

کاهش سطح صدای ناشی از خود فرکانسی در مخزن

ترانسفورماتور

سعید بیگدلی

شرکت ایران ترانسفو- کارخانه قدرت- واحد مهندسی و طراحی

لایه های عایق صوتی پوشش داده میشود. در اثر پوشش دیواره توان دفع حرارتی ترانسفورماتور کاهش مییابد و موجب افزایش هزینه های سیستم سرمایش ترانسفورماتور میشود که میتوان از معایب این روش نام برد.

بسیاری از سازندگان به خود فرکانسی ترانسفورماتور توجه مینمایند و آن را به عنوان یک سیستم ارتعاشی مورد بررسی قرار میدهند در حال حاضر شرکت زیمنس و شرکت ایران ترانسفو از این روش استفاده مینمایند. هرچند صداهای ناخواسته دیگری از جمله صدای مربوط به پمپها، فنها، هسته ترانس، سیم پیچ های ترانس در سطح صدا موثر میباشند ولی با کاهش صدای خود فرکانسی مقدار قابل توجهی از سطح صدا کاهش مییابد.

۲. ارتعاشات ورق با لبه های ثابت

دیواره مخزن ترانس از ورق ۸ و ۱۰ میلیمتر ساخته میشود. برای تقویت این دیواره ها از پشت بند فولادی استفاده میشود. فاصله این پشت بندها متغیر بوده ولی در اکثر مواقع این فاصله 600 mm در نظر گرفته میشود. مطابق شکل (۱) پشت بند روی دیواره مخزن دیده میشود. قسمت فوقانی پشت بندها توسط قاب مخزن مهار میگردد. ولی از قسمت پایین این پشت بندها آزاد میباشند. ورق دیواره ما بین پشت بندها در حین کارکرد ترانسفورماتور شروع به ارتعاش میکند در اکثر مواقع این ورقها بصورت نیم سینوسی با مد اول ارتعاش مینمایند و پایینترین فرکانس را ایجاد میکنند. با فرض این مطلب که استحکام پشت بندها در مقایسه با دیواره مخزن بسیار بالا بوده و همانند یک جسم صلب عمل میکند و چهار طرف دیواره ما بین مخزن را مهار نموده است میتوان معادله موج دو بعد را حل نمود.

چکیده — در اثر کارکرد ترانسفورماتور قسمت فعال آن با فرکانس شبکه ارتعاش نموده و موجب میگردد مخزن فولادی نیز به ارتعاش واداشته شود و در نتیجه صدای ناخواسته ایجاد میگردد. در این مقاله فرکانس طبیعی مخزن و نحوه محاسبه آن مورد توجه قرار گرفته است و راه های عملی برای محاسبه فرکانسهای مذکور ارایه شده است.

واژه های کلیدی — سطح صدا، خود فرکانسی، ترانسفورماتور

۱. مقدمه

ترانسفورماتور به عنوان یک دستگاه الکتریکی در صنایع، نیروگاهها و پستهای توزیع کاربرد دارد، این دستگاه با افزایش سطح ولتاژ موجب میگردد جریان برق از نیروگاه به نقاط دور دست انتقال یابد و توسط ترانسفورماتور توزیع سطح ولتاژ کاهش یافته و به سطح ولتاژ در مصارف عمومی برسد. به علت گسترش شهرها و توسعه آنها اکثر پست های برق در مجاورت منازل مسکونی قرار گرفته اند و در آینده نیز شاهد گسترش این موضوع خواهیم بود لذا مراعات قوانین شهر نشینی از جمله جلوگیری از آلودگی صوتی در این پست ها مطرح میباشند و بسیاری از مشتریان ترانسفورماتور به عنوان یک شاخص اصلی در مشخصات فنی خود درج می نمایند و در صورت افزایش سطح صدا از مقدار مجاز جریمه های قابل توجه از سازندگان ترانسفورماتور دریافت مینمایند.

سازندگان ترانسفورماتور برای کاهش سطح صدا از راهکارهای مختلف استفاده مینمایند، در بعضی مواقع توسط عایق بندی ارتعاشات ترانسفورماتور را عایق میکنند در این عمل دیواره ترانسفورماتور توسط

کاهش سطح صدای ناشی از خود فرکانسی در مخزن ترانسفورماتور

پنجمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۷ - تهران، ایران

ANSYS مدل شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. شرایط مرزی کلیه ورقها یکسان بوده و جابجایی در لبه های ورق برابر صفر فرض شده است. مطابق جدول (۱) نتایج تحلیل برای نمونه آمده است.

