

スイッチングレギュレータシリーズ

降圧コンバータ IC のスナバ回路

降圧コンバータ IC では、スイッチノードで多くの高周波ノイズが発生します。これらの高調波ノイズを除去する手段の一つとしてスナバ回路があります。このアプリケーションノートでは RC スナバ回路の設定方法について説明しています。

RC スナバ回路

降圧スイッチングコンバータの回路を Figure 1 に示しますが、実際には Figure 2 のように多くの寄生インダクタ L_P と寄生容量 C_P が存在します。ハイサイドスイッチがターン・オンおよびターン・オフする時に、寄生インダクタに蓄積されたエネルギーにより入カーループで共振が発生します。寄生素子の値は非常に小さいため、この共振周波数は数百 MHz 以上になり、EMI(電磁妨害)特性の悪化を招きます (Figure 3)。

RC スナバ回路は高周波ノイズを除去する対策としてよく知られた方法です。Figure 4 のようにスイッチノードに単純な RC ネットワークを追加するだけで高周波ノイズの低減を実現できます。

Figure 5 にスナバ回路の動作を示します。ハイサイドスイッチがターン・オン時に寄生インダクタに蓄積されたエネルギーがスナバコンデンサ C_{SNB} に静電エネルギーとして蓄えられます。スイッチノードの電位は入力電圧 V_{IN} まで上昇するため、 V_{IN} まで充電されたときはコンデンサには $1/2 \times C_{SNB} \times V_{IN}^2$ のエネルギーが蓄えられます。このときスナバ抵抗 R_{SNB} に充電されたエネルギーと同じ $1/2 \times C_{SNB} \times V_{IN}^2$ の抵抗損が発生します。ローサイドスイッチがターン・オン時は、スイッチノードが GND 電位に低下するので、スナバコンデンサ C_{SNB} に蓄えられたエネルギーはスナバ抵抗(ダンピング抵抗)を経由して放電されます。このときもスナバ抵抗 R_{SNB} で $1/2 \times C_{SNB} \times V_{IN}^2$ のエネルギーが消費されます。この式の説明を補足しますと、充電後のコンデンサの電荷 Q は $C_{SNB} \times V_{IN}$ で、電源から供給される電力は $V_{IN} \times Q = C_{SNB} \times V_{IN}^2$ です。コンデンサへの蓄積エネルギーと放出エネルギーは、充放電の周期が CR 時定数より十分長ければ、コンデンサの容量と電圧だけで決まります。充電時には電源からのエネルギーの半分が抵抗でジュール熱となり、残りの半分がコンデンサへ静電エネルギーが蓄積されます。放電時は蓄積された半分の静電エネルギーが抵抗で熱になります。この割合は抵抗値が変わっても、充放電に必要な時間が変わるだけで一定です。

スイッチングの 1 サイクルで合計 $C_{SNB} \times V_{IN}^2$ の損失が抵抗で発生し、スイッチングの回数だけ損失が発生するので、発生する損失は $C_{SNB} \times V_{IN}^2 \times f_{SW}$ となります。無負荷でもスイッチング動作している限りスナバ回路で損失が発生するため、効率を低下させる要素になります。

