المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly

مبدلات DC-DC في تطبيقات وحدات المعالجة المركزية

يونس علي رحيم
كلية الهندسة-جامعة مصراته، قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، مصراته، ليبيا
b1601025@eng.misuratau.edu.ly

عبدالله سليمان حسين
كلية الهندسة-جامعة مصراته، قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، مصراته، ليبيا
a.hussein@eng.misuratau.edu.ly

الملخص— **نتيجة للتطور السريع في تقنية صناعة الكترونيات القوى والدوائر المتكاملة أمكن تصميم مصادر تغذية قدرة كهربائية بحجم صغير وبكفاءة وموثوقية عاليتين تناسب تطبيقات وحدات المعالجة المركزية في الحواسيب المحمولة والهواتف الذكية. تهدف هذه الورقة لتصميم مبدل DC-DC خافض للجهد لوحدة المعالجة المركزية intel core i7 مشتملة على تصميم مكونات الدائرة ونظام التحكم لتحقيق المواصفات التشغيلية للمعالج. نفذت دائرة مبدل DC-DC في المعمل باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة لإثبات نظرية التصميم.**

الكلمات المفتاحية— **مبدل DC-DC، وحدة المعالجة المركزية، نظام تحكم، تموج الجهد، تموج التيار.**

1. المقدمة

يعود التقدم الكبير في صناعة الأجهزة الإلكترونية المحوسبة بشكل أساسي لظهور وتطور وحدات المعالجة المركزية CPU، إذ أصبح بالإمكان زيادة كثافة المكونات على نفس الشريحة الإلكترونية لتكون قادرة على تنفيذ عمليات حسابية أكثر تعقيدا و بسرعات هائلة. لقد شهدت قدرات و إمكانيات وحدات المعالجة المركزية تطورات كبيرة خلال العشرين عامًا الماضية، فالمعالجات التي كانت مستخدمة في سنة 1995 لا تقارن بمثيلاتها المستخدمة اليوم فقد زادت سرعاتها و زاد استهلاكها للطاقة عند مستوى جهد تغذية أقل (جدول 1). وتزامنا مع هذه المتطلبات برزت الحاجة الى تطوير أنظمة كهربائية عالية الكفاءة وموثوقة لتغذية وحدات المعالجة المركزية [2,1].

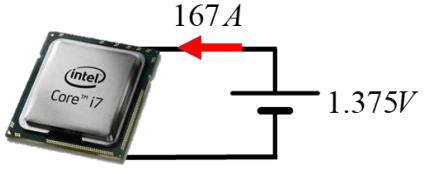
جدول 1. مقارنة بين مواصفات وحدات المعالجة المركزية[2,1]

Intel Core i7 Extreme (الوقت الحاضر)	Intel Pentium 133 (سنة 1995)
3333MHz Clock	133MHz Clock
4.5cm x 4.25cm	4.95cm x 4.95cm
0.8V to 1.375V	3.135V to 3.6V
12 W to 230W	1.7W to 12.24W

بسبب ارتفاع القدرة المستهلكة بواسطة وحدات المعالجة المركزية الحالية وانخفاض جهد التغذية لها، يظهر أن تيار الحمل سيكون كبير (شكل 1).

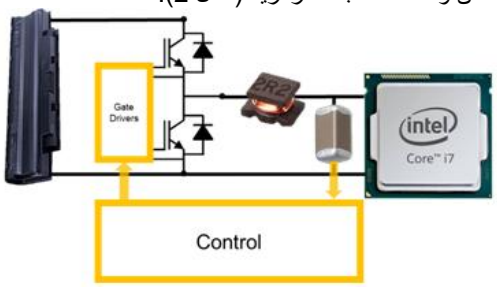
$$\mathbf{I_{CC} = 230/1.375 = 167A} \qquad (1)$$

وهذا يعني في حالة التغذية المباشرة للمعالج كميات أكبر من النحاس في الأسلاك وطبقات اللوحة المطبوعة لتقليل الفقد الاومي وهبوط الجهد، وهذا يتسبب زيادة في الوزن والكلفة وهذا غير مسموح به في تطبيقات الحواسيب المحمولة وأجهزة النقال الذكية.



شكل 1. جهد و تيار المعالج الدقيق

وللإبقاء على مقاومة الدخل للمعالج ومقاومة الموصلات منخفضة يتم استخدام مبدلات DC-DC معتمدة على الكترونيات القوى لها كفاءة وموثوقية عاليتين وصغيرة الحجم، وتوفر تحكم مغلق الحلقة دقيق وتكون قريبة جداً من وحدة المعالجة المركزية (شكل 2).