جدول ۱: فرکانسهای طبیعی ورق فولادی در بعضی از ابعاد محاسبه شده

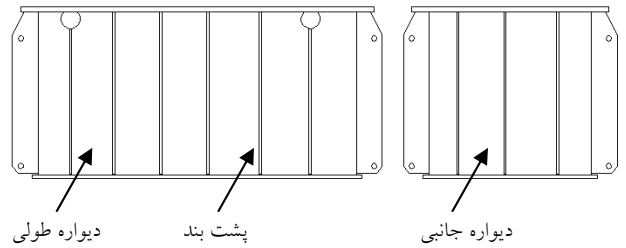
L_{FN} (m)	f_{11} [HZ]		
	$B_{FN} = 0.5$ (m)	$B_{FN} = 1$ (m)	$B_{FN} = 2$ (m)
0.5	283.5	-	-
0.75	213	-	-
1	194	71.2	-
1.25	186.5	-	-
1.5	-	53.0	-
2	-	48.7	19.1
2.5	-	46.8	-
3	-	45.9	13.4
4	-	-	12.2
5	-	-	11.7
6	-	-	11.5

همانطوری که از جدول فوق مشخص است با افزایش ابعاد ورق فرکانس طبیعی کاهش مییابد. در رابطه (۲) فرکانس زاویه ای ارایه شده است که با تبدیل آن به فرکانس در واحد هرتز میتوان روابط زیر را بدست آورد.

$$f_{nm} = \frac{S.K_F}{B_{FN}^2} \text{ (HZ)} \quad 3$$

$$K_F = \frac{K.B_{FN}}{2 \cdot \left(\frac{L_{FN}}{B_{FN}}\right)} \sqrt{n^2 + m^2 \left(\frac{L_{FN}}{B_{FN}}\right)^2} \quad 4$$

در رابطه (۳)، S ضخامت ورق فولادی برحسب متر است. در این رابطه اثر ضخامت ورق نیز به صورت خطی در روی فرکانس در نظر گرفته شده است. پارامتر K در رابطه (۴) از تقسیم S بر ثابت C حاصل میشود. لذا چون ثابت C مجهول میباشد بنابر این محاسبه K در این مرحله ممکن نیست. با جا گذاری مقادیر طول و عرض ورق در روابط فوق و در نظر گرفتن $n=m=1$ جدول شماره (۲) برای مقادیر KB_{FN} حاصل میشود.



شکل ۱: نمای طولی و جانبی مخزن ترانسفورماتور

طبق تئوری ارتعاشات معادله حاکم بر ارتعاشات دوبعدی بصورت رابطه (۱) است.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u \quad 1$$

در این رابطه c سرعت موج بوده واز واحد متر بر ثانیه است. این ثابت به خواص مکانیکی ورق بستگی دارد. هر چقدر ضریب فنریت فولاد افزایش یابد ثابت c نیز افزایش خواهد یافت در حالت کلی میتوان رابطه

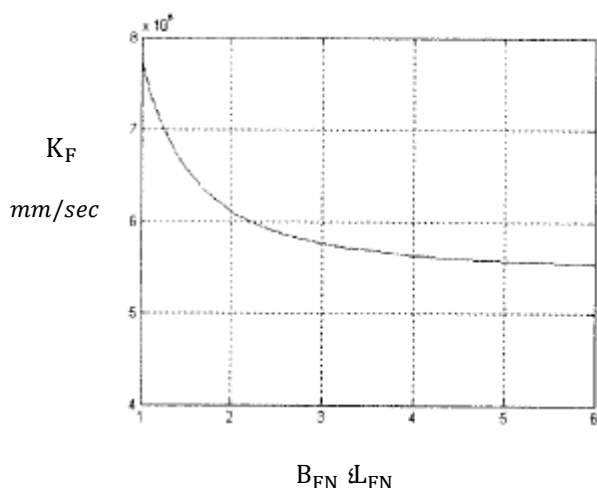
$u = Ue^{i\omega t}$ را در نظر گرفت. با فرض جوابی بصورت $c = \sqrt{\sigma/\rho}$ فرکانس مطابق رابطه (۲) حاصل میشود.

