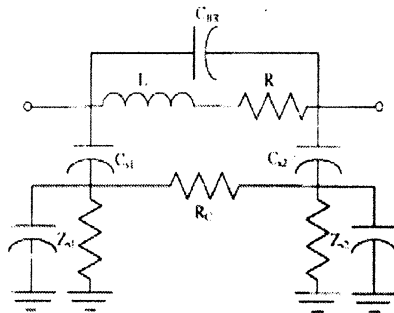
این سلف در فرکانس های بالا استفاده می شود و به دلیل فرکانس بالا و رسانایی بستر دارای مقدار بیشینه حدود 10 nH و ضریب کیفیت زیر 10 می باشد. در این بخش ابتدا پدیده های فیزیکی موثر روی سلف حلزونی بررسی می شود سپس مدل مورد استفاده مختصر معرفی می شود. اثر اول- اثر پوستی است که به دلیل فرکانس بالا مشاهده می شود. در فرکانس بالا جریان به سطح هادی منتقل می شود که باعث توزیع غیر یکنواخت جریان در هادی درونی و در نتیجه تغییر اندوکتانس داخلی می شود. همچنین مقاومت سلف افزایش پیدا می کند (شکل ۲) [1].



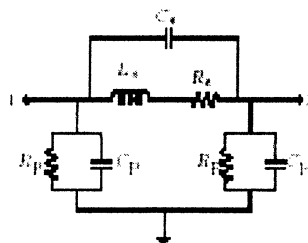
شکل ۲- افزایش مقاومت سلف به دلیل اثر پوستی

اثر دوم- به دلیل شار مغناطیسی که از بستر می گذرد بسته به مقدار رسانایی بستر جریان الکتریکی بر قرار می شود. طبق قانون لنز جریان الکتریکی در جهت مخالف و به جهت تضعیف شار جریان پیدا می کند و در نتیجه برای یک مساحت معین سلف کمتر و ضریب کیفیت کمتر خواهیم داشت. هر چه بستر رسانایی اش کمتر باشد تلفات بستر کمتر خواهد بود.

اثر سوم- جریان های ادی^{iv}- اگر تعداد دور سلف را زیاد کنیم مشاهده می کنیم که ضریب کیفیت سلف به شدت کاهش پیدا می کند و شدت کاهش به قدری است که با اثر پوستی قابل توجه نیست. این پدیده به دلیل اثر جریان های ادی که در دورهای داخلی به واسطه وجود شار زیاد و متغیر در مرکز سلف ایجاد می شود. این جریان های ادی شار را در مرکز سلف تضعیف می کنند و باعث کاهش مقدار سلف و ضریب کیفیت آن می شوند. با توجه به این پدیده ها و اثر بستر مدل دقیق زیر ارائه شده است (شکل ۳) [2].



شکل ۳- مدل دقیق سلف حلزونی



شکل ۴- مدل ساده شده هر شنسون

در اینجا از مدل ساده شده بالا که توسط آقای هرشنسون^۳ ارائه شده است (شکل ۴) [3].

۳- روش بهینه سازی با استفاده از روش برنامه ریزی هندسی

در برنامه ریزی هندسی یک تابع n متغیره به فرم زیر داریم که همه متغیرهای آن مثبت و حقیقی هستند.

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^l c_k x_1^{a_{1k}} x_2^{a_{2k}} \dots x_n^{a_{nk}} \quad (1)$$

که $c_j \neq 0$ و $a_{ij} \in \mathbb{R}$ است. یک برنامه هندسی شکل زیر را دارد:

کمینه کردن $f_0(x)$

با توجه به $f_i(x) \leq 1, i=1, 2, \dots, m$

$g_i(x) = 1, i=1, 2, \dots, p$

$x_i > 0, i=1, 2, \dots, n$

که f_i چند متغیره و g_i یک متغیره از نوع تابع f است.

خصوصیت برنامه هندسی که به طور عمومی قابل حل است و سرعت حل آن نیز بالا است. روش طراحی ابتدا با نوشتن برنامه ای برای محاسبه سلف حلزونی روی تراشه باید شروع شود. در میان انواع سلف حلزونی نوع دایروی از همه بهینه تر است اما به دلیل محدودیت ابزارهای لی آوت در اینجا فقط نوع مربعی آن بررسی شده است. با داشتن مدل سلف حالا میتوان برای کاربرد های مختلف سلف را بهینه کرد.

