

## 窮地を救う適切なスナバ電力損失の見積り

### はじめに

顧客が懸念を抱いています。彼は、あなたが設計した電圧レギュレータのスナバ回路の抵抗が過熱していると確信しており、それが報告されているフィールドでの障害の原因ではないかと疑っています。すでにフィールドで使用されている数百万の製品が絡んでいます。間もなく顧客が協力を求めてあなたのところにやってきます。リコールをかけるべきでしょうか？ どのような対策を推奨しますか？

### なぜスナバを使用するのか？

最初に、スナバを使用する背景となる理論を見てみましょう。図1は、RCスナバ回路を備えた標準的なバックスイッチングレギュレータを示しています。スナバがないと、リングングが発生する場合があります。これは、1つのトランジスタターンオフと次のトランジスタターンオンの間のデッドタイムに発生します。この間、出力ループはMOSFETの寄生直列インダクタンスと並列コンデンサによってのみクローズされます。理論上、結果として生じるリングングは入力電圧の2倍の大きさになる可能性があります。不適切なPCBレイアウトも、リングングの大きな要因となります。リングングは電磁干渉(EMI)とシステムノイズ干渉を引き起こし、パワートレイトランジスタのブレークダウン定格を上回って重大な回路障害につながる可能性があります。スナバ回路は、抵抗の消費電力と引き換えにリングングを安全な値まで低減します。

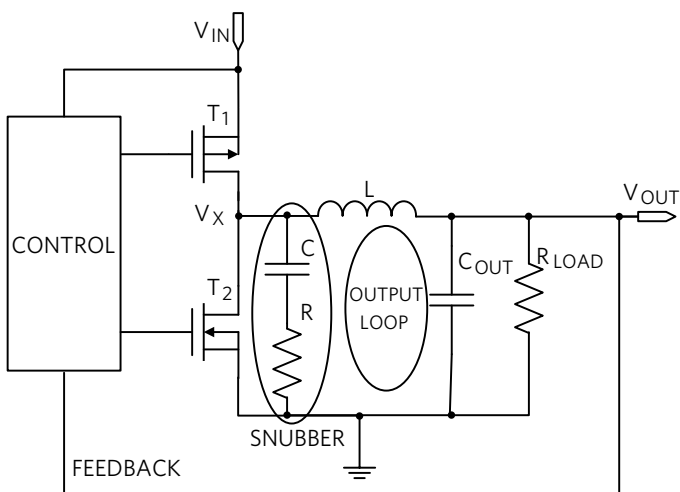


図1. RCスナバ回路を備えたバックスイッチングレギュレータ

### デバッグ

では、元の話に戻りましょう。顧客のラボを訪ねて、電圧レギュレータが実装されている混雑したPCBを見せてもらいます。小さい外付けのSMD 4.7Ω、2mm x 1.2mm x 0.45mm抵抗(0805)がかろうじて目に入ります。その性能が低下して、回路の動作を不完全にしているのでしょうか？顧客は、抵抗の定格は1/8W (125mW)であり、計算によると定格電力以上の消費が示されていると、懸念の原因を説明します。彼は、方形波電圧Vおよび周波数fでのRC回路の計算は非常に簡素だと言います。

$$P = CV^2f = 680\text{pF} \times 19.5^2\text{V} \times 500\text{kHz} = 129\text{mW}$$

問題は、単に消費電力がわずかに(4mW)抵抗の定格電力を上回っていることではありません。適切な設計マージンを提供するために、抵抗の電力定格は消費電力の2倍にせよというのが、彼の黄金律なのです。したがって、抵抗の電力定格は100%以上不足していることとなります。そうなのでしょうか？

### CV<sup>2</sup>fの導出

エレクトロニクス業界で最も一般的な式の一つが、CV<sup>2</sup>fです。それを理解するために、導出過程を見ていくのが役立ちます。図2は、指定された値の電圧ソースとスナバ回路によって図1のVxノードを表したものです。

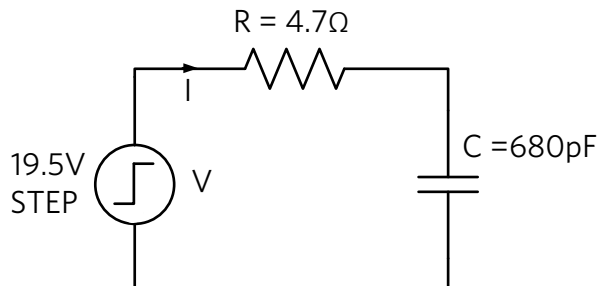


図2. スナバ回路の簡略図

正のステップ電圧下では、スナバ回路の電流は次のようになります。

$$I = \frac{V}{R} \times e^{-t/RC}$$

ここで、Vは19.5Vのステップ振幅です。抵抗の消費電力は、次のとおりです。

$$P(t) = R \times I^2 = \frac{V^2}{R} \times e^{-2t/RC}$$

瞬時電力から平均電力へは、時間にわたる積分、すなわちエネルギーの計算が必要になります。反復的方形波の半周期(T/2)にわたる積分は、実質的にRC<<Tの場合と同じ結果になることに注意してください。

$$\int_0^{+\infty} P(t) \times dt = \frac{1}{2} CV^2$$

方形波電圧ソースの場合、電圧ソースの「ロー」の期間に同じ量のエネルギーが消費されるため、1つの周期で消費される総エネルギーは2倍になります。

$$E = CV^2$$

平均消費電力は、エネルギー(E)を周期(T)で割った値です。

$$P = \frac{CV^2}{T} = CV^2f$$

ここで、fは方形波電圧ソースの周波数です。

ここで注意すべき重要な点として、この式の基本的な前提は、スナバ入力電圧が完全に垂直な立上り/立下りエッジを備えた方形波(ステップ関数)であるということです。私たちの例の場合、この仮定はどこまで正しいでしょうか？

### 有限立上り/立下り時間の導出

スナバ入力ノード(図1のV<sub>x</sub>)に電圧プローブをつなぐと、確かに立上り/立下り時間は非常に高速であることがわかります。これらのエッジは、19.5Vの行程を10nsで上昇/下降しています。これは、大きな差になるのでしょうか？振り出しに戻って、先ほどと同じ計算を再び行いますが、今回はステップ関数エッジの代わりに傾斜エッジ(図3)を使用します。

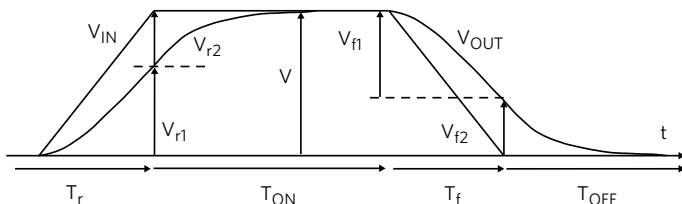


図3. 傾斜波形

以下の式は、立上り時間T<sub>r</sub>とT<sub>ON</sub>のそれぞれに関連するエネルギー(E<sub>r1</sub>およびE<sub>r2</sub>)を表します。

$$E_{r1} = CV^2 \frac{T_r}{T_f} \left( T_r - \frac{3}{2} \tau + 2\tau e^{-\frac{T_r}{\tau}} - \frac{\tau}{e} e^{-\frac{2T_r}{\tau}} \right)$$

$$V_{r1} = \frac{V}{T_r} \left[ T_r - \tau(1 - e^{-\frac{T_r}{\tau}}) \right]$$

$$E_{r2} = \frac{1}{2} CV_{r2}^2$$

$$V_{r2} = V - V_{r1}$$

立下りエッジについても、同様の式の組み合わせが導出されます。

$$E_{f1} = CV^2 \frac{T_f}{T_f} \left( T_f - \frac{3}{2} \tau + 2\tau e^{-\frac{T_f}{\tau}} - \frac{\tau}{e} e^{-\frac{2T_f}{\tau}} \right)$$

$$V_{f1} = \frac{V}{T_f} \left[ T_f - \tau(1 - e^{-\frac{T_f}{\tau}}) \right]$$

$$E_{f2} = \frac{1}{2} CV_{f2}^2$$

$$V_{f2} = V - V_{f1}$$

総平均消費電力は、4つのエネルギーの合計と電圧ソースの周波数との積です。

$$P = (E_{r1} + E_{r2} + E_{f1} + E_{f2})f$$

苦労した結果、傾斜の場合の電力損失の式は少し複雑になることがわかります。

### 簡素化

図2の場合の救いは、スナバRCの時定数が立上りエッジの時間(T<sub>r</sub>)に比べて小さく、かつ立上り時間と立下り時間が等しいということです。

$$\tau = RC = 4.7 \times 680n = 3.2nsec < T_r = 10nsec, \text{ hence } e^{-T_r/\tau} \ll 1$$

and  $T_r = T_f$

そのため、傾斜の電力の式を次のように簡素化することが可能です。

$$P \approx CV^2 f \alpha$$

ここで、補正項αは単に次の内容です。

$$\alpha = 2 \frac{T_r}{T_r} \left( 1 - \frac{T_r}{T_r} \right) = 0.43$$

したがって、スナバRC回路での実際の消費電力は、ステップ関数を前提とした予想の半分以下になります。

$$P \approx 129mW \times 0.43 = 56mW$$

この結果は、正確な計算と比較して約1mWの範囲内の精度です。したがって、1/8Wの抵抗は実際に消費電力の2倍以上であり、結局は顧客の黄金律を守っていることになります。あなたは窮地を逃れることができました。