$$\omega_{nm} = c\pi \sqrt{(n/L_{FN})^2 + (m/B_{FN})^2} \quad 2$$

در این رابطه ω_{nm} [Rad/sec] است L_{FN} و B_{FN} به ترتیب طول و عرض ورق میباشد. n, m اعداد صحیح بوده و بیان کننده شماره مد ارتعاشی هستند. در حالت $n=1$ و $m=1$ به فرکانس پایه و یا اولین فرکانس میتوان رسید. این فرکانس شکل نیم سینوسی در جهت طول و عرض ورق را میدهد. با افزایش مقادیر n, m مدهای ارتعاشی دیگر حاصل میشود. فرکانس مدهای مذکور مطابق رابطه (۲) بیشتر از مد اول است. در حالت $n=m$ شکل مد در جهت طولی و عرضی ورق یکسان میشود. برای محاسبه ω_{nm} نیاز به محاسبه ضریب ثابت c است، چگالی فولاد $\rho = 7.8E + 3 \frac{kg}{m^3}$ میباشد. در صورتی که مقدار کشش (σ) در دست نیباشد. برای محاسبه مقدار ثابت c میتوان از روشهای عددی استفاده نمود و نتایج حاصل از عددی را با نتایج ریاضی مقایسه نمود. بدین منظور ورقهایی با ضخامت 8mm و ابعاد مختلف توسط نرم افزار

کاهش سطح صدای ناشی از خود فرکانسی در مخزن ترانسفورماتور

پنجمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۷ - تهران، ایران



شکل ۲: تغییرات K_F در مقابل L_{FN} / B_{FN}

جدول ۲: مقادیر KB_{FN}

L_{FN} (m)	KB_{FN}		
	$B_{FN} = 0.5$ (m)	$B_{FN} = 1$ (m)	$B_{FN} = 2$ (m)
0.5	12584	-	-
0.75	11081	-	-
1	10844	12598	-
1.25	10830	-	-
1.5	10858	11040	-
2	-	10890	13514
2.5	-	10865	-
3	-	10905	11158
4	-	-	10918
5	-	-	10906
6	-	-	10936

طراحی مخزن ترانسفورماتور بستگی به فرکانس شبکه دارد و در حالت تشدید فرکانس f_{11} به فرکانس شبکه (F_0) و یا به ضرایب زوج آن نزدیک میشود. بنابراین نبایستی f_{11} در محدوده $F_0 \pm 10$ ، $2F_0 \pm 10$ ، $4F_0 \pm 20$ ، $6F_0 \pm 20$ قرار گیرد. لذا میتوان رابطه (۵) را از رابطه (۳) و (۴) با فرض $\lambda = KB_{FN}/2$ بدست آورد. سپس نمودار مناطق غیر مجاز را رسم نمود.

$$B_{FN} = \frac{m.S.\lambda}{f_{nm}.L_{FN}.\sqrt{2}} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4.m^2.f_{nm}^2.L_{FN}^4}{n^4.S^2.\lambda^2}} \right]^{1/2} \quad 5$$

در رسم مناطق مذکور با فرض $n=m=1$ مناطق غیر مجاز مد اول حاصل میشود. با شرط f_{11} برابر با $F_0 \pm 10$ دونهودار برحسب L_{FN} و B_{FN} رسم میگردد. منطقه مابین این دو نمودار منطقه غیر مجاز خواهد بود. و بار دیگر با شرط f_{11} برابر با $2F_0 \pm 10$ منطقه غیر مجاز دیگر بدست می آید که با تکرار این برای محدوده های بعدی میتوان نمودار مربوطه را مطابق شکل (۳) ارائه نمود.

همانطوری که از جدول (۲) مشخص میباشد در حالت L_{FN} و B_{FN} برابر و یا نزدیک به هم مقدار KB_{FN} اختلاف فاحشی با دیگر مقادیر دارد. این حالت در طراحی ترانسفورماتور بوجود نمیاید. بنابراین برای حالت (L_{FN} / B_{FN}) برابر ۲ و بیشتر مقدار KB_{FN} بطور متوسط به عدد ثابت 10935 نزدیک میگردد. در جدول شماره (۳) درصد انحراف KB_{FN} از مقدار متوسط 10935 مشاهده میگردد.