شكل 2. دائرة تغذية المعالج باستخدام مبدلات القدرة

2. مواصفات و متطلبات التصميم للمعالج intel core i7

لفهم مدى أهمية وحساسية متطلبات التصميم للمعالج intel i7 يمكن الرجوع إلى كتيب مواصفاته [1]، حيث توجد بعض المواصفات الكهربائية يستوجب توفيرها للمعالج من مصدر التغذية الكهربائية:

تنظيم جهد خرج ضيق جداً يصل إلى 5 خانات عشريه بعد الفاصلة وهذا واضح من خلال النظر لجدول العمليات التشغيلية للمعالج (جدول 2)، وهو عبارة عن جزء صغير من جدول مكون من 256 حالة تشغيلية للمعالج. وهذا الأمر مستحيل تحقيقه في حال وجود مقاومة بين المصدر ووحدة المعالجة المركزية.

جدول 2. جزء من جدول الحالات التشغيلية للمعالج[1]

VID 7	VID 6	VID 5	VID 4	VID 3	VID 2	VID 1	VID 0	V_{CC_MAX}
0	0	0	0	0	0	0	0	OFF
0	0	0	0	0	0	0	1	OFF
0	0	0	0	0	0	1	0	1.60000
0	0	0	0	0	0	1	1	1.59375
0	0	0	0	0	1	0	0	1.58750
0	0	0	0	0	1	0	1	1.58125
0	0	0	0	0	1	1	0	1.57500
0	0	0	0	0	1	1	1	1.56875
0	0	0	0	1	0	0	0	1.56250

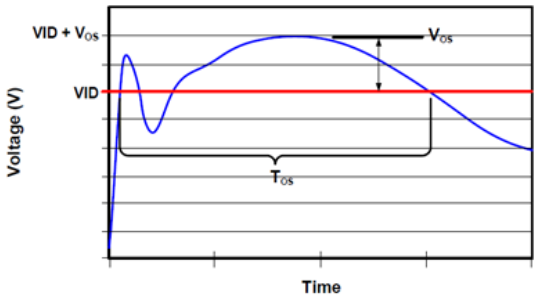
عندما ينتقل المعالج من نقطة تشغيل بتحميل عالي إلى نقطة تشغيلية بتحميل أقل فإنه سيظهر ارتفاع مفاجئ للجهد عن الجهد التشغيلي على أطراف وحدة المعالجة (شكل 3)، ويزداد الأمر سوءًا في حالة وجود محاثة التوصيلات بين المصدر ووحدة المعالجة المركزية. (جدول 3) يوضح قيمة تجاوز الجهد التشغيلي المسموح به V_{OS} و الزمن الذي يستغرقه هذا التجاوز T_{OS} حسب مواصفات وحدة المعالجة المركزية intel core i7.

استلمت الورقة بالكامل في 31 يوليو 2022 وروجعت في 9 اغسطس 2022
وقبلت للنشر في 30 سبتمبر 2022

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 1 ديسمبر 2022.

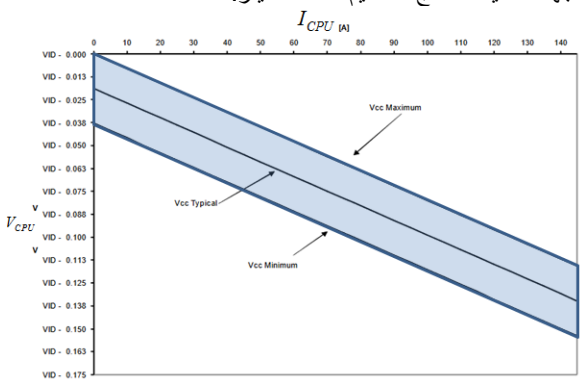
الجدول (3) مواصفات تجاوز جهد التغذية للمعالج[1]

الرمز	الحد الأدنى	الحد الأعلى	الوحدة
V_{OS}	-	50	mV
T_{OS}	-	25	µs



شكل 3. زيادة جهد المعالج فوق جهد التشغيل[1]

مع تغير الحمل فإن مواصفة الجهد والتيار المستمر لمصدر التغذية الكهربائية للمعالج يجب أن تبقى ضمن المنطقة المظللة في حالتي الاستقرار والمرحلة العابرة، وهذا يعتبر تحدي لأن وحدة المعالجة المركزية يتغير سحبها للتيار بصورة مستمرة من مصدر التغذية اعتماداً على نوع العمليات المنجزة. (شكل 4) يوضح المدى المسموح به للتغير في جهد التغذية للمعالج عند قيم مختلفة للتيار.

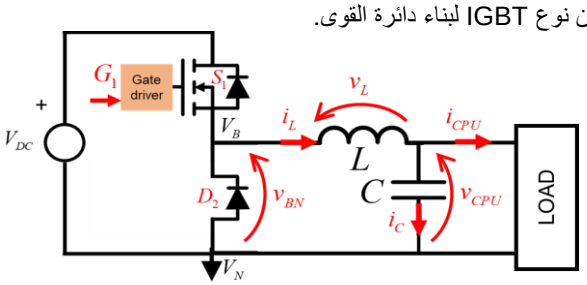


شكل 4. مدى جهود الدخل المسموح بها مع تغير تيار الحمل[1].

كل هذه العوامل والمواصفات يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم مصدر قدرة خاص و دقيق و قابل للتحكم فيه بسهولة لوحدة المعالجة المركزية باستخدام مبدