وزارت علوم ، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی برق

گزارش پروژه کارشناسی الکترونیک

عنوان:

طراحی و ساخت پیچه روگوفسکی

دانشجو : وحید اصلانی

استاد راهنما : دکتر جعفری پناه

تابستان ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده مطالب

پیچه روگوفسکی به عنوان یک دستگاه اندازه گیری جریان های الکتریکی در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است به طوری که به عنوان یک سیستم تطبیق پذیر با کاربردهای فراوان در صنعت و آزمایشهای تحقیقاتی ایفای نقش می کند.

این دستگاه از لحاظ مفهومی بسیار ساده به نظر می رسد و طرز عملکرد آن بر قانون آمپر استوار می باشد.

این پیچه تحت شرایط اندازه گیری بحرانی ، بسیار ساده نصب می شود و بسیار پاسخ دهی مناسبی دارد و تحلیل تئوری راحتتری نسبت به سایر دستگاههای اندازه گیری خواهد داشت.

در این گزارش ابتدا به توضیحات تئوری و نحوه عملکرد و شماتیک پیچه روگوفسکی پرداخته می شود و سپس چند نمونه از کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی این پیچه بیان می گردد.

و در ادامه طراحی و نحوه شبیه سازی مدار انتگرالگیر و ملاحظاتی که باید در فرکانس های بالا در نظر گرفته شود و اطلاعات تجربی مربوط به ساخت خود پیچه بیان خواهد شد.

فهرست

مقدمه ۵

روش های مختلف اندازه گیری جریان الکتریکی ۶

پیچه روگوفسکی و ارتباط آن با قانون آمپر ۱۱

کاربردهای پیچه روگوفسکی ۱۴

سیستم اندازه گیری جریان ۱۴

* طراحی انتگرال گیر به صورت فعال ۱۵

*طراحی انتگرال گیر به صورت غیر فعال ۱۸

* بحثی راجع به خود انتگرالگیر "Self-integrating" ۱۹

طراحی انتگرالگیر ۲۳

نتایج شبیه سازی مدار انتگرالگیر پیشنهاد شده ۳۱

اندازه گیری سیگنال پینچ ۳۳

نتیجه گیری ۳۴

پیشنهاد ۳۵

منابع ۳۶

مقدمه:

در سالهای اخیر استفاده از پیچه روگوفسکی برای اندازه گیری جریان های الکتریکی گسترش یافته است.

پیچه روگوفسکی در ظاهر دستگاهی پیچیده نیست و بر پایه قانون آمپر استوار می باشد.

این پیچه دور یک هادی حامل جریان الکتریکی قرار می گیرد و میدان مغناطیسی ای که توسط جریان عبوری از هادی ایجاد می شود ، در پیچه بر طبق قانون لنز ولتاژی ایجاد می کند که این ولتاژ متناسب با تغییرات جریان خواهد بود.

حفاظت در برابر نویز ،وزن کم ، قیمت پایین ، پاسخ در فرکانس های پایین و فرکانس های بالا، پاسخ به تغییرات ناگهانی جریان، راحتی نصب و ولتاژ بودن نوع سیگنال خروجی از مزایای این پیچه می باشد.

منتهی این پیچه ولتاژی که در خروجی می دهد متناسب با مشتق جریان می باشد که برای اینکه بخواهیم متناسب با جریان را مستقیماً برقرار سازیم ، باید از سیگنال خروجی انتگرال بگیریم.

در نتیجه بحث بعدی ما راجع به انتگرالگیر و انواع آنها و بررسی مزایا و معایب آن در ادامه بحث خواهد بود.

روش های مختلف اندازه گیری جریان الکتریکی:

۱– استفاده از ترانسفورمر جریان:

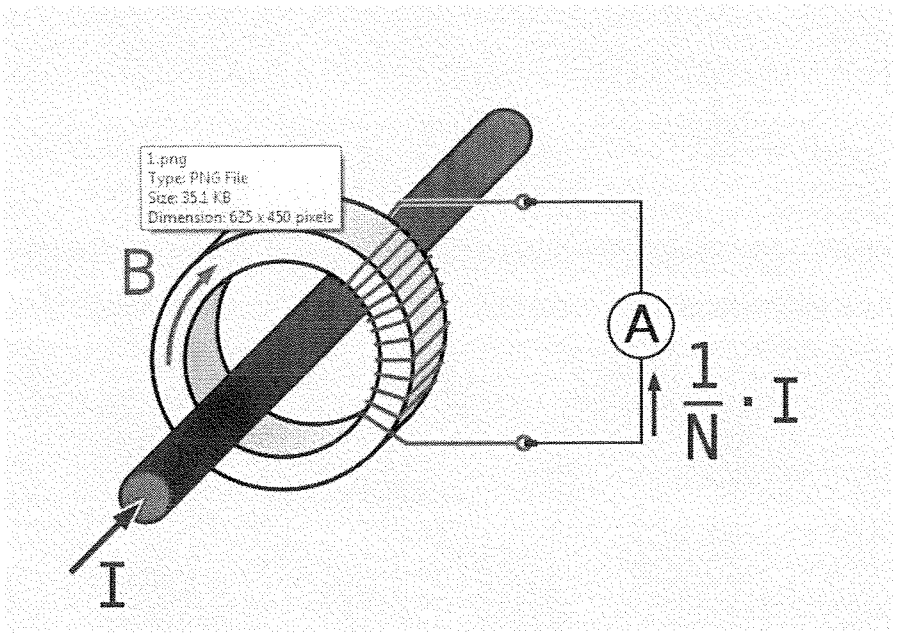
استفاده از ترانسفورمر جریان ،یکی از روش های متداول در اندازه گیری جریان های فشار قوی می باشد. زمانی که جریان در یک سیستم قدرت به قدری زیاد باشد که نتوان آن را مستقیماً اندازه گیری کرد، لذا می توان با استفاده از ترانسفورمر جریان، یک کسر کوچکی از جریان را به دستگاههای اندازه گیری انتقال داد و جریان مورد نظر را اندازه گرفت.

در ترانسفورمر جریان ، جریان خروجی با عکس تعداد دور سیم پیچ متناسب است و بنابراین با یک مقیاس کوچکتر جریان را اندازه گیری کرده ایم.

یک ترانسفورمر جریان می تواند تجهیزات اندازه گیری را در برابر تغییرات ناگهانی سیستم انتقال جریان محافظت نموده و در صورت بروز مشکل در سیستم انتقال جریان، دستگاههای اندازه گیری آسیبی نبینند.

این دستگاه اندازه گیری جریان ، به خاطر وجود هسته فریتی ، روش مناسبی در اندازه گیری جریان های dc نمی باشد و در فرکانس های خیلی پایین هم پاسخ مناسبی نخواهد داشت.

درشکل ۱ یک شمای کلی از ترانسفورمر جریان را مشاهده می کنیم ، همانطور که در شکل هم مشخص است ، خروجی آن از نوع جریان می باشد و جریان خروجی متناسب با عکس تعداد دور سیم پیچ خواهد بود.



شکل۱- شمای کلی از یک ترانسفورمر جریان

این ترانسورمر بسته به نوع طراحی و ساخت آن می تواند نسبت به تغییرات سریع جریان حساسیت نشان دهد.همانطور که در شکل هم مشاهده می شود خروجی این دستگاه از نوع جریان می باشد.

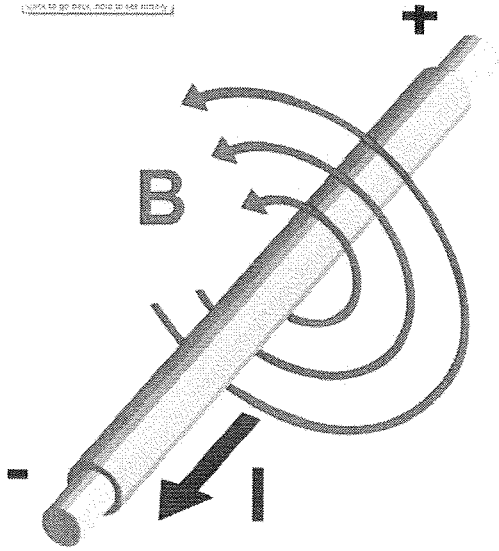
صحت اندازه گیری این دستگاه به عوامل محیطی چون دما و رطوبت و ... وابسته است و لذا برای شرایط کاری مختلف ، باید طراحی ویژه ای در نظر گرفته شود.

در فرکانس های کاری بالا، به دلیل اینکه بردارهای پلاریزاسیون داخلی به طور ناگهانی و خیلی سریع نمی تواند تغییر جهت بدهد ، لذا این سیستم تغییرات سریع جریان را نشان نخواهد داد.

