# 評価基板EPC9176を使って掃除機のモーター駆動用インバータを設計する方法

## 動機

非常に高効率で小型なモーター駆動用途に対する需要がますます大きくなっているため、EPCは、掃除機用インバータの最大性能を実現するためのeGaN ICベースの基板**EPC9176**を設計しました。EPC9176は、3個のeGaN IC（**EPC23102**）に基づいています。この基板は、ヒートシンクなしで13 $A_{RMS}$、ヒートシンク付きで18 $A_{RMS}$を供給できる3相インバータで、ICの温度上昇を50°C以下に保ちます。このEPC9176基板は、最高250 kHzのPWM（パルス幅変調）スイッチング周波数をサポートします。

## システムの概要

このインバータ基板には、以下に説明するように、掃除機のモーター駆動用の完全なインバータをサポートするために必要なすべての機能回路が含まれています：

- 6個のeGaN IC（**EPC23102**）に基づく3相インバータ；
- 直流リンク・コンデンサ；
- 安定化した補助電源；
- 調整回路付きの電圧、電流、温度のセンサー；
- 保護機能

このインバータ基板の写真が図1です。

コントローラのコネクタ（J60）を使って、EPC9176の信号を外部のデジタル・マイクロコントローラ・ユニットと接続します。

スイッチング・セルは、対称的なレイアウトで配置されています。位相出力電流は、シャント抵抗を介して測定されます。各相のモーター接続と同相の検出抵抗があります。さらに、互換性のあるモーター・シャフト・エンコーダ、またはホール効果センサーは、コネクタJ80を介してモーター制御用駆動インバータEPC9176に接続でき、フィルタ処理した出力信号は、コネクタJ60に接続したマイクロコントローラで使えます [1]。

過電流（OC：overcurrent）が発生すると、内蔵の過電流検出回路がトリガーされます；OC信号は、J60コネクタを介してマイクロコントローラに送信されます。

直流リンク・コンデンサは、電源とインバータの間の変動する瞬間的な電力交換のバランスを取り、インバータの高周波パワー・スイッチ回路によって生じるリップルを安定化させます。高いスイッチング周波数によって、必要な容量値を減らすことができます。このため、直流リンクは、セラミック・コンデンサとタンタル・コンデンサによって実現され、ユーザーはEPC9176をカスタマイズして、高いスイッチング周波数と低いスイッチング周波数の両方の動作条件で最適なフィルタリングを見つけることができます。