۴- کاربردها

سلف در نوسانگرها، فیلترها و تقویت کننده ها به کار میرود و در هر کدام از این کاربردها برای پارامتری خاص باید بهینه شود. در اینجا بهینه سازی سلف برای طراحی نوسانگر کنترل شونده با ولتاژ معرفی می شود.

سلف باید طوری بهینه شود که تانک دارای تلفات کمینه باشد پس مقاومت موازی آن باید بیشینه باشد. در دامنه های کم ولتاژ سوپینگ با مقاومت موازی تانک متناسب است. در نوسانگر ها می خواهیم نویز فاز کم داشته باشیم. با توجه به رابطه نویز فاز (۲) هر چه دامنه بیشتر باشد نویز فاز کمتر است [4].

$$L\{\Delta\omega\} = 10 \log \left(\frac{\Gamma_{rms}^2}{q_{max}^2} \cdot \frac{i_n^2 / \Delta f}{2 \cdot \Delta\omega^2} \right) \quad (2)$$

بنابر این حالت بهینه، بیشینه کردن مقاومت موازی تانک است. از طرفی مقاومت موازی تانک تقریباً همان مقاومت موازی سلف است. مقاومت موازی سلف از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R_{tank} = LQ * \omega \quad (3)$$

در این رابطه L مقدار اندوکتانس، Q ضریب کیفیت سلف و ω فرکانس نوسان است. می دانیم که $C_{min} < C_{var} < C_{max}$ قرار دارد. نسبت C_{max}/C_{min} محدود است ولی مقادیر C_{max} و C_{min} محدود نیست. اگر در طراحی سلف مساحت را محدود کنیم نگران خود نوسانی سلف نخواهیم بود. حالا برنامه ای می نویسیم که بتواند برای یک خازن خاص سلف بهینه را طراحی کند اگر مقدار خازن را تغییر دهیم بیشترین R_{tank} به دست می آید. برای طراحی سلف بهینه باید مساحت هم کمینه باشد و از مساحت هم به نحو احسن استفاده شود یعنی تعداد دور و ضخامت نیز طوری باشد که داخل سلف چندان خالی نباشد. پس برنامه هندسی به شکل زیر می شود:

R_{tank} بیشینه کردن

$OD/300\mu m ? 1$ با توجه به

$$L_{tank} C_{tank} \omega^2 = 1$$

...

البته تغییرات و اراکتور میتواند در نظر گرفته شود ولی می توان اثر آنرا جداگانه نیز محاسبه کرد. از نکات طراحی سلف اینست که اثر اتصالات را بصورت طراحی با ۰.۲۵ دور اضافی در نظر گرفت. برای تست دقیق تر می توان سلف حاصل را با اسیتیک تست کرد. اختلاف در حدود ۰/۲-۰/۱ nH است.

۵- نتیجه

در این مقاله، روش سریع و آسان طراحی سلف حلزونی ارائه شد. در اینجا از مدل ساده سلف حلزونی و روش برنامه هندسی برای طراحی صورت گرفته است. این روش جای بسط به سلف های سری با اثرات پارازیتی دقیق تر و سلف های موازی را نیز دارد.

۶- سپاسگزاری

از آقای مهندس رزازی به خاطر کمک های بی شائبه ایشان و امکاناتی که در اختیار بنده قرار دادند

سپاس گزارم.



۷-مراجع

- [۱] چنگ، د.، الکترومغناطیس میدان و موج، جبه دار، پ.، قوامی، م.، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۱.
- [2] Niknejad, A.M., Meyer,R.. "Analysis, Design, and Optimization of Spiral Inductors and Transformers for Si RF IC's", IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 33, NO. 10, pp. 1470-1481, OCTOBER 1998.
- [3] Hershenson, M. M., et. Al., "Optimization of Inductor Circuits via Geometric Programming", Proceedings of the 36th IEEE Design Automation Conference, pp.994-998, June 1999.
- [4] Hajimiri, A., Lee, T., "A General Theory of Phase Noise in Electrical Oscillators", IEEE Jsscc, Vol.33, No.2, pp. 179-193. Feb. 1998.

ⁱFastHenry

ⁱⁱASITIC

ⁱⁱⁱBalun

^{iv}Eddy Currents

^vHershenson