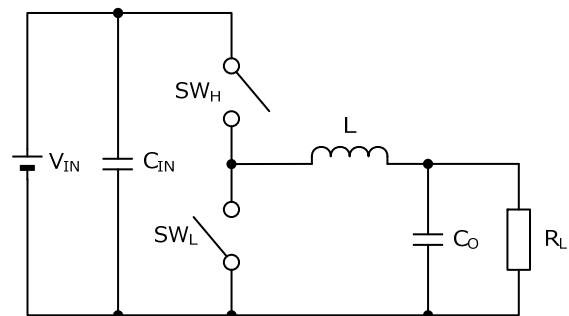


Figure 1. 降圧スイッチングコンバータ回路

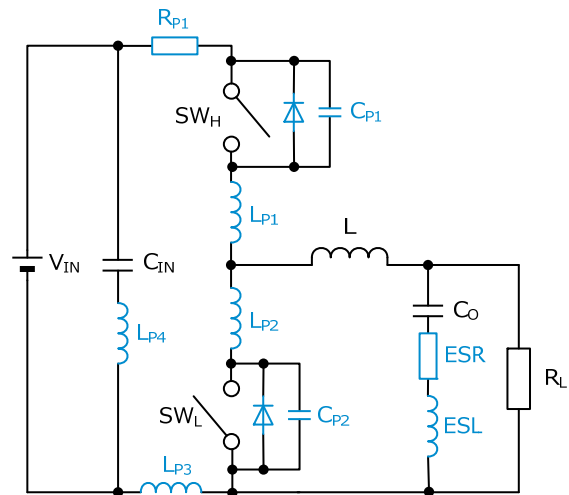


Figure 2. 寄生素子を考慮した回路

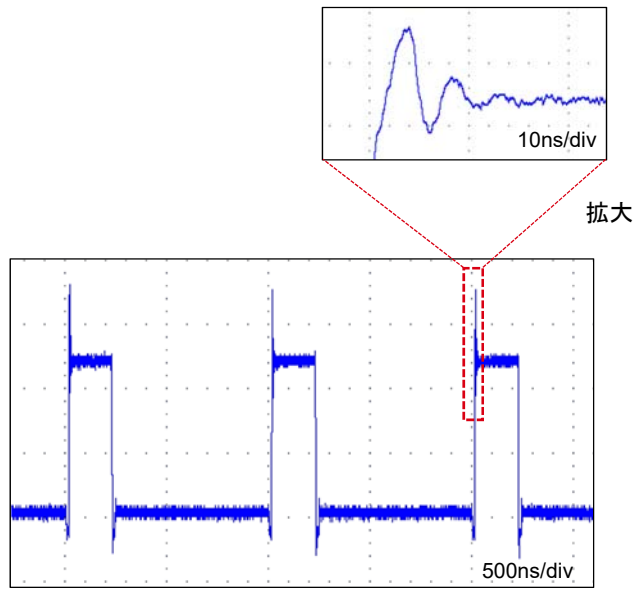


Figure 3. スイッチノードのリングング波形

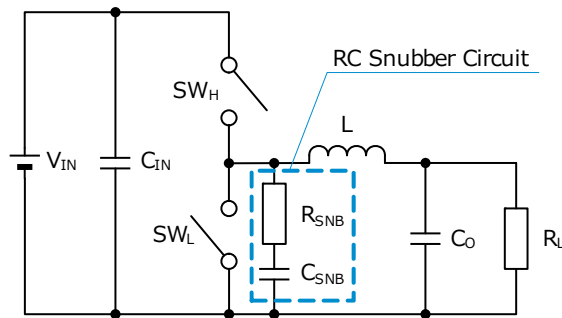


Figure 4. RC スナバ回路

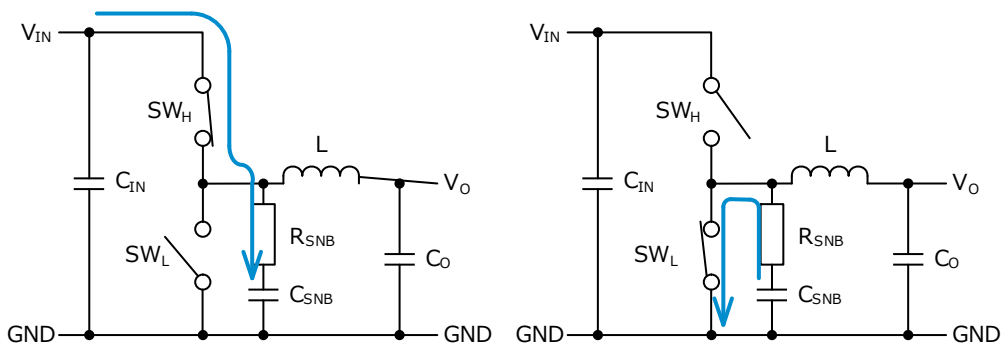


Figure 5. スナバ回路の動作

RC 値の算出

文献『K. Harada, T. Ninomiya, M. Kohno, “Optimum Design of RC snubbers for Switching Regulators”, IEEE Transactions of Aerospace and Electronics Systems, Vol.AES-15, No.2, March 1979』では、リングングがなくなるスナバ回路の RC 値は次の 2 つの式で与えられています。

$$R_{SNB} = 0.65 \times \sqrt{\frac{L_P}{C_{P2}}} \quad (1)$$

$$C_{SNB} = 8 \times C_{P2} \quad (2)$$

しかし、 L_P や C_{P2} は寄生素子であり、メーカーが情報を公開しない場合や、値が小さいため定数抽出が困難である事情があります。ここでは、実機で波形を観測しながら定数を算出する方法について説明します。まず簡単な算出手順は次のとおりです。

RC 値の算出手順

1. リングング周波数 f_r をオシロスコープで測定します。
2. スイッチノードと GND 間にコンデンサ C_{P0} を接続し、リングング周波数が 1/2 になる容量値を求めます。
3. コンデンサ値 C_{P0} の 1/3 が寄生容量 C_{P2} です。

$$C_{P2} = \frac{C_{P0}}{3} \quad [F] \quad (3)$$

4. 寄生容量 C_{P2} より寄生インダクタンス L_P を求めます。

$$L_P = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \times C_{P2}} \quad [H] \quad (4)$$

5. 共振の特性インピーダンスを求めます。

$$Z = \sqrt{\frac{L_P}{C_{P2}}} \quad [\Omega] \quad (5)$$

6. スナバ抵抗 R_{SNB} を特性インピーダンス Z と同等の値にします。

$$R_{SNB} \geq Z \quad [\Omega] \quad (6)$$

7. スナバ容量 C_{SNB} は寄生容量 C_{P2} の 1~4 倍にします。

$$C_{SNB} = (1\sim 4) \times C_{P2} \quad [F] \quad (7)$$

8. スナバ抵抗 R_{SNB} の消費電力を求めます。

$$P_{RSNB} = C_{SNB} \times V_{IN}^2 \times f_{SW} \quad [W] \quad (8)$$

定格電力が消費電力の 2 倍以上ある抵抗を使用します。

RC 値の算出例

ここからは実際に測定を行いながら、RC 値の算出手順に従って説明します。

1. リングング周波数をオシロスコープで測定しますが、測定ポイントのスイッチノードでは必ずプローブを使用します。スイッチノードに付加される容量を小さくするため、プローブの先端に付いているフック・チップを取り除き、プローブピンを直接スイッチノードに接触させます。グラウンド・リードはインダクタ成分を付加させるため取り除きます。代わりにグラウンド・リード・アダプタを取り付け、グラウンド長を最小にします(Figure 6)。

リングング波形を拡大し、周波数を測定します(Figure 7)。この例では 217.4MHz が観測されました。



Figure 6. プローブセットアップ

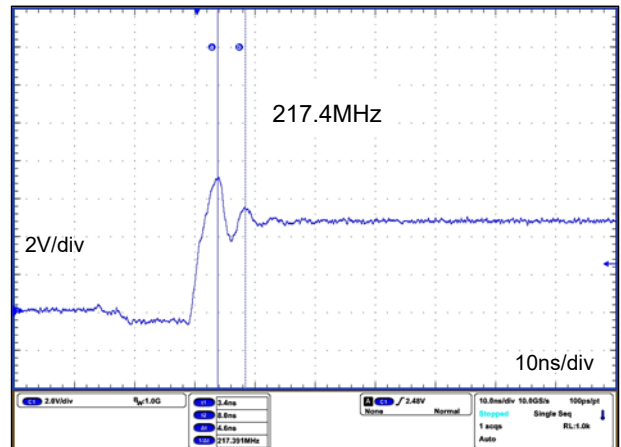
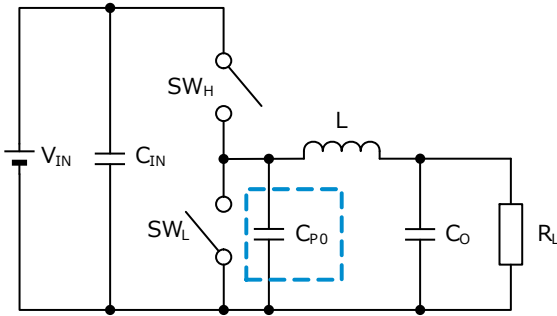
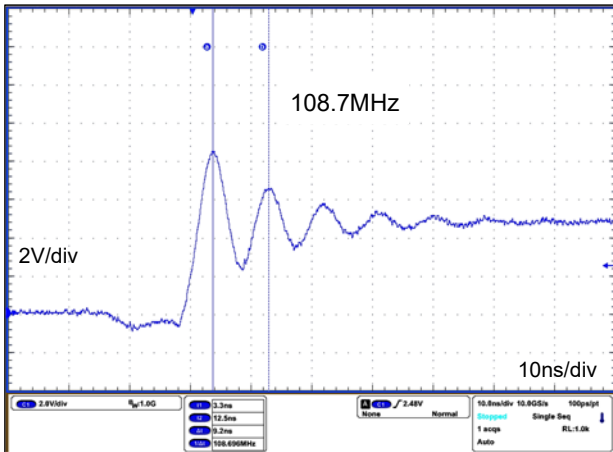