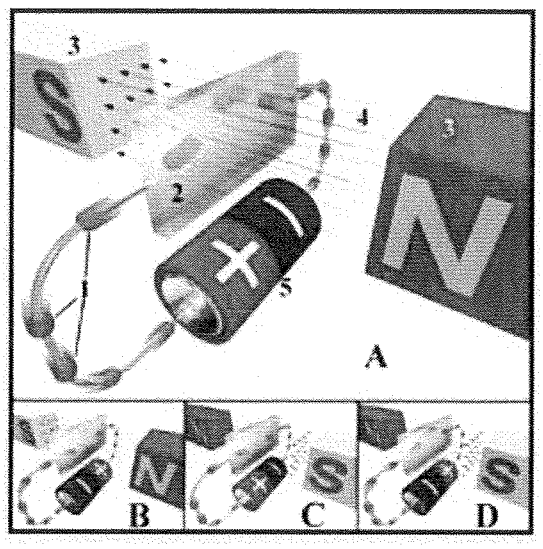
۲- اندازه گیری جریان با استفاده از سنسورهای اثرهال :

سنسورهای اثرهال به راحتی می توانند میدان مغناطیسی را اندازه گیری کنند.نحوه کار آنها بدین صورت است که اگر جریانی از یک بلور رسانا در جهت عمود بر میدان مغناطیسی یکنواخت (H) عبور کند ، رسانا دارای اختلاف پتانسیل ΔV میان رخ های عمود بر جهت جریان و میدان مغناطیسی خواهد شد که اندازه این اختلاف پتانسیل برابر خواهد بود با:

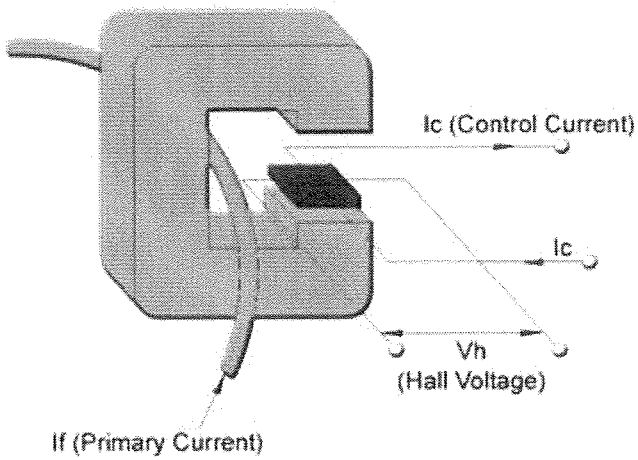
$$\Delta V = \frac{IH}{Ned}$$



شکل ۲- میدان مغناطیسی حول یک حامل جریان



شکل ۳ – شمای کلی از نحوه عملکرد سنسورهای اثرهال



شکل ۴- شمای کلی از یک سنسور اثرهال که حامل جریان از آن عبور نموده است

که در آن

N: شمار حامل های جریان

e : بار الکتریکی الکترون (که اینجا به عنوان حامل های جریان در نظر گرفته می شوند.)

d: فاصله بین ۲ سطحی که اختلاف پتانسیل بین آنها بوجود می آید.(عمق صفحه)

H: شدت میدان الکتریکی

I: جریان عبوری از بلور رسانا

سپس با استفاده از اندازه گیری میدان مغناطیسی ناشی از سیم حامل جریان، طبق اثرهال به جریانی دست پیدا می کنیم که متناسب با میدان مغناطیسی است و میدان مغناطیسی هم که با جریان هادی متناسب می باشد، پس بنابراین به جریان عبوری در مدار دسترسی پیدا می کنیم .

همانطور که در جدول انتهای مبحث هم مشاهده می شود، این دستگاه در فرکانس های dc و فرکانسهای خیلی پایین ، پاسخ مناسبی دارد ولی نحوه نصب دشوار و قیمت بالای این دستگاه و عدم پاسخگویی به تغییرات سریع جریان از جمله معایب این روش می باشد.

۳- استفاده از دستگاههای Zero – flux hall device :

این سیستم تنها در استفاده های خاص برای اندازه گیری جریان های الکتریکی بالا (معمولاً در تحقیقات علمی) استفاده می شود.

کاربردهای آن در مواردی از قبیل :

۱- استفاده در پروژه های مهندسی هسته ای و ساخت اجزاء شتاب دهنده ها

۲- آزمایشات فیزیک پلاسما و گداخت راکتورهای هسته ای

۳- پیاده سازی دستگاههای تولید جریان بالا و کالیبراسیون آنها.

این دستگاه نیز به دلیل هزینه بالای ساخن . سختی نصب و عدم توانایی در اندازه گیری جریان های فرکانس بالا و تغییرات سریع جریان کاربرد صنعتی محدودی دارد و تنها در آزمایشات علمی مورد استفاده قرار می گیرد.

شکل ۵- یک نمونه دستگاه Zero – flux

۴ – استفاده از پیچه روگوفسکی " Rogowski coil "

پیچه روگوفسکی را می توان یک طراحی خاص از ترانسفورمر جریان در نظر گرفت ولی این طراحی خاص سبب می شود که بسیاری از پارامترهای ترانسفورمر جریان را بتوان بهبود بخشید.

حفاظت در برابر نویز، وزن کم ، قیمت مناسب توانایی پاسخگویی در فرکانس های پایین و فرکانس های بالا و بویژه توانایی پاسخگویی در برابر تغییرات سریع و ناگهانی جریان الکتریکی و راحتی نصب و خروجی از نوع ولتاژ از مزایای این پیچه می باشد.

تنها عیب این سیستم عدم توانایی اندازه گیری جریان های الکتریک DC می باشد.

در ادامه به تفصیل در رابطه با نحوه طراحی و ساخت این پیچه صحبت خواهیم نمود.

پیچه روگوفسکی و ارتباط آن با قانون آمپر

یک پیچه روگوفسکی بوسیله حس کردن میدان مغناطیسی در فضای اطراف سیم حامل جریان، ارتباط جریان عبوری از هادی و ولتاژ ۲ سر پیچه را برقرار می کند.

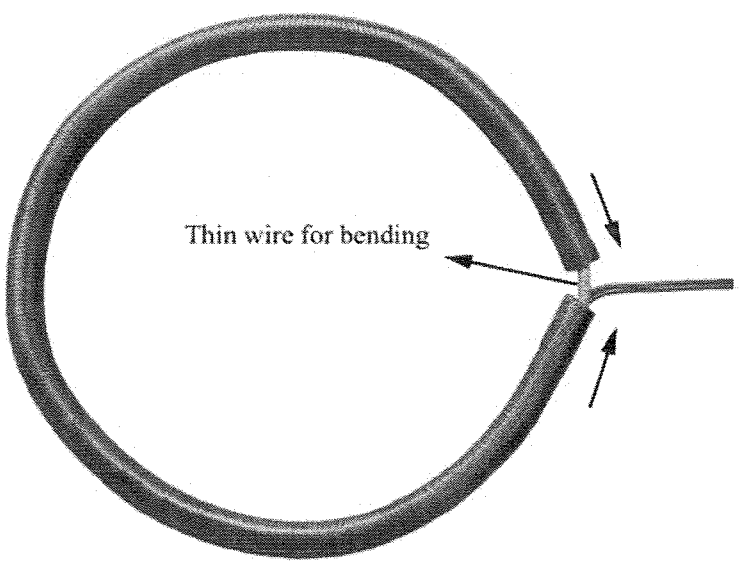
طبق قانون آمپر داریم:

$$\oint \vec{H}.\vec{dl}=i$$

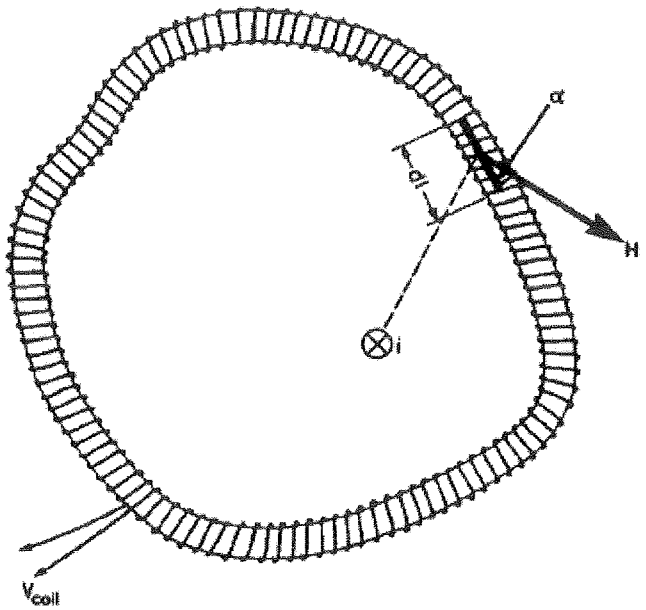
رابطه (۱)

$$\oint H\cos\alpha dl = i$$

که α در واقع زاویه بین میدان مغناطیسی و المان طول پیچه روگوفسکی می باشد و dl المان طول پیچه روگوفسکی و H میدان مغناطیسی می باشد.