جدول ۳: درصد انحراف KB_{FN} از مقدار متوسط

L_{FN} / B_{FN}	$\overline{K.B_{FN}}$	% انحراف
1	12897	15
1.5	11093	1.4
2	10884	0.46
2.5	10867	1.62
3	10899	0.3

بنابر این با انتخاب مقدار متوسط مذکور، میتوان K_F را براساس B_{FN} / L_{FN} رسم نمود. در رابطه (۴) مشاهده میگردد با افزایش نسبت فوق K_F کاهش مییابد. لذا برای محاسبه فرکانس طبیعی ورق کفایت از نمودار مقدار K_F تعیین گردد و سپس در معادله (۳) جایگذاری شود.

کاهش سطح صدای ناشی از خود فرکانسی در مخزن ترانسفورماتور

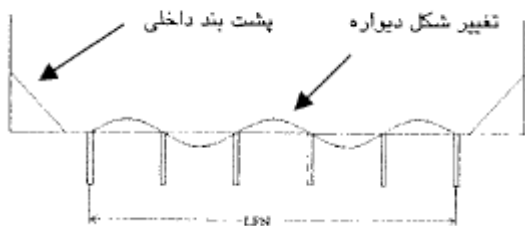
پنجین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۷ - تهران، ایران

نقاط گره در ورق ایجاد میشود . طبق رابطه (۶) که از حل معادله (۱) حاصل میگردد میتوان این موضوع را بررسی نمود.

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (B_{nm} \cos \omega_{nm} t + B_{nm}^* \sin \omega_{nm} t) \sin \frac{n\pi}{L_{FN}} x \cdot \sin \frac{m\pi}{B_{FN}} y \quad 6$$

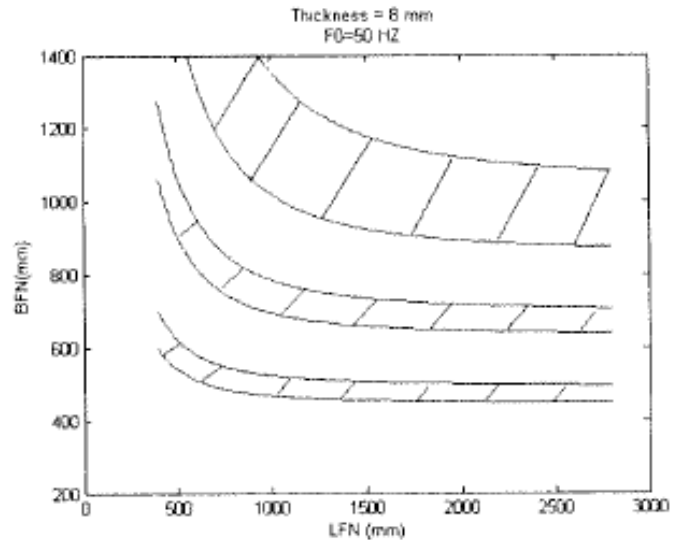
توابع مثلثاتی سینوس و کسینوس دارای دوره تناوب 2π هستند و با توجه به رابطه (۶) مشاهده میگردد دوره تناوب در جهت x برابر $2L_{FN}/n$ است در حالت $n=1$ دوره تناوب برابر $2L_{FN}$ بوده و بدین مفهوم است که یک تغییر شکل نیم سینوسی در جهت طول ایجاد میشود . در صورت $n=2$ دوره تناوب به L_{FN} رسیده و یک گره در طول ورق بوجود می آید . با افزایش n تعداد گره روی دیواره نیز افزایش یافته طوری که همواره به تعداد $n-1$ گره روی دیواره ایجاد میشود . در این حالت ورق در مد n و $m=1$ ارتعاش میکند . در این حالت در جهت عرضی هیچگونه گره ای ایجاد نخواهد شد . اکنون میتوان چنین بیان نمود که محل گره ها در روی دیواره طولی و عرضی میتواند محل پشت بند ها باشد . فاصله نقاط گره در روی دیواره با همدیگر برابر میباشد . در طراحی دیواره مخزن اکثراً "فاصله پشت بندها با همدیگر برابر میباشد که این مقدار در بسیاری از طراح ها 600 mm در نظر گرفته میشود .

در حین ارتعاش دیواره مخزن پشت بندهای تقویتی نیز در نقاط گره به صورت جزئی تغییر شکل میدهند ، لذا در این محاسبات مینیمم اثر پشت بندهای مذکور در نظر گرفته شود.



شکل ۴: ارتعاش دیواره و نقاط گره روی آن

توسط نرم افزار ANSYS مدل های مختلفی از دیواره مخزن با ضخامت 8 mm به همراه پشت بندهای مربوطه ساخته شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار



شکل ۳: مناطق غیر مجاز خود فرکانسی

در نمودار فوق مناطق غیر مجاز خود فرکانسی مشاهده میگردد . بطور مثال انتخاب ابعاد ورق $L_{FN} = 2000 \text{ mm}$ و $B_{FN} = 7000 \text{ mm}$ مناسب نمیشود ، و در منطقه غیر مجاز قرار میگیرد . لذا توسط نمودار ارایه شده در شکل (۳) میتوان برای ورق مهار شده از لبه ها محدوده طراحی را مشخص نمود طوری که پدیده تشدید ایجاد نگردد . در حالت تشدید فرکانسهای تحریک با فرکانسهای طبیعی برابر میگردند.

۳. ارتعاشات مخزن ترانسفورماتور

مطالب ارایه شده فوق تنها برای یک ورق با ابعاد و ضخامت مشخص میباشد که بصورت دورتا دور مهار شده است . ولی در عمل برای مخزن ترانس این چنین نیست . پشت بندهای بکار رفته در روی دیواره طولی و عرضی مخزن همانند یک تکیه گاه گیر دار عمل نمیکند و به علت خاصیت ارتجاعی آن نمیتوان ورق بین دو پشت بند را همانند ورق گیر را در نظر گرفت . لذا بعضی از روابط ارایه شده در قسمت قبل برای این حالت صادق نمیشود . بنابراین در تجزیه و تحلیل کل دیواره طولی و عرضی را مینیمم در نظر گرفت . مطابق رابطه (۳) بینهایت فرکانس طبیعی برای یک ورق موجود است که با انتخاب $n=m=1$ به اولین فرکانس میتوان دست یافت . با افزایش n, m فرکانسهای بالاتر حاصل میگردد . با حفظ $m=1$ و افزایش n تعدادی

کاهش سطح صدای ناشی از خود فرکانسی در مخزن ترانسفورماتور

پنجمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۷ - تهران، ایران

جدول ۵: مقادیر K_p در مقابل B_{FN}

B_{FN}	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
K_p	1.43	1.63	1.81	2.02	2.21	2.41	2.6

رابطه حاصل از مقادیر جدول (۵) توسط رابطه (۸) ارایه شده است .

$$K_p = 0.39.B_{FN} + 0.85 \quad \text{۸}$$

با ترکیب دو رابطه (۸) و (۷) به رابطه فرکانس طبیعی دیواره مخزن در حالت واقعی خواهیم رسید L_{FN} از رابطه $d(k-1)$ حاصل میشود و d بر حسب متر بیان کننده فاصله بین دو پشت بند است . اکنون برای دو حالت ورق گیردار و دیواره با پشت بند فرکانسهای طبیعی را میتوان محاسبه نموده و با هم مقایسه کرد .

مثال :

مخزن با طول داخل به داخل 4470 mm عرض داخل به داخل 1470 mm و ارتفاع داخل به داخل 2443 mm موجود بوده ضخامت دیواره آن 8 mm است . روی دیواره طولی 7 پشت بند و دیواره عرضی یک پشت بند موجود است . فاصله پشت بندها از همدیگر نیز برابر 600 mm میباشد . فولاد بکار رفته ST37 و پشت بند عرضی روی دیواره هم موجود نیست . با فرض ورق گیردار ، مقدار $L_{FN} = 2.41m$ ، $B_{FN} = 0.6m$ ، $n=m=1$ و $s=8mm$ فرکانس طبیعی پایه روی دیواره طولی طبق رابطه (۳) برابر $f_{11} = 125 \text{ HZ}$ است . محاسبه در حالت واقعی $L_{FN} = 3.6m$ و $B_{FN} = 2.41m$ ، $n=1$ و $m=1$ فرکانس طبیعی پایه روی دیواره طولی طبق (۷) برابر $f_{61} = 55.7 \text{ HZ}$ حاصل میگردد که اختلاف فاحشی با مقدار قبلی دارد .