$T_r \ll \tau$ の場合、たとえば

$$\tau = RC = 4.7 \times 680n = 3.2nsec \gg T_r = 0.1nsec$$

の場合は、補正項は次のようになります。

$$\alpha' = \left( 1 - \frac{T_r}{\tau} \right) = 0.97$$

言い換えると、ステップ関数の式が最適なのはこの場合です。最後に、 $T_r \approx \tau$ の場合、最適な近似式は次のとおりです。

$$\alpha'' = 1/3.$$

## Simplis検証

上記で示したのは、第一が正確な消費電力の式で、第二が簡略化したものです。どちらも、回路の裏にある物理学と数学をある程度思い出す必要があります。コンピュータがあれば、Simplisを使って簡単に回路をシミュレートし、容易に答を得ることができます。

図4は、Simplisでシミュレートしたステップ関数の場合の電力、電圧、および電流波形を示しています。この場合のピーク消費電力は81Wと大きく、これが望ましくない理由を示しています。図4の中央にあるPower(R1) (Y2)というラベルにも、平均消費電力が129.28876mWと記載されており、先ほどの計算と一致します。

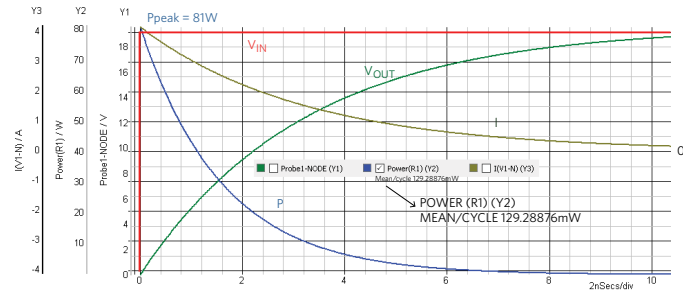


図4. スナバのSimplisシミュレーション(ステップ関数入力電圧)

図5は、Simplisでシミュレートした傾斜の場合の電力、電圧、および電流波形を示しています。この場合のピーク消費電力はわずか7.5Wで、これが望ましい理由を示しています。図5の上部にあるPower(R1) (Y2)というラベルにも、平均消費電力が57.383628mWと記載されており、約1mWの近似計算の範囲内に収まっています。

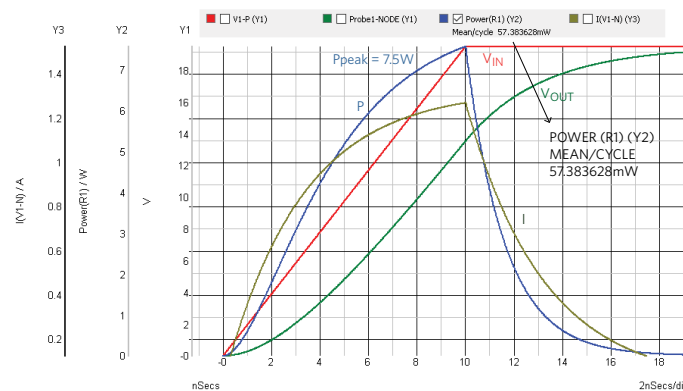


図5. スナバのSimplisシミュレーション(傾斜入力電圧)

多くのスイッチングレギュレータの実装では、 $V_x$ 出力にスナバ回路があることが有益です。スナバ回路を利用するバックコンバータの実用的な例としては、マキシムのHimalayaファミリのバックコンバータが優れたリソースになります。

## マキシム・ジャパン株式会社

〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-4 大崎ニューシティ4号館20F [maximintegrated.com/jp](https://www.maximintegrated.com/jp)

© 2017 Maxim Integrated Products, Inc. All rights reserved. Maxim IntegratedおよびMaxim Integratedのロゴは、米国およびその他の国の管轄域におけるMaxim Integrated Products, Inc.の登録商標です。その他、記載されている会社名、製品名は各社の登録商標、または商標です。

## 結論

いくつかの角度からスナバ回路の消費電力を分析し、関連する電力損失を適切に見積るための各種の方法を示しました。最初の話に戻ると、最終的にRCスナバ回路は無罪であることが判明し、故障返品の原因は一部のはんだ付け不良でした。リコールは不要でした。設計者として、ツールキットにいくつかのツールを揃えておくのは良いことですが、それより重要なのは、いざというとき作業に最も適したツールを選び取ることです。

## 関連情報:

[アプリケーションノート:「R-C Snubbing for the Lab」\(英文\)](#)

[Himalayaステップダウンスイッチングレギュレータおよびパワーモジュール](#)

## デザインソリューションNo. 32

設計サポートが必要な場合は、Eメールにてお問い合わせください。

<https://www.maximintegrated.com/jp/support/overview.html/TechSupportFormJapan>

[その他のデザインソリューションを探す](#)