شکل ۶- نحوه سیم بندی یک پیچه روگوفسکی



شکل ۷ – زاویه بین میدان مغناطیسی ناشی از حامل جریان و المان واحد طول سیم پیچ روگوفسکی

بافرض اینکه پیچه نشان داده شده در شکل بالا دارای n دور سیم پیچ در واحد طول باشد و سطح مقطع آن برابر A باشد در نتیجه در المان واحد طول dl تعداد $n\,dl$ دور سیم پیچ خواهیم داشت که در نتیجه:

$$d\Phi = \mu_0 H\, A\, n dl \cos\alpha$$

رابطه (۲)

که اگر از رابطه (۲) بر روی مسیر طولی حلقه انتگرال گرفته شود خواهیم داشت:

$$\Phi = \int d\Phi = \mu_0 nA \int H\cos\alpha dl = \mu_0 nAi$$

رابطه (۳)

و طبق قانون لنز می دانیم که ولتاژ ایجاد شده در دو سر سیم پیچ برابر خواهد بود با:

$$v_{coil} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 nA\frac{di}{dt}$$

پس ضریب μ_0 nA را به عنوان ضریب القای متقابل بین سیم و سیم پیچ تعریف نموده و آن را با M در نظر میگیریم:

$$M = \mu_0 nA$$

$$\boxed{v_{coil} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 nA\frac{di}{dt}}$$

رابطه (۴)

ما باید پیچه را طوری طراحی کنیم که سطح مقطع پیچه همواره ثابت بماند و در خمیدگی های اطراف مقدار آن تغییر نکند لذا برای اینکار ما باید طول پیچه را نسبت به سطح مقطع خیلی خیلی بزرگ در نظر بگیریم.

کاربردهای پیچه روگوفسکی

این دستگاه کاربردهای بسیار زیادی دارد که در زیر به چند نمونه آن اشاره می کنیم :

تست اتصال کوتاه ناگهانی: این تستی است که در طراحی ژنراتورهای پیشرفته در نظر گرفته می شود. ژنراتور به صورت مدار باز راه اندازی می شود و وقتی ولتاژ خروجی به مقدار ولتاژ نامی برسد، خروجی ۳ فاز را اتصال کوتاه می کنند ، در نتیجه آنالیز و تحلیل این جریان جزء اتصال مهم ژنراتور محسوب می شود که پارامترهایی از قبیل ثابت زمانی راکتور را می توان محاسبه نمود.

استفاده در دستگاه پلاسمای کانونی : چون در دستگاه پلاسمای کانونی ، جریان به طور ناگهانی و در مدت زمان خیلی کوتاه تغییر خیلی زیادی دارد(حدود 100Ωدر بازه زمانی 1ns) بنابراین هیچ دستگاهی غیر از پیچه روگوفسکی قابل استفاده نمی باشد.

سیستم اندازه گیری جریان

با توجه به رابطه (۴) برای اینکه بتوان ولتاژ خروجی را متناسب با جریان عبوری در نظر گرفت ملزم به استفاده از انتگرالگیر هستیم.

این انتگرال گیر بسته به شرایط کاری مدار یعنی فرکانس و مقدار جریانی که اندازه گیری می شود می تواند به صورت یک فیلتر ACTIVE یا PASSIVE طراحی گردد.

حال باید یک طرح کلی برای این ۲ نوع فیلتر ارائه نموده و مزایا و معایب هر کدام را به تفضیل بررسی کرده و در نتیجه بتوان بر حسب شرایط کاری، بهترین نوع فیلتر را به کار برد.

الف) طراحی انتگرال گیر به صورت فعال

همان طور که در شکل پایین صفحه نمایش داده شده است، یک شمای کلی برای یک انتگرال گیر فعال ناشی از ترکیب تعدادی خازن و مقاومت و یک OPAMP می باشد. منتهی این تقویت کننده عملیاتی باید دارای ویژگی هایی باشد که به تفضیل به آنها خواهیم پرداخت .

با طرح یک انتگرالگیر در حال کلی و اتصال آن به خروجی پیچه روگوفسکی رابطه ای چنان خواهیم داشت:

$$V_{output} \propto \int V_{coil} \qquad \text{رابطه (۵)}$$

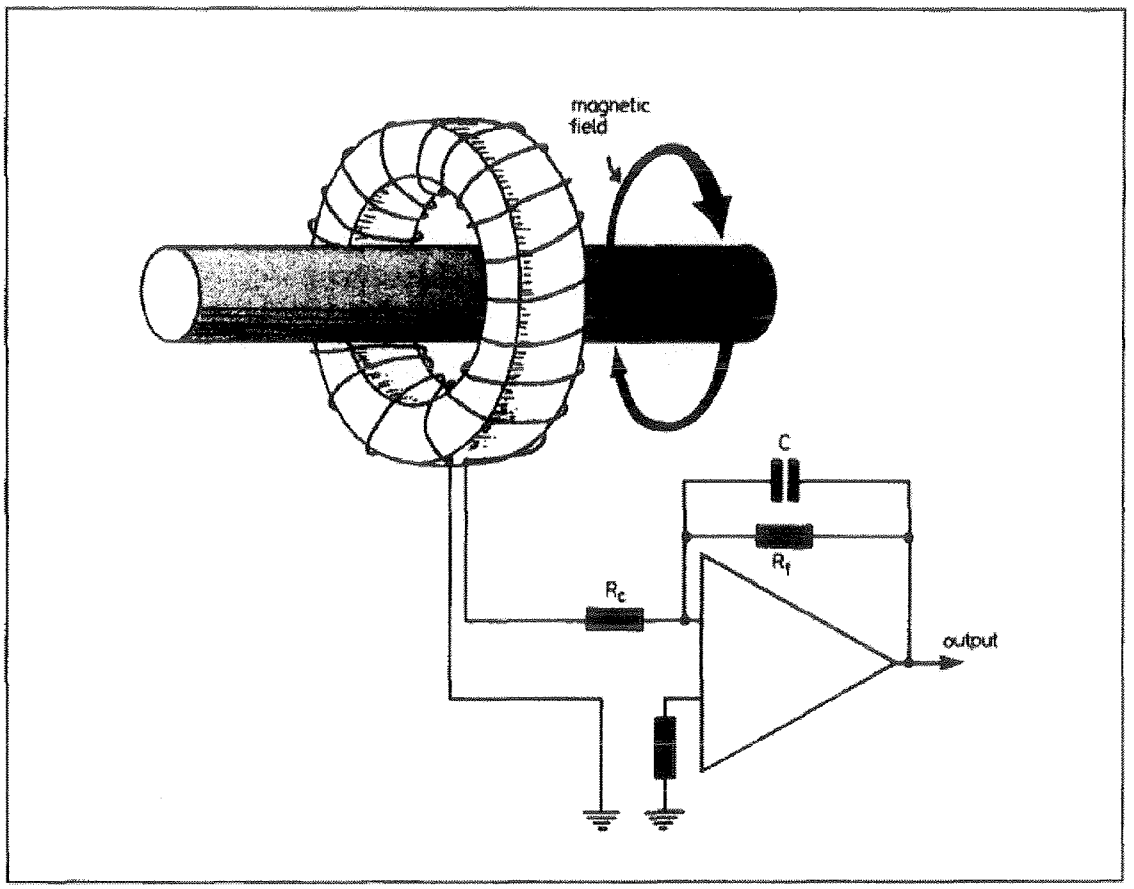
$$V_{coil} = M \, {di}/{dt} \qquad \text{رابطه (۶)}$$

بنابراین با جایگذاری رابطه (۶) در را بطه (۵) خواهیم داشت:

$$V_{output} \propto Mi \qquad \text{رابطه (۷)}$$

فیلتری که دارای تقویت کننده عملیاتی باشد ، دارا ی اشکالاتی از قبیل:

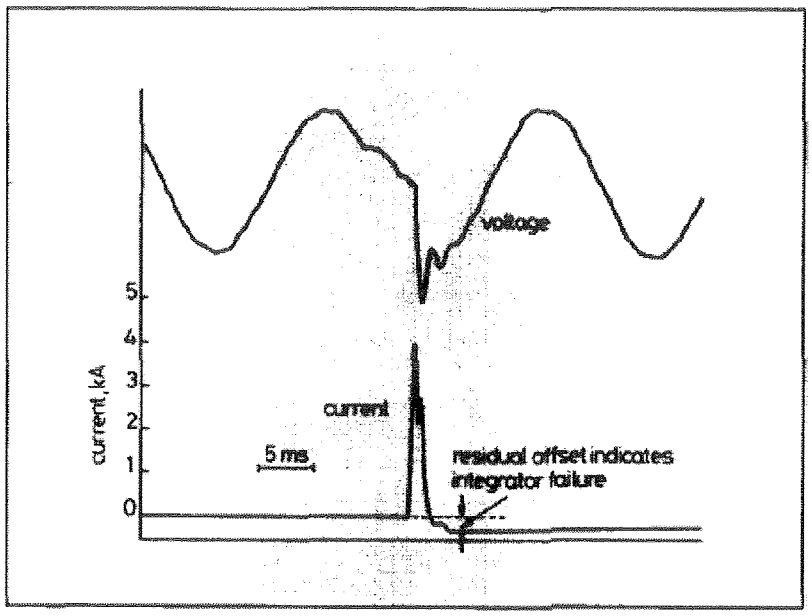
الف) اشباع تقویت کننده عملیاتی: یعنی مقدار ولتاژ خروجی از $+V_{CC}$ بیشتر شود و یا از $-V_{CC}$ کمتر گردد.در آن صورت خروجی دیگر متناسب با جریان نخواهد بود و به اصطلاح تقویت کننده ی عملیاتی اشباع خواهد شد.



شکل ۸ – شمایی از پیچه روگوفسکی به همراه انتگرالگیر آن

ب) پدیده **Slew Rate** : زمانی که جریان ورودی دارای لبه های تند باشد یا به اصطلاح به صورت پله هایی با **Rise time** خیلی کوچک باشد در نتیجه استفاده ما از تقویت کننده ی عملیاتی محدود خواهد شد. همانطور در فرکانس های بالا این مشکل را خواهیم داشت.

همین طور به صورت نمونه در شکل صفحه بعدی می بینیم که چگونه مشکل **Slew Rate** استفاده ما را در تقویت کننده ی عملیاتی محدود می کند.



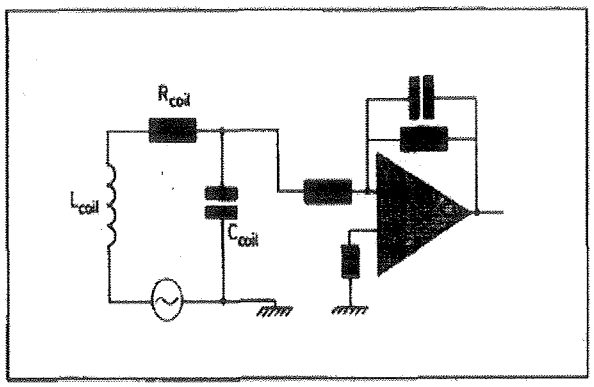
شکل ۹- تأثیر پدیده **Slew Rate** درخروجی انتگرالگیر

ج) کار در فرکانس های بالا: درفرکانسهای بالا باید ملاحضاتی در نظر گرفته شود:

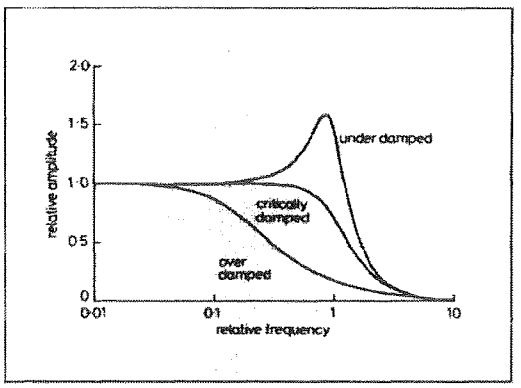
۱) باید هسته پیچه طوری طراحی شود که دو قطبی های آن اشباع نشوند.

۲) اگر مورد ۱ را رعایت کنیم ، حال در فرکانسهای بالا این پیچه روگوفسکی دیگر تنها به صورت یک سلف مدل نمی شود بلکه خازن ناشی از آن هم قابل توجه خواهد بود.

در این صورت امکان دارد که پدیده رزونانس بین آنها و امپدانس ورودی انتگرال گیر بوجود بیاید که بر حسب اینکه مقادیر طراحی چقدر باشد می تواند به صورت *Over damp* یا *Under damp* یا *Critical damp* باشد. شکل و نمودار این مورد در صفحه بعد نشان داده شده است:



شکل ۱۰- مدار معادل پیچه به همراه انتگرالگیر آن در فرکانسهای بالا



شکل ۱۱-پاسخ فرکانسی پیچه بر اساس طراحی های مختلف که می تواند به صورت فوق میرایی، میرایی بحرانی و زیر میرایی باشد.

در جدول زیر فرکانس رزونانس برای چند نوع پیچه روگوفسکی نوعی آورده شده است.

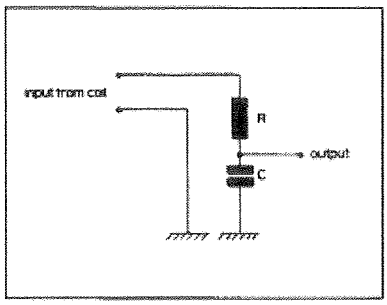
Table 1: Resonant frequencies of some typical coil types

Coil type	Resonant frequency
Large cross-section solid coil	65 kHz
'Standard' flexible coil (600 mm long)	1 MHz
'Standard' flexible coil (300 mm long)	1·5 MHz
'Low output' flexible coil (730 mm long)	2·8 MHz

ب) طراحی انتگرال گیر به صورت غیر فعال:

عبارت غیر فعال به این دلیل به این مدار تعلق می گیرد که در آن منبع ولتاژی به عنوان بایاس به کار نرفته است.

شکل کلی یک مدار انتگرال گیر در حقیقت یک فیلتر RC پایین گذر ساده می باشد.منتهی باید به این نکته توجه داشت که این مدار تنها در فرکانس های بیشتر از فرکانس گوشه به صورت انتگرال گیر عمل می کند.



شکل ۱۲- طراحی یک انتگرالگیر به صورت Passive که یک مدار RC ساده می باشد.

V_o

باید توجه شود که در فرکانسهای بزرگتر از فرکانس گوشه به صورت انتگرالگیر عمل می کند.

منتهی عیبی که این مدار دارد این است که در فرکانس های پایین به خاطر سرعت پایین آن، زمان زیادی طول می کشد تا مدار به حالت پایدار خودش برسد.
و به دلیل مزایایی که دارد نباید از استفاده آن صرف نظر شود چون در فرکانسهای بالا، معایبی که یک مدار اکتیو دارد را شامل نمی شود.

نتیجه گیری :

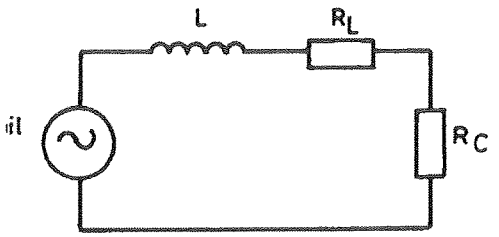
برای اینکار یعنی ساخت انتگرالگیر ما باید ترکیبی از این روش ها را به کار ببریم.

منتهی نکته قابل توجه به رور استفاده روگوفسکی ها در فرکانس های بالاف سبب شده تا موضوعی تحت عنوان *Self-integrating* مطرح شود.

بحثی راجع به خود انتگرالگیر *"Self-integrating"* :

در فرکانس های کاری بالا، مقدار امپدانس موجود در سیم پیچ مربوط به خود پیچه ، قابل توجه خواهد شد و بنابراین اگر ما مقاومتی را در ۲ سر آن موازی کنیم ، بدون نیاز به هیچ گونه انتگرال گیری ، خود این مدار انتگرال گیری را انجام می دهد.

یعنی به عبارتی خواهیم داشت:

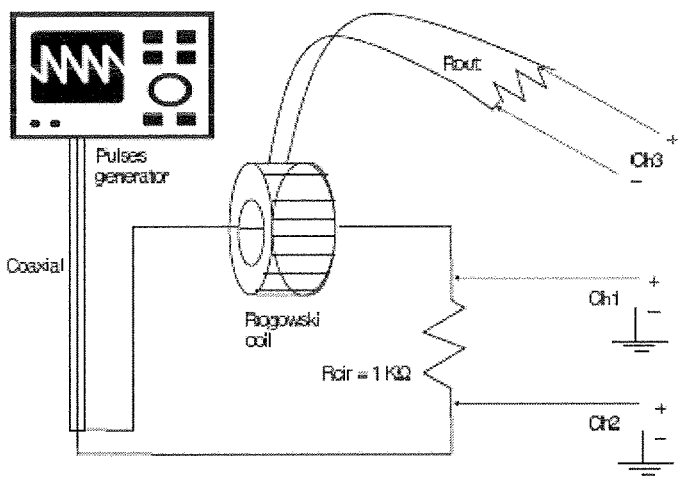


شکل ۱۳- شمایی از یک مدار پیچه روگوفسکی به صورت خود انتگرالگیر

این مدار به عنوان یک فیلتر پایین گذر عمل می کند و بنابراین در فرکانسهای بالا یک انتگرالگیر است.

حال باید برای این مورد نیز مقاومت مناسب را استفاده کنیم تا شیفت فازی چندانی بین جریان واقعی و جریان حاصل از حسگر وجود نداشته باشد.

چند نمونه به ازای مقاومت ها و فرکانس های متفاوت رسم گردیده است.



شکل ۱۴- یک پیچه روگوفسکی به صورت خود انتگرالگیر

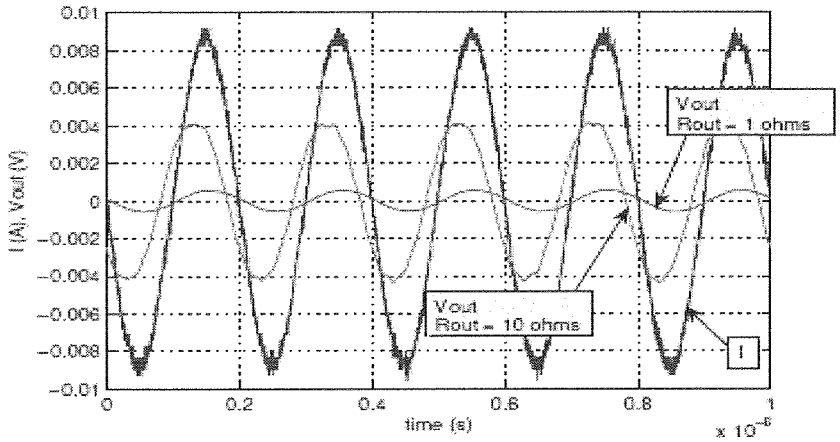


Figure 6: Measurement of 5 MHz sinusoidal waves with two different terminating impedances: 1 Ω and 10 Ω.

شکل ۱۵- سیگنال خروجی پیچه روگوفسکی به ازای ۲ مقاومت مختلف ۱ اهمی و ۱۰ اهمی

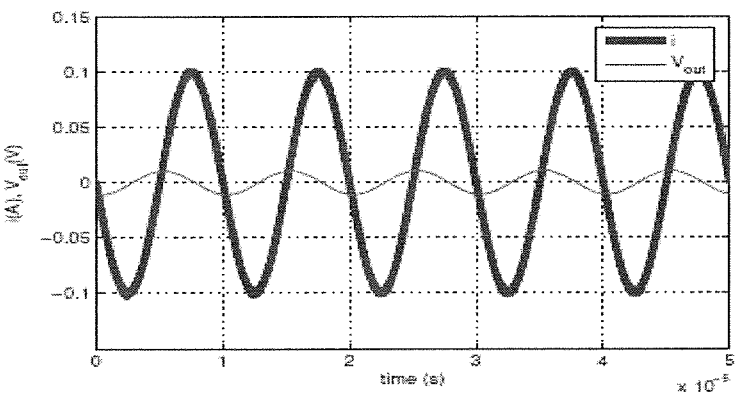


Figure 7: Measurement of A 100 KHz sinusoidal wave with a terminating impedance of 10 Ω.

شکل ۱۶ – سیگنال خروجی یک پیچه روگوفسکی ، یم مقاومت ۱۰ اهمی، در فرکانس ۱۰۰ khz

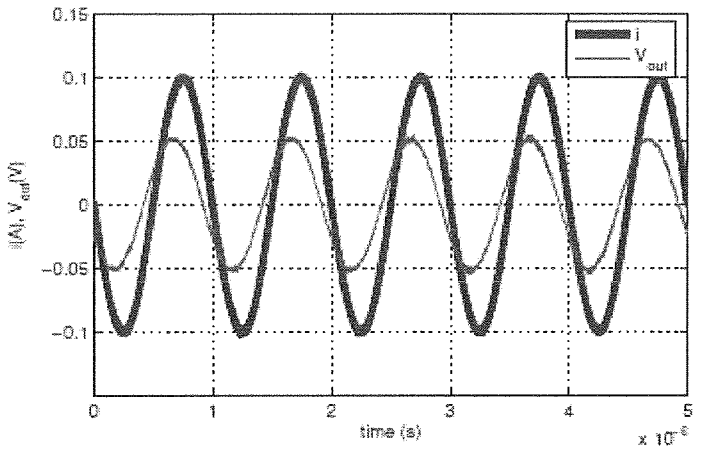


Figure 8: Measurement of A 1 MHz sinusoidal wave with a terminating impedance of 10 Ω.

شکل ۱۷- سیگنال خروجی یک پیچه روگوفسکی با یک مقاومت ۱۰ اهمی در فرکانس MHZ ۱ ،تنها شیفت فازی در بین جریان عبوری و سیگنال خروجی مشاهده می شود.

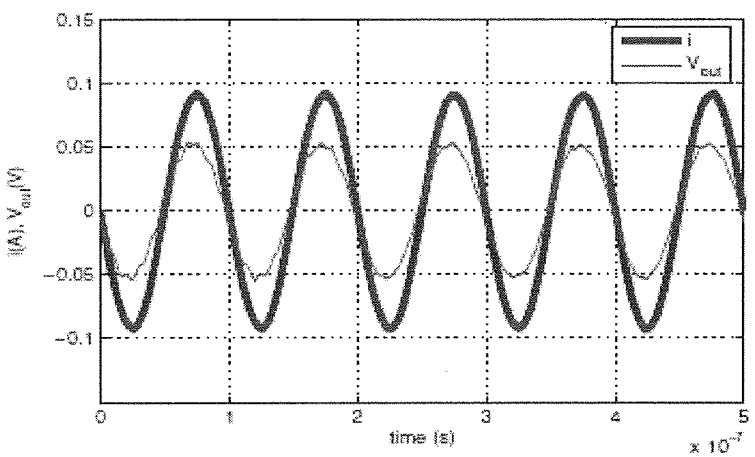
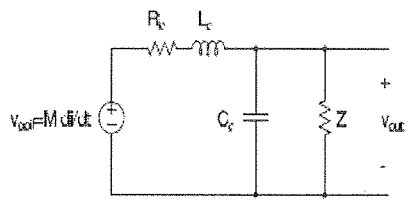


Figure 9: Measurement of A 10 MHz sinusoidal wave with a terminating impedance of 10 Ω.

شکل ۱۸- سیگنال خروجی یک پیچه روگوفسکی در حالت خود انتگرالگیری در فرکانسMHZ ۱۰ ،یک مقاومت ۱۰ اهمی

در حالت کلی به علت وجود خازن در فرکانس های بالا (مثل اینکه یک خازن استوانه ای داریم) و همچنین خود سیم پیچ یک مقاومت متناظری دارد که جمعاً سبب می شوند تا داشته باشیم :



$$V_{\text{coil}} = M \, {di}/{dt}$$

در نتیجه برای رابطه این مدار خواهیم داشت:

$$\frac{v_{out}}{v_{coil}} = \frac{R_{out} \| (1/sC_c)}{R_c + sL_c} = \frac{R_{out}}{R_c + sL_c} \quad = \frac{R_{out}}{sL_c}$$

و همانطور که مشخص است این مدار همانند یک فیلتر انتگرالگیر در فرکانسهای بیشتر از فرکانس گوشه کار می کند.

$$v_{out} = \frac{R_{out}}{sL_d} \cdot v_{coil} = \frac{R_{out}}{sL_c} \cdot M si = \frac{R_{out}}{L_c} Mi = \kappa i$$

یعنی ولتاژ خروجی با یک ضریب ثابت k به جریان عبوری از هادی ارتباط پیدا می کند. طوری که :

$$\kappa = \frac{R_{out}}{L_c} M$$

بنابراین ما باید تکنیکی به کار ببریم تا بتوانیم تمام این معایب را تا حد ممکن کاهش داده و مزایای آن را به کار ببندیم .

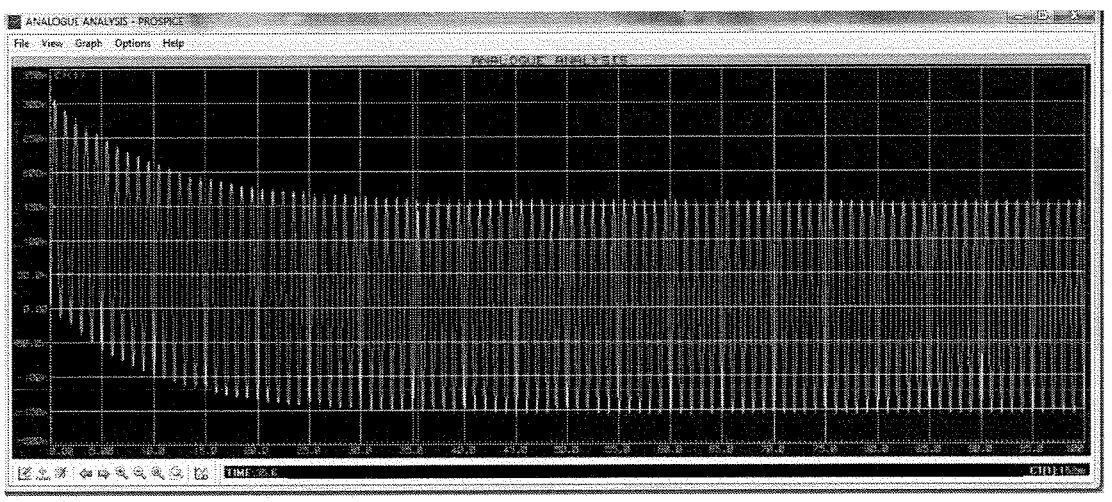
طراحی انتگرالگیر:

انتگرالگیری که طراحی می شود باید دارای ویژگی های زیر باشد:

الف) به ازای فرکانسهای وسیعی بتوان پاسخ گرفت. یعنی حوزه فرکانسی آن گسترده باشد.

ب) باید اثرات کابل ها اتصال نیز در نظر گرفته شوند.

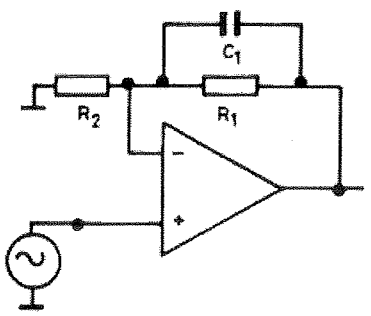
همانطور که قبلاً نیز بیان شد یک مدار RC نمونه با $R=1\ M\Omega$ و $C=10\ \mu F$ دارای یک ثابت زمانی برابر 10 S خواهد بودو در ضمن میدانیم که اگر این مدار بخواهد به حالت پایدار برسد باید در حدود ۵ ثابت زمانی(۵۰ ثانیه) از لحظه شروع آن بگذرد که این اتلاف زمانی قابل صرف نظر نبوده و لذا باید انتگرالگیری مناسب تر استفاده شود.



شکل ۱۹- سیگنال خروجی یک مدار انتگرالگیر که به صورت پسیو طراحی گردیده است.

برای کاهش این اتلاف زمانی ما از یک انتگرالگیر فعال (استفاده از IC و بالطبع منابع تغذیه) استفاده می کنیم.

یک شمای کلی از آن در شکل شماره ۲۰ آمده است:



شکل ۲۰- طراحی یک انتگرالگیر به صورت اکتیو

مقدار گین dc مربوط به این مدار برابر با $\frac{R_1}{R_2}$ خواهد بود.

پس فرض کنید $R_1 = 10\text{M}\Omega$ و $R_2 = 10\text{K}\Omega$ در نتیجه خواهیم داشت:

پس آفست میلی ولتی در ورودی (در حالت dc) یک آفست در حد ولت در خروجی ایجاد می کند.

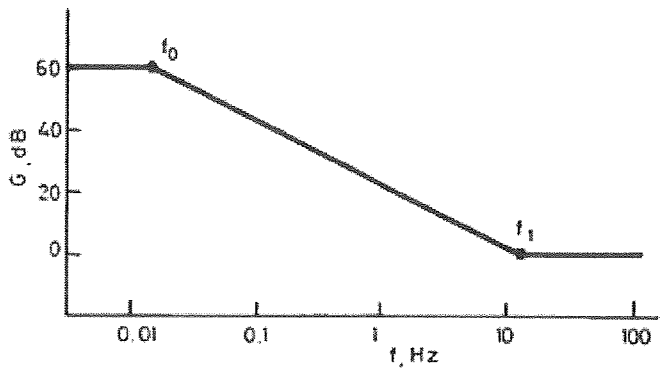
با انتخاب مقدار C_1 برابر با $1\ \mu F$ به یک ثابت زمانی برابر با 10 s می رسیم.

این انتگرالگیر دارای یک فرکانس قطع پایین و یک فرکانس قطع بالا خواهد بود که به ترتیب برابرند با :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \approx 0.016\ \text{Hz}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \approx 15.9\ \text{Hz}$$

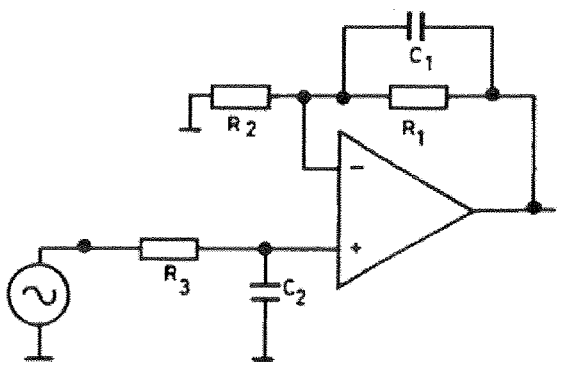
مشخصه فرکانسی این انتگرالگیر به این صورت است:



شکل شماره ۲۱- نمودار مشخصه فرکانسی یک مدار انتگرالگیر اکتیو که شمای آن در شکل شماره ۲۰ آمده است.

منتهی همانطور که مشخص است این انتگرالگیر پهنای فرکانسی کمی دارد و برای افزایش آن ناچاریم تا یک ترکیب دیگر به آن اضافه کنیم .

یعنی با Couple کردن یک RC. مطابق شکل زیر:



شکل ۲۲- ترکیب یک مدار پسیو و یک مدار اکتیو

برای اینکه ترکیب فرکانسی مدار قبلی عوض نشود باید فرکانس گوشه این مدار جدید اضافه شده ، منطبق بر f_1 باشد.

بنابراین: $R_2\,C_1 = R_3 C_2$

برای مثال $R_2\ C_1 = 10^{-2}$ S است با انتخاب $R_3 = 47\text{K}\Omega$ برای C_2 خواهیم داشت:

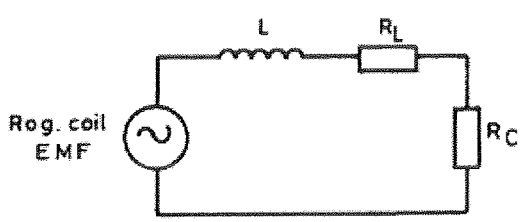
این مقدار را با یک فیلتر انتگرالگیر پسیو اگر مقایسه کنیم ، مشاهده می شود که با تغییر مقدار خازن (مقدار آن خیلی کوچک شده است) در نتیجه مدار سریع گردیده است.(fast)

این مدار تا فرکانسهای از مرتبه 100khzبه خوبی جواب میدهد.

ولی هنوز یک مسآله باقی مانده و آن مساله *Self-integrating* می باشد.

چون همانطور که قبلاً بیان شد ، پیچه در فرکانسهای بالا دارای یک سلف القایی خودی و یک خازن داخلی میباشد و باید اثرات آنها را هم مورد بررسی قرار داد. خازن داخلی آن خیلی ناچیز است و لذا می توان از آن صرفنظر کرد.

بنابراین مداری مطابق شکل زیر داریم:



که R_C مقاومت خود پیچه و R_L مقاومت سیمی است که بین خروجی پیچه و مدار انتگرالگیر قرار می گیرد.

سیم های ما با فرض اینکه مقدار امپدانس آنها مستقل از فرکانس می باشد در ۲ نوع 75Ωو $50\ \Omega$ در بازار رایج می باشد که ما از $50\ \Omega$ استفاده کرده ایم .

در اینصورت این مدار خود یک همچنین مشخصه ای دارد:

و در فرکانسهای $f \geq \frac{R_L+R_C}{2\pi L}$ به صورت یک انتگرالگیر عمل خواهد نمود.

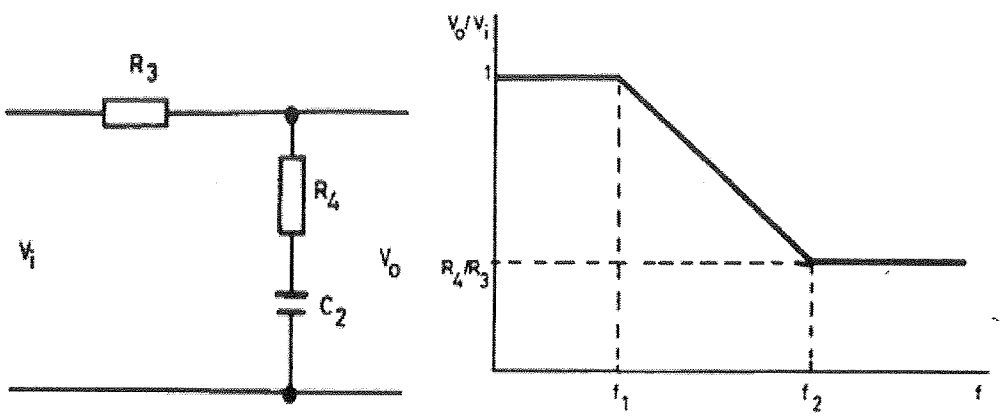
منتهی مقاومت پیچه در برابر $50\ \Omega$ خیلی ناچیز است و لذا $f \geq \frac{R_C}{2\pi L}$

فرض کنید که L در حد $1mH$ می باشد در نتیجه

$$f > \frac{50}{2\pi \times 10^{-3}} = 7.96\ \text{kHz}$$

یعنی خود سیم پیچ و بار موجود روی ۲ سر آن مثل یک انتگرالگیر عمل می نماید.

منتهی برای اینکه بتوان این مدار را به مدار قبلی اضافه نمود باید که یک قطب برای مدار *Passive* اضافه کنیم تا یک همچنین ترکیبی را در مشخصه فرکانسی بتوان ملاحظه کرد:



شکل۲۳- اضافه کردن یک مدار پسیو که یک صفر و یک قطب دارد.

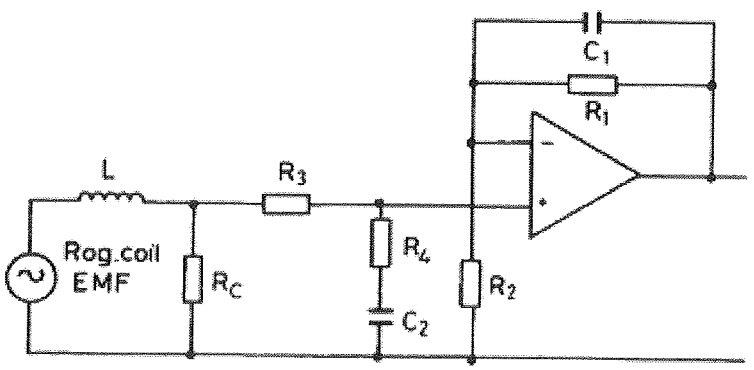
بنابراین ما باید فرکانس f_2را طوری تنظیم کنیم تا با فرکانس شکست خود انتگرالگیر برابر باشد.

پس : $$R_4 C_2 = \frac{L}{R_C}$$

که در آن با مقدارهای محاسبه شده قبلی داریم :

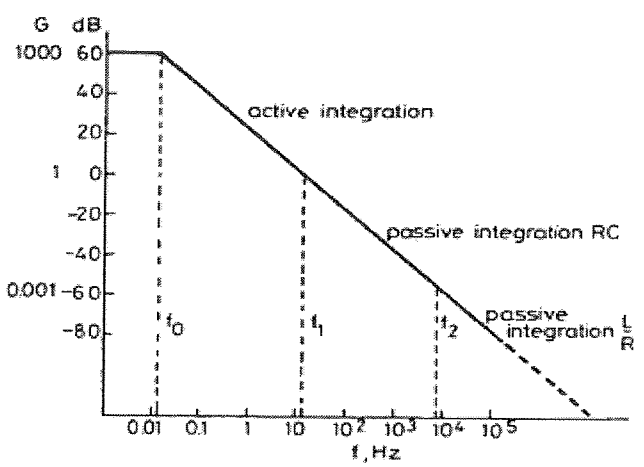
$$L=1mH \qquad R_C = 50\Omega \qquad C_2 = 0.23\mu f$$

و از تلفیق تمام چیزهایی که گفته شد خواهیم داشت:



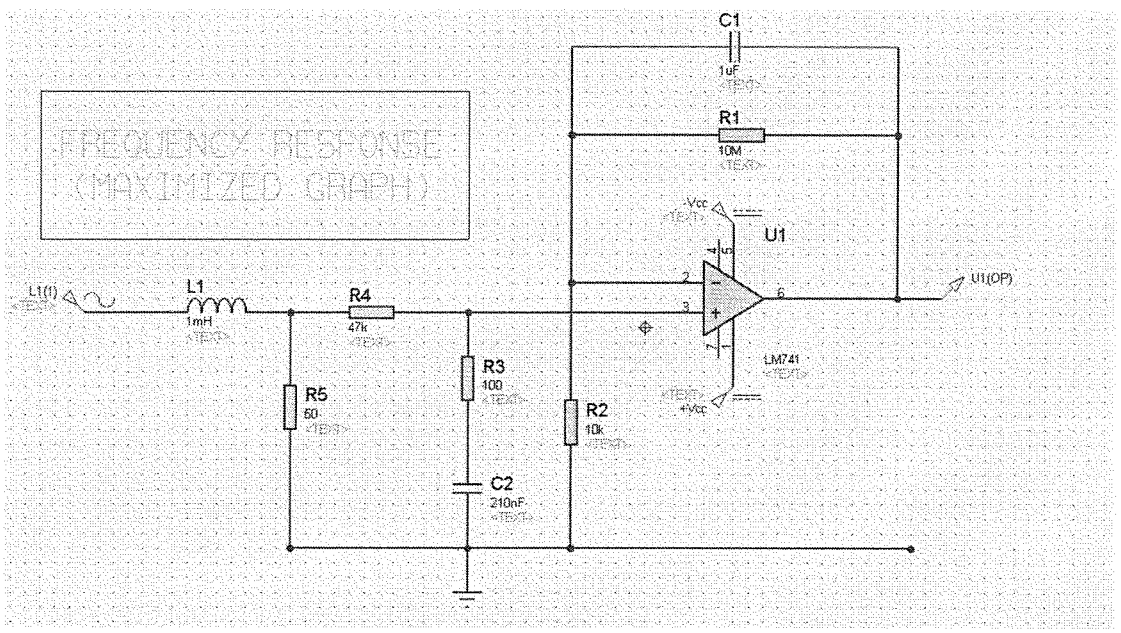
شکل شماره ۲۴- طراحی انتگرالگیر درحالت کلی با در نظر گرفتن تمام موارد

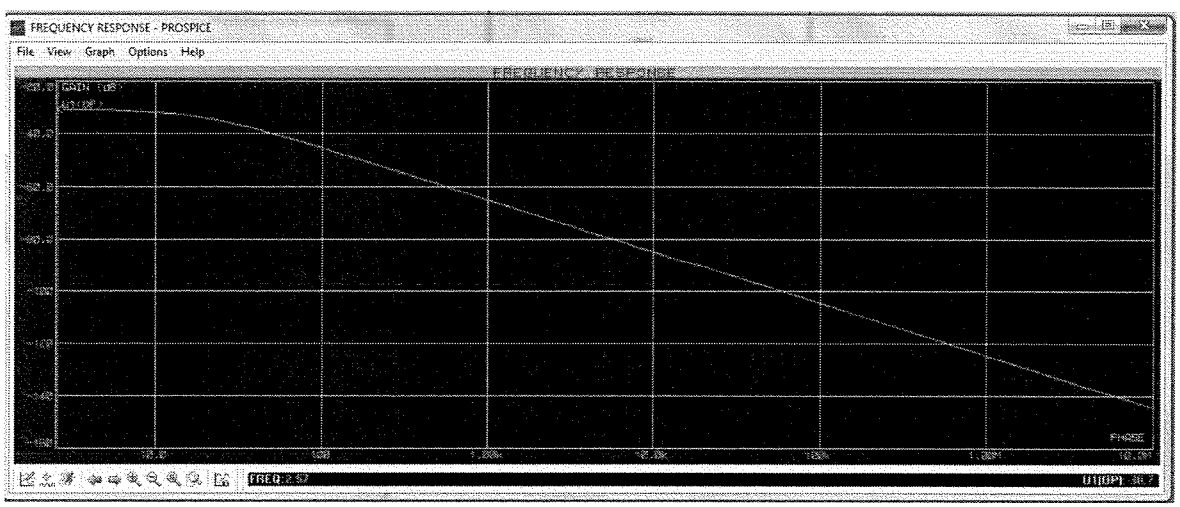
که مشخصه فرکانسی انتگرالگیر آن برابر خواهد بود با :



شکل۲۵- نمودار فرکانسی یک مدار انتگرالگیر که طراحی آن در شکل شماره ۲۴ آمده است.