Figure 7. リングング周波数を測定

2. Figure 8 のようにスイッチノードと GND 間にコンデンサ C_{P0} を接続し、リングング周波数が 1/2 になる容量値を求めます。この例では 217.4MHz の半分の 108.7MHz を目指します。実験の結果 680pF を付加したときにリングング周波数が約 108.7MHz になりました(Figure 9)。

Figure 8. C_{P0} を付加Figure 9. C_{P0} に 680pF を付加したときのリングング周波数

3. リングングの共振周波数は $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_P \cdot (C_{P2} + C_{P0})}}$ で決まるため容量値が 4 倍になると周波数は半分になります。つまり寄生容量 C_{P2} は付加した容量 C_{P0} の 1/3 と推測されます。 C_{P0} が 680pF より、寄生容量 C_{P2} は以下になります。

$$C_{P2} = \frac{C_{P0}}{3} = \frac{680\text{pF}}{3} = 227\text{pF}$$

4. 寄生容量 C_{P2} が判ったので、共振周波数の式 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_P \cdot C_{P2}}}$ を変形して寄生インダクタ L_P を求めます。リングング周波数 f_r が 217.4MHz、寄生容量 C_{P2} が 227pF より、

$$L_P = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \cdot C_{P2}} = \frac{1}{(2\pi \times 217.4\text{MHz})^2 \times 227\text{pF}} = 2.36\text{ nH}$$

5. 共振の特性インピーダンスを求めます。計算を単純化するため伝送線路の損失を考慮せず、理想的な実数値で行います。

$$Z = \sqrt{\frac{L_P}{C_{P2}}} = \sqrt{\frac{2.36\text{nH}}{227\text{pF}}} = 3.22\ \Omega$$

6. リングングを減衰するには、スナバ抵抗 R_{SNB} の大きさを、共振の特性インピーダンス Z と同等にする必要があります。

$$R_{SNB} \geq Z \quad [\Omega]$$

この例では 3.3 Ω を選びました。

7. スナバ容量 C_{SNB} は寄生容量 C_{P2} の 1~4 倍にします。

$$C_{SNB} = (1\sim 4) \times C_{P2} \quad [F]$$

計算では 227pF、454pF、681pF、908pF となり、現物では 220pF、470pF、680pF、1000pF になります。これらの容量を順番に変えて行き、リングング波形を観測します。結果を Figure 10~14 に示しますが、680pF 時にリングングが無くなり良好な波形だと判断できます。リングングが無くならない時は、容量値をさらに 10 倍程度まで増やして行き波形を観測します。ただし、容量値が大きくなるほど電力損失が増え、効率が低下します。

8. スナバ抵抗 R_{SNB} の消費電力を以下の式で求めます。この例では、入力電圧 V_{IN} が 5V、スイッチング周波数 f_{SW} が 1MHz なので、

$$P_{RSNB} = C_{SNB} \times V_{IN}^2 \times f_{SW} = 680\text{pF} \times 5^2 \times 1\text{MHz} = 17\text{ mW}$$

17mW の損失がスナバ抵抗に発生します。この例では損失が小さいですが、入力電圧が高い場合は損失が大きくなりますので、抵抗の定格電力にも注意しないとスナバ抵抗が焼損する事があります。スナバ抵抗は、定格電力が消費電力の 2 倍以上あるものを推奨します。