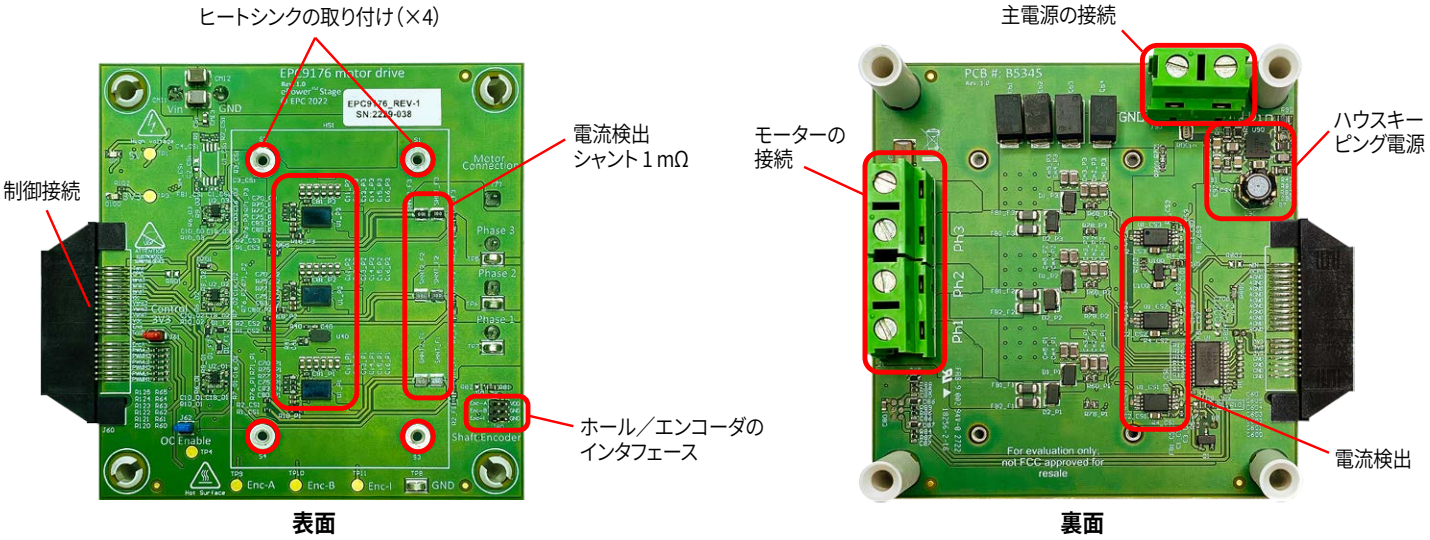


*図1. EPC9176基板の主要な部分を強調した全体写真*

EPC9176には、図2に示す自然対流冷却専用のヒートシンクが装備されています。

ヒートシンクは接地され、露出したピンの導体を備えた他の部品との短絡を防ぐために、絶縁材料の薄い層の上に取り付けられています。この熱伝導材料（TIM：thermal interface material）は、eGaN ICの上に配置され、チップと、取り付けられたヒートシンクとの間の界面の熱コンダクタンスを改善します。この基板に使われているTIMは台湾の**T-グローバルテクノロジー**のP/N：TG-A6200×0.5 mmで、伝導率は6.2 W/m・Kです。

## モーター駆動用インバータ向けのeGaN ICの選択

EPC9176は、3個のeGaN IC（EPC23102）で構成された3相インバータです。

窒化ガリウム・デバイス技術は、非常に高い電子移動度と低い温度係数を備えています。eGaN ICのEPC23102のドレイン-ソース間のオン抵抗$R_{DS(on)}$は標準値で5.2 mΩ（@25°C）です。

加えて、eGaNデバイスの横型構造と、固有のボディ・ダイオードがないことによって、逆導通で動作したときに、非常に小さいゲート電荷$Q_G$で、逆回復電荷$Q_{RR}$がゼロになります。同様の$R_{DS(on)}$のMOSFETと比べると、eGaN FETのスイッチング損失は1/5なので、このインバータは、より高いPWM周波数とより短いデッドタイムで動作できます。

eGaN ICはチップスケール・パッケージ（CSP）封止なので、同じチップ上にハイサイド・デバイスとローサイド・デバイスを備えた共通ソースの寄生インダクタンスと、チップをプリント回路基板に直接はんだ付けすることによるパワー・ループの寄生インダクタンスをほぼゼロにすることができます。実装面積が小さいため、3個のEPC23102を基板の比較的小さな領域に実装して、高い電力密度を実現できます。EPC23102のフットプリントを図3に示します。

## 設計の概要

パワー段のeGaN ICの最大電圧は、ドレイン-ソース間電圧$V_{DS}$ = 100 Vです。dV/dtは、モーター駆動用途向けに最適化されており、10 V/ns以下です。

この電流は、位相シャント抵抗を使って、モーターの位相ごとに双方向で検出されます。シャント抵抗値は1.0 mΩで、シャント両端の電圧降下は、利得50 V/Vで増幅され、1.65 Vのオフセット電圧が追加されます。アンプの帯域幅は400 kHzで、高いスイッチング周波数での正確なモーター制御動作に十分です。位相シャント抵抗全体で増幅された信号を使って、各レッグの過電流を検出し、アナログ回路の保護を迅速に稼働させます。適切なフォールト処理のために、アクティブ・ローの過電流信号（OCPn）もマイクロコントローラのコネクタJ60に送信されます。

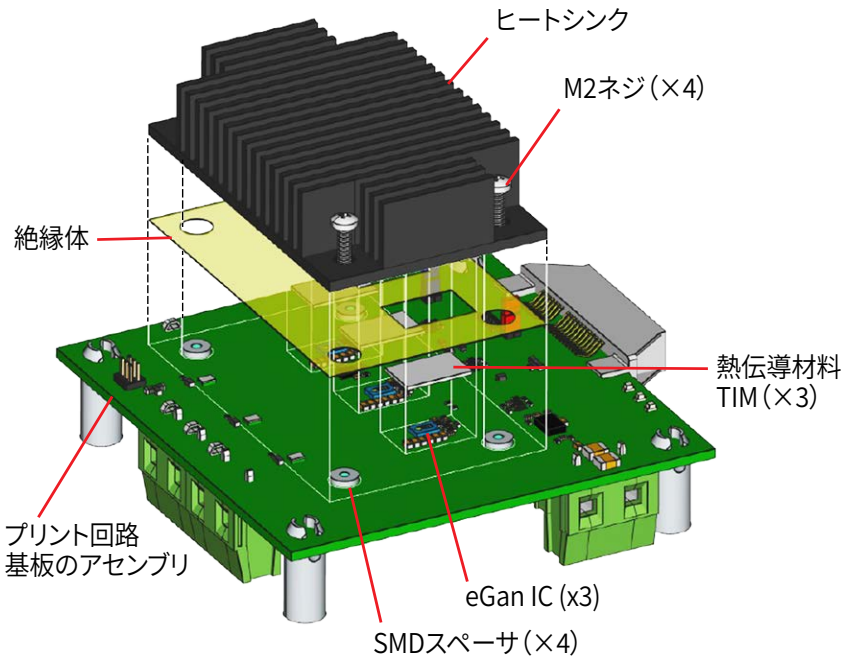


*図2. ヒートシンクの基板への取り付けの詳細*

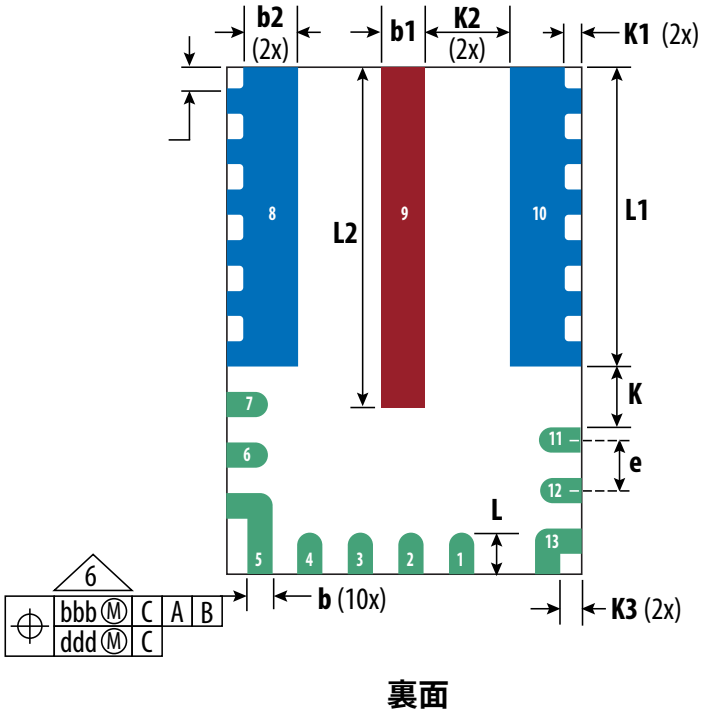


*図 3. EPC23102（eGaN）のパッケージのフットプリントの裏面図*

過電流動作を示すオシロスコープのスナップショットが図4です。緑色のトレースは相電流です；マゼンタ色のトレースは、電流アンプの出力での信号です。過電流回路は一方向で、電流が−32 Aを下回るとトリガーされます。

過電流（OC：overcurrent）検出回路は、32 Aを超える負の電流が3相のいずれかで測定された場合にトリガーされます。この状態では、アクティブ・ローのOCPn信号は、10 msのRC時定数によって決まる短い時間、ローのままになります。OCPn信号は、コネクタJ60を介してマイクロコントローラの専用割り込みピンに送信されます。マイクロコントローラの反応を高速な反応時間で、適切にプログラムできます。

直流電源電圧と各相の電圧は、全利得29.2 mV/Vを生成する抵抗分割ネットワークを使って測定されます。

インバータ基板の温度センサー（U40 – AD590）は、次の式を使って、温度に比例するJ60コネクタの電圧をフィードバックします。

$$T = \left(\frac{V \cdot 1000}{7.87}\right) - 273.15 \ \ [°C] \qquad (1)$$

温度センサーには、EPC23102のパッケージの上部で温度を測定する赤外線カメラを使っています。この関係が図5です。

*図4. 相電流と電流検出信号。電圧のしきい値は正ですが、シャント抵抗のケルビン接続によって、負の電流値で過電流回路がアクティブになることに注意してください。カーソルで測定すると、過電流のしきい値は−32 Aに設定されています。*

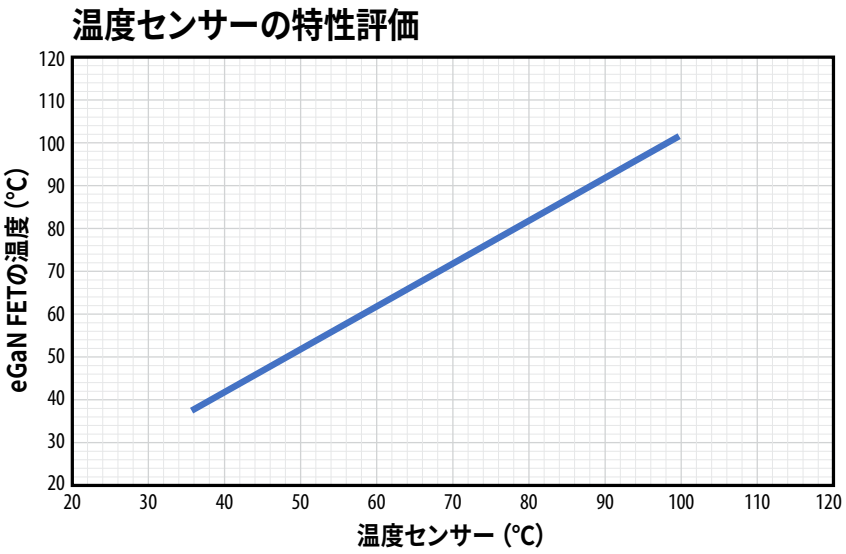


*図5. eGaN ICのパッケージ温度とプリント回路基板の裏面に配置された温度センサーの温度。ヒートシンクなしの自然対流下での動作。*

## 実験的検証

実験的検証のために、パワー基板EPC9176は、3相BLDCモーター駆動用インバータ向けに構成されています。これが最適化されたメイン・モードであるためです。図6に、EPC9176の回路ブロック図を示します。

この基板は、センサーレスまたはセンサー付きモーター制御のいずれにも使えます。

EPC9176は、**EPC9147C**（モーター駆動コントローラのインタフェース基板：スイスのSTマイクロエレクトロニクスのSTM32G431RB Nucleo）と結合され、空間ベクトル・パルス幅変調（SVPWM：space vector pulse width modulation）を備えたセンサーレスFOC（フィールド・オリエンテッド制御）アルゴリズムを使って25.2 Vの掃除機用モーターに電力を供給し制御するように事前にプログラムされています。インバータのスイッチングPWM周波数は80 kHzに設定され、デッドタイムは50 nsです。

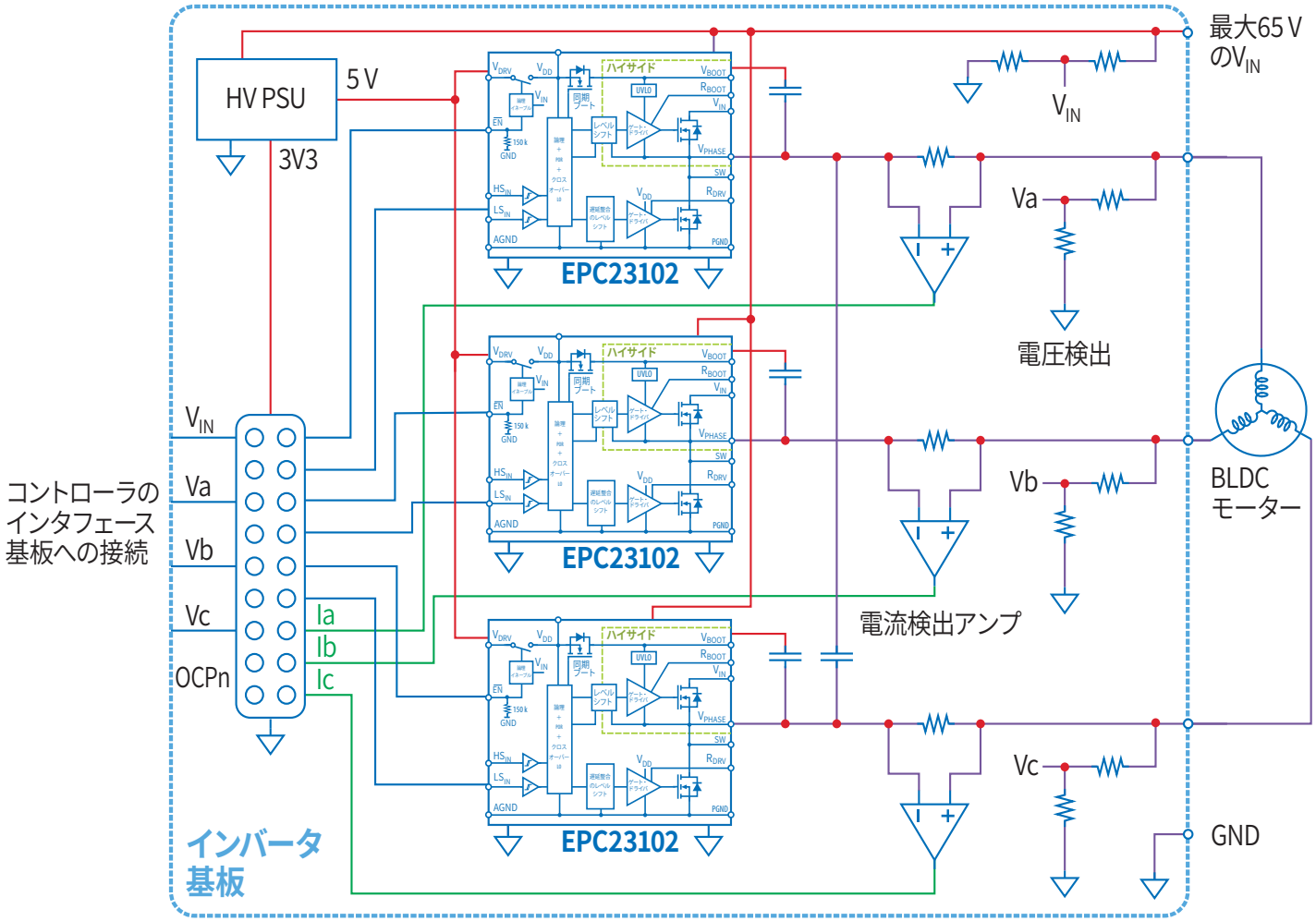


*図6：EPC9176の回路ブロック図*

## 実験的検証（続き）

図7は、50 krpmで動作するモーターの相電流波形です。

インバータの入力電圧リップルは、入力容量とPWM周波数に反比例します。最大入力電圧要件とPWM周波数が与えられると、必要な最小入力容量を決めることができます。ただし、低いPWM周波数（つまり20 kHz）では、電解コンデンサ、またはタンタル・コンデンサを利用する必要があります。

EPC9176の場合、タンタル・コンデンサが使えます。PWM周波数が高くなると、必要な入力容量によって、セラミック・コンデンサを使えます。

80 kHzのPWM周波数では、入力電圧と電流リップルが減少するため、設計者はタンタル・コンデンサを取り除き、セラミック・コンデンサのみで済みます。

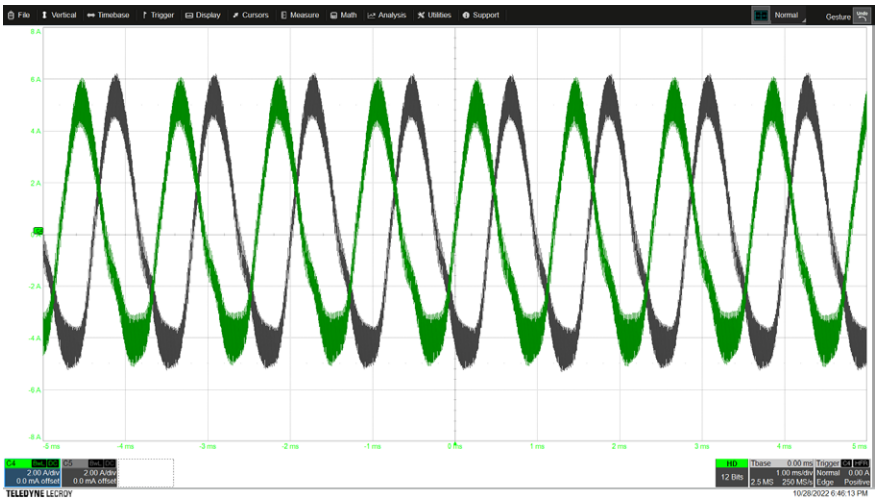


*図7. 50 krpmで動作する掃除機のモーター：に電力を供給するモーターの相電流の測定*

## 結論

EPC9176は48 V入力、400 W出力で、掃除機の用途向けに設計されたeGaN IC（EPC23102）を搭載しています。3相BLDCモーターを高性能で動作させるために必要なすべての回路が統合されています。eGaNの高い電力密度と高い電気伝導率のおかげで、この基板は各レッグで最大18 $A_{RMS}$を供給でき、自然対流の受動ヒートシンクの下で温度上昇を50°C以下に保つことによって、最大250 kHzのPWMスイッチング周波数をサポートします。電流出力波形の品質向上、トルク振動の低減、およびシステム全体の高効率化が実現できるので、モーター駆動システムの性能が向上します。

## 参考文献

[1] EFFICIENT POWER CONVERSION, 2021. [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/schematics/EPC9173_schematic.pdf

[2] EFFICIENT POWER CONVERSION, “Demonstration Board EPC9176 Quick Start Guide,” 2022. [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/guides/EPC9176_qsg.pdf

[3] EFFICIENT POWER CONVERSION, “EPC23102 ePower™ Stage IC” 2022. [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC23102_datasheet.pdf

[4] S. Musumeci, F. Mandrile, V. Barba, M. Palma, “Low-Voltage GaN FETs in Motor Control Application; Issues and Advantages: A Review,” Energies, 2021.

[5] F. Mandrile, S. Musumeci, M. Palma, Dead Time Management in GaN Based Three-Phase Motor Drives, IEEE EPE, 2021.

EPC EFFICIENT POWER CONVERSION

詳細については、
info@epc-co.comに電子メールで、またはお近くの販売代理店にお尋ねください
EPCのウエブサイト：epc-co.com/epc/jp/
bit.ly/EPCupdates に登録すれば、
EPCの最新情報を受信できます。

eGaNは、Efficient Power Conversion Corporation, Inc.の登録商標です