نتایج شبیه سازی مدار انتگرالگیر پیشنهاد شده در صفحه قبلی:





برای ساخت پیچه روگوفسکی بیش از ۱۰ نوع روگوفسکی ساخته شد.

آزمایشات مختلف انجام شده توسط پیچه روگوفسکی نشان می دهد که ، هندسه پیچه و نحوه سیم بندی ، دو نوع سیگنال ، شدت آن و نویز موجود در آن بسیار تاثیر گذار بوده و همچنین هر چقدر که تعداد حلقه های روگوفسکی در مقایسه با طول آن بیشتر باشد و تقارن آن حفظ شود، و شعاع خود روگوفسکی نسبت به شعاع حلقه های آن بزرگ باشد ، خطای روگوفسکی در اندازه گیری ها پایین آمده و رابطه (۵-۱۲) نیز با خطای بسیار کمی در این نوع روگوفسکی صادق است.

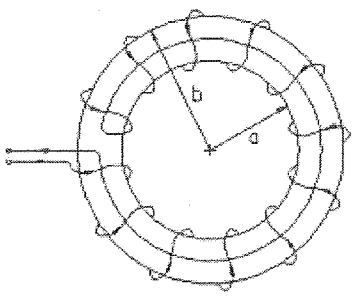
در ضمن باید نوع عایق سیم طوری باشد که در زمان اندازه گیری جریان الکتریکی که اختلاف پتانسیل بسیار زیادی در ۲ سر سیم پیچ ایجاد می شود ، جرقه نزند و همچنین یک عایق الکترو استاتیکی باید این پیچه را بر بگیرد تا جرقه های احتمالی در سیستم های تخلیه الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی و دستگاههای نظیر آن به خود پیچه برخورد نکند چون در اینصورت سیگنال به طور مستقیم روی اسیلوسکوپ می افتد و آن را خواهد سوزاند.

لذا برای اینکار یک قاب الکترو استاتیکی از جنس تفلون برای پیچه در نظر گرفته شد.

از طرف دیگر تا حد امکان باید نویزهای الکتریی و الکترو مغناطیسی موجود در محیط را حفاظت کرد تا بر روی سیگنال خروجی پیچه تأثیری نداشته باشد ، لذا برای این موضوع یک شیلد از جنس فویل آلومینیوم حول قاب الکترو استاتیکی پیچیده شد.

از طرفی دیگر چون ما می خواهیم خروجی را به اسیلوسکوپ وصل کنیم پس باید اتصال BNC داشته باشیم که باید حدالامکان به قاب الکترو استاتیکی نزدیک باشد تا نویز روی پیچه نیفتد.

همچنین برای اینکه پیچه طراحی شده flexible باشد باید برای قاب الکترو استاتیکی هم یک شیار طراحی شود تا بتوان آن را باز نمود و حول سیم حامل جریان قرار دارد.



روگوفسکی که ساخته شد دارای مشخصات ساختمانی زیر میباشد:

N=360 دور

r=2.64 mm

L=30 Cm

که در آن r شعاع حلقه های پیچه روگوفسکی می باشد.

و همانطور که قبلاً نیز بیان شد M برابر است با :

$$M = \mu_0 nA$$

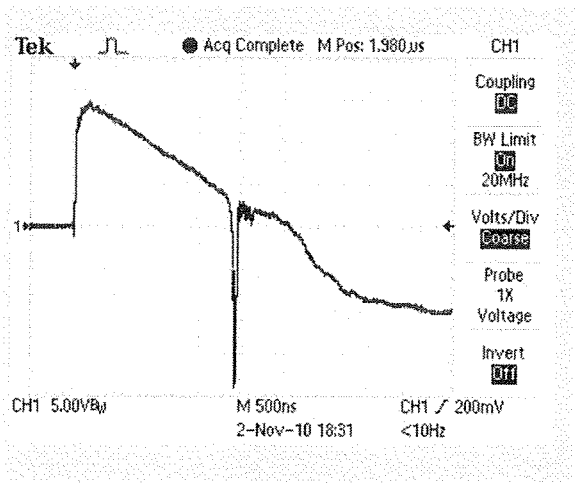
$$M=4\pi \times 10^{-7} \times \frac{360}{10^{-2}} \times \pi \times \left(\frac{2.64}{3}\right)^2 \times 10^{-6} = 3nH$$

$$M=3nH$$

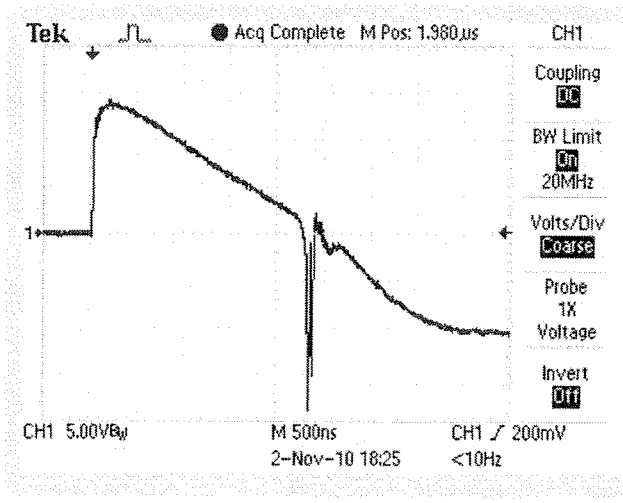
اندازه گیری سیگنال پینچ:

پس از طراحی و ساخت پیچه روگوفسکی به راحتی می توان وجود یا عدم وجود سیگنال پینچ را در دستگاه پلاسمای محوری بررسی کرد. محفظه خلأ دستگاه پلاسمای محوری ، توسط پمپ های خلأ تا 10^{-4}(torr) خلأ می شود و سپس گاز مورد نظر در فشار 10~0.1 (torr) در داخل محفظه تزریق می شود.

پس از شارژ خازن و تخلیه الکتریکی آن توسط اسپارک کپ، سیگنال تخلیه الکتریکی توسط روگوفسکی طراحی شده که دور یکی از گپ های خازن قرار می گرفت میسر شد.



شکل ۲۶- اندازه گیری سیگنال پینچ دستگاههای پلاسمای کانونی



نتیجه گیری

همانطور که در سیگنال های اندازه گیری پینچ در دستگاه پلاسمای کانونی می بینیم ، قله های نیز موجود در این سیگنال نشانگر یک فرکانس بالا خواهد بود که تحت شرایط کاری دشواری می باشد که نتایج حاکی از این می باشد که پیچه روگوفسکی در شرایط کاری سخت و جریان های بسیار بالا و فرکانس های کاری خیلی زیاد ، همچون شرایط عادی عمل نموده و محدودیتی ندارد.

این پیچه توانایی اندازه گیری جریان های مگاآمپری را نیز دارد.

پیشنهاد

میتوان با استفاده از پیچه روگوفسکی در پست های توزیع برق ، به یک شبکه توزیع هوشمند دسترسی پیدا کرد به طوری که پیچه ها را در پست های توزیع فشار قوی حول حاملان جریان قرار داده و اطلاعات خروجی پیچه را از طریق سیستم بی سیم (wireless) به یک پردازنده مرکزی ارسال می کنیم . در نتیجه اطلاعاتی از قبیل اضافه بار، تکفاز شده سیستم و یا هارمونیکهای موجود در شبکه را می توان لحظه به لحظه تحلیل نمود و به صورت هوشمند ، سیستم ، تصمیم گیری مناسب رما بر حسب شرایط موجود و دستورالعمل های از قبل تعیین شده انجام می دهد و باز از طریق شبکه بی سیم، اطلاعات از پردازنده به مقصد موردنظر ارسال می گردد و فرمان پردازنده ظرف چند میکرو ثانیه انجام می شود.

با این سیستم می توان پست های موجود در یک شهر را با یک سیستم هوشمند ، کنترل نمود.

منابع

1)using rogowski coils for transient current measurements by

D.A.Word and j.La t .Exon

2)Design and construction of a Rogowski coil for measuring wide pulsed current

YiLiu ,Funchang Lin ,Qin zhang,Heging zhong

3)A polyphase 500ka current measuring system with rogowski coils

J.A.S petting &j.siersema

4)mesurment of high frequency currents with a rogowski coil

M.Aregueso,C.Robles,J.Sanz

5)self integrating rogowski coil for high impulse current measurement

Ibrahim A.Metwally,senior Member