例えば、入力電圧 V_{IN} が 24V、スイッチング周波数 f_{SW} が 1MHz の場合は、

$$P_{RSNB} = 680\text{pF} \times 24^2 \times 1\text{MHz} = 0.39\text{W}$$

0.39W の消費電力が発生するため、定格電力 1W で 6432 (2512 inch)サイズの抵抗が必要になります。

この例では、3.3 Ω と 680pF の定数が選ばれましたが、これは、初めに測定したリングング周波数に対してのみ有効で、入力電圧や負荷電流によってこの状況が変わる可能性があることを考慮しなければいけません。どの条件でリングングを最大に減衰するかを目標値として持つておく必要があります。



Figure 10. スナバ回路なし

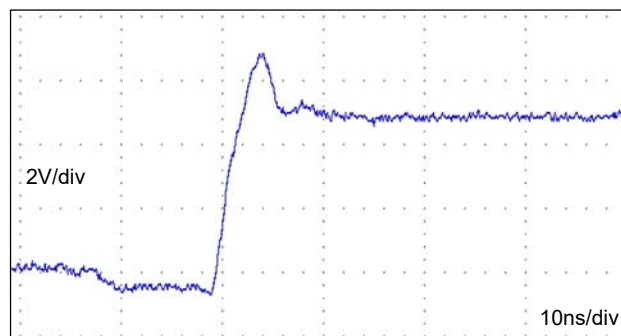


Figure 14. $R_{SNB}=3.3\Omega$, $C_{SNB}=1000pF$

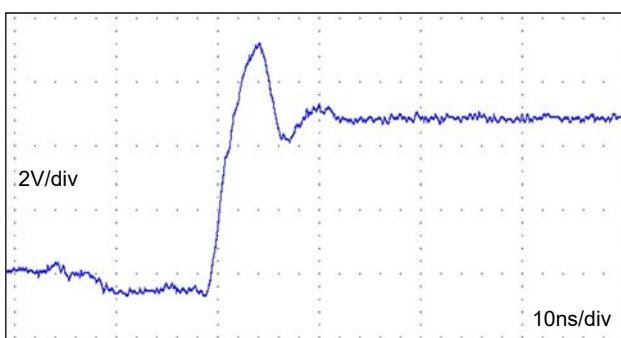


Figure 11. $R_{SNB}=3.3\Omega$, $C_{SNB}=220pF$

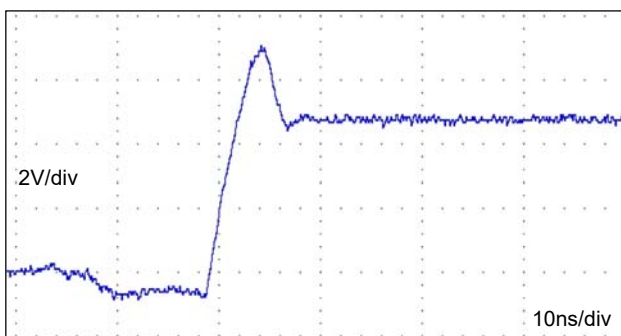


Figure 12. $R_{SNB}=3.3\Omega$, $C_{SNB}=470pF$

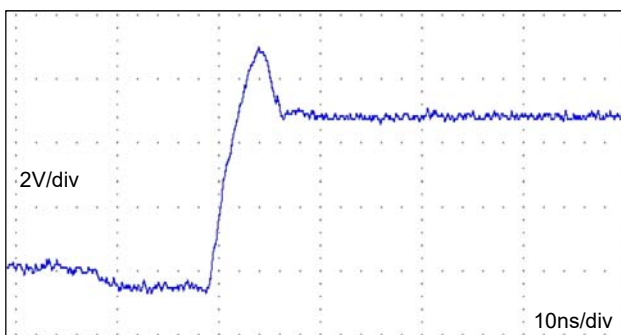


Figure 13. $R_{SNB}=3.3\Omega$, $C_{SNB}=680pF$

ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本製品は、一般的な電子機器（AV機器、OA機器、通信機器、家電製品、アミューズメント機器など）および本資料に明示した用途への使用を意図しています。
- 7) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされておられません。
- 8) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 9) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 10) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものです。万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 12) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上でご使用ください。お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 13) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 14) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>