طبق جدول (۴) در صورتی که ارتفاع داخل به داخل ترانسفورماتور از 2m بالاتر میرود فرکانس دیواره نیز به مقادیر غیر مجاز نزدیک و یا حتی در داخل منطقه مذکور قرار میگیرد . در صورتی که ضخامت ورق دیواره 8 mm و 10 mm باشد فرکانس طبیعی دیواره 69.6 HZ میرسد و از منطقه غیر مجاز خارج میگردد . هرگاه بجای افزایش ضخامت دیواره از قطعات تقویتی عرضی استفاده گردد در این صورت یا B_{FN} کاهش مییابد و یا مد دوم در جهت عرضی ایجاد میشود ($m=2$) هر دو فرض موجب افزایش فرکانس خواهد شد . با فرض نصف شدن B_{FN} مقدار f_{61} به 89.5 HZ میشود . در صورتی که دیواره در $m=2$ ارتعاش نماید f_{62} برابر 60.38 HZ میگردد .

گرفت در این تحلیل ضریب ارتجاعی فولاد $(2.0E + 11 \text{ pa})$ در نظر گرفته شده است . نتایج حاصل از تحلیل مطابق جدول (۴) آمده است .

جدول ۴: مقادیر f_{n1} برای حالت دیواره با پشت بند

$f_{n1} \text{ (HZ)}$					
n	4	5	۶	7	8
k	5	6	7	8	9
L_{FN}	2.4	3	3.6	4.2	4.8
$B_{FN} = 1.5$	77.2	75.9	75.2	74.6	74.5
$B_{FN} = 2.0$	64.2	62.8	62.0	61.5	61.2
$B_{FN} = 2.5$	56.9	55.4	54.3	54.1	53.8
$B_{FN} = 3.0$	52.0	50.8	50.0	49.5	49.2
$B_{FN} = 3.5$	-	47.6	46.8	46.3	46.0
$B_{FN} = 4.0$	-	-	44.5	44.0	43.7
$B_{FN} = 4.5$	-	-	-	42.2	41.9

در جدول فوق k بیان کننده تعداد پشت بند روی دیواره طولی است . همانطوری که مشاهده میگردد n از ۴ الی ۸ در نظر گرفته شده است . مقدار n به اندازه $k-1$ است . با افزایش ابعاد دیواره در جهت عرضی مقادیر فرکانس کاهش مییابد . این در حالی است که با افزایش ابعاد دیواره در جهت طولی تقریباً مقدار فرکانس ثابت است . بنا بر این تمام ورقهای موجود در بین پشت بندها دارای فرکانس ثابتی دارند و این مقدار به مراتب کمتر از حالت گیر دار ورق است . لذا میتوان رابطه (۲) را بصورت ساده شده با در نظر گرفتن اثر پشت بند بصورت رابطه (۷) نوشت .

$$f_{nm} = \frac{5467.S}{B_{FN}} K_p \sqrt{(n/L_{FN})^2 + (m/B_{FN})^2} \quad \text{۷}$$

اکنون با جاگذاری مقادیر L_{FN} ، s ، n ، B_{FN} و در رابطه (۷) به مقادیر مختلف K_p خواهیم رسید که متغیر با B_{FN} است . در جدول (۵) مقادیر K_p در مقابل B_{FN} آمده است . تغییرات بصورت خطی بوده و میتوان به راحتی معادله آن را ارایه داد .

۴. نتیجه گیری و جمع بندی

هرچند در مدارک طراحی روش محاسبه خود فرکانسی ورق گیر دار ارایه شده است ولی این روش به تنهایی جهت محاسبه فرکانسهای طبیعی مخزن ترانسفورماتور کافی نمیباشد. فرکانسهای طبیعی مخزن به تعداد پشت بندهای روی دیواره ، طول ، عرض ، ضخامت دیواره بستگی دارد که اثر تمام این پارامترها در رابطه ۷ ارایه شده است. لذا در طراحی مخزن ترانسفورماتور میتوان از رابطه اشاره شده جهت محاسبه فرکانسهای طبیعی مخزن استفاده نمود. لازم به ذکر است با این روش علاوه بر صرفه جویی در هزینه های مدل سازی و طراحی موجب میگردد طراح در محاسبات دستی خود موضوع خود فرکانسی را بطور کامل بررسی نماید