

「低C L発振子」 コラム

待機電流 = 32kHz発振 + RTC + etc < 0.7 μA

6. 発振利得(ループゲイン)と発振余裕度

発振器の原理についてもう少し詳しく紹介します。帰還回路(移相器)を有する反転増幅器で構成された帰還増幅器は図1に示すとおりです。帰還増幅器が安定に発振持続するには、帰還回路の損失分を何らかの方法で補わなければ入力信号は減衰してしまいます。その為に増幅率Aと帰還率(減衰率)βの積、すなわち発振利得が1以上必要とし、発振性能を左右する極めて重要なファクタとなる。<ループゲインG=A×β>1

典型的な帰還増幅器(コルピッツ回路)を図2に示します。LC発振回路と水晶発振回路を比較すれば、水晶振動子はコイルと等価な働きをしていることがわかります。

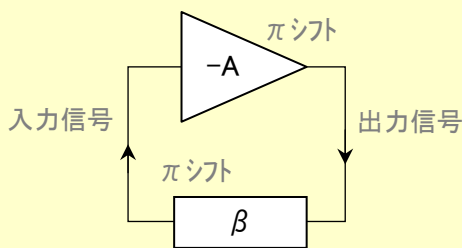


図1. 帰還増幅器(発振原理)

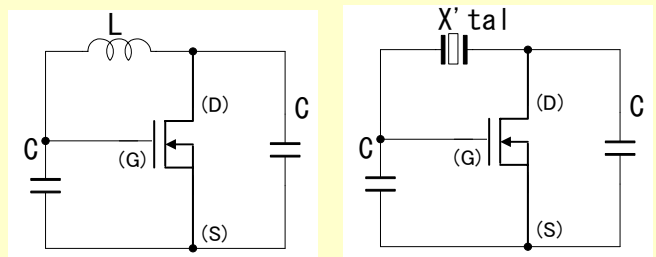


図2. 典型的な帰還増幅器(コルピッツ発振回路)

これより、図3のコルピッツ発振回路の等価回路モデルを用いて発振条件(発振利得)を導くことができます。増幅率Aはインピーダンス比、帰還率βは電圧比であることに気がつけば、

$$G = A \times \beta = \frac{g_m \cdot X_g \cdot X_d \{ R_e - j(X_e - X_g - X_d) \}}{R_e^2 + (X_e - X_g - X_d)^2} > 1$$

但し、 $Z_x = R_e + jX_e$ 、 $Z_g = -jX_g = -j/\omega C_g$ 、 $Z_d = -jX_d = -j/\omega C_d$ です。 g_m (Ωの逆数)は相互コンダクタンスで、 $g_m = \text{貫通電流 } I_{ds} / (V_g - V_{th})$ 。
ループゲインGの虚数部=0(位相条件)が成立つとき、その実数部が求める発振利得(振幅条件)となり、

$$G = \frac{g_m \cdot X_g \cdot X_d}{R_e} > 1 \quad \therefore \frac{g_m}{\omega^2 \cdot C_g \cdot C_d} > R_e$$

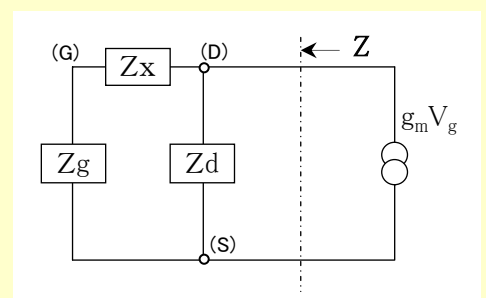


図3. 発振器の等価回路モデル

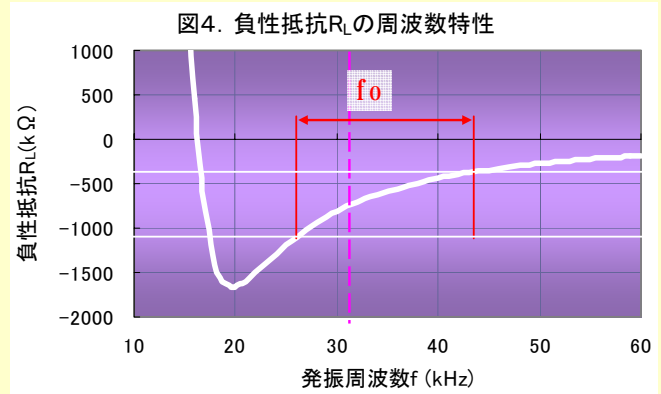
上の不等式の左辺は負性抵抗 R_L の大きさと、負帰還抵抗 $R_f = \infty$ 、 $R_d = 0 \Omega$ 時の理想的な特性を表します。弊社では、上記の実効抵抗 R_e の代わりに R_{1max} を用いて発振余裕度Mと定義しています。< $M = |R_L| / R_{1max}$ >

負性抵抗 R_L あるいは発振余裕度Mが極端に小さい場合は、発振起動特性の悪化に繋がり、最悪は不発振やジッタ増大など好ましくありません。逆に極端に大きい場合には、負帰還抵抗 R_f の影響が無視できなくなり発振異常(不定)を引き起こす原因となります。超低消費電力マイコンのRTC機能を安心してご使用頂く為、SII独自の安全設計(安全係数、安全ファクタなど)の概念を導入致しました。

角周波数 ω と時定数 τ の関係式 $\langle \omega \times \tau = \omega \times (C \times R) = 1 \rangle$ に着目し、角周波数 ω を $\omega_0 (= 2\pi f_0)$ で正規化してみると、

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0} = \frac{\tau_0}{\tau} = \sqrt{\frac{|R_L|}{Rf}}$$

| | |
|-------------------------------|----------|
| $\frac{\omega}{\omega_0} < 1$ | 正常発振 |
| $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$ | 不発振 |
| $\frac{\omega}{\omega_0} > 1$ | 不定(異常現象) |



負性抵抗 $|R_L|$ の上限限界を示す変換式が導かれ、負帰還抵抗 Rf の影響を受ける。安全設計の為の配慮が必要であり、安全係数を導入しました。安全にご使用頂く為に、負性抵抗 R_L の範囲をSII独自に基準化した結果、 **$R_L = -750k\Omega \pm 400k\Omega$ が望ましい**という結論(推奨)に至りました。負性抵抗の周波数特性図4を参照のこと。

弊社は、上記の負性抵抗 R_L あるいは発振余裕度 $M (= |R_L| / R_{Lmax})$ が発振性能を決定付ける本丸と位置付けています。一般的には、発振余裕度を上げる手法として、負性抵抗の改善が有効であり、発振器の自己消費電流を増加させれば容易に解決できますが、消費電力増加となってニーズにマッチしなくなることは明白です。発振性能を確保しながら自己消費電流 I_{sub} をいかに低減するかをテーマにチャレンジして参りました。目指してきたひとつの答えを負性抵抗 R_L の視点から、32kHz発振の消費電力削減についてアプローチしてみます。

小さな負荷容量で構成した発振回路(低CL発振器)と大きな負荷容量で構成した発振回路(高CL発振器)を用い、それぞれの負性抵抗 $|R_L|$ と自己消費電流 I_{sub} の関係について評価したのでご紹介します。

推奨する適正な負性抵抗 R_L に於いて、32kHz発振の自己消費電流の関係は図5に示す相関を有し、発振性能が同レベルでありながら消費電流あるいは消費電力が大幅に削減されていることを表1は示しています。

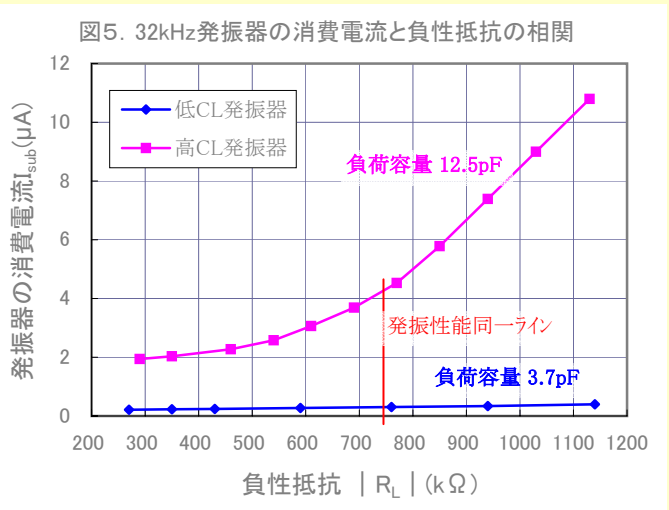
表1. 低CL発振器と高CL発振器の消費電力比較

| 測定項目 | 発振器の負荷容量* | 発振器の適正な負性抵抗 $ R_L $ | | |
|----------|-----------|---------------------|---------------|----------------|
| | | 350k Ω | 750k Ω | 1150k Ω |
| 発振器の消費電流 | 3.7pF | 0.23 μ A | 0.30 μ A | 0.40 μ A |
| | 12.5pF | 2.03 μ A | 4.53 μ A | 10.80 μ A |
| 発振器の消費電力 | 3.7pF | 0.25 μ W | 0.36 μ W | 0.52 μ W |
| | 12.5pF | 2.84 μ W | 7.70 μ W | 20.51 μ W |
| 消費電力の削減率 | | 91.2% | 96.1% | 97.5% |

*負荷容量 $CL = C_g C_d / (C_g + C_d) + C_s$

【御気付きでしょうか】

- ・負性抵抗 R_L を低下させることなく、消費電力を削減できること。
- ・貫通電流 I_{ds} は、 $V_g - V_{th}$ に比例すること。
- ・貫通電流 I_{ds} は、負荷容量 CL の2乗に比例すること。
- ・低電圧化と低CL化を同時に行うと超低消費電力化できること。
- ・超低消費電力マイコンは、高い発振性能と安全を有すること。
- ・低CL発振子は、製品と技術を提供していること。



超低消費電力マイコン(78K0/KC2-L, 78K0R/Kx3-Lおよび78K0R/Lx3, R8C/Lxなど)とセットでご使用頂くことで、従来のマイコンの待機電流(5 μ A)に対して、消費電力約80%削減(1 μ A以下)が可能となり、待機電力の大幅削減に貢献いたします。電池駆動の電子機器の長寿命化・長時間化やエコロジー製品の省エネルギー化に、是非SIIの低CL発振子をご活用下さい。

次回掲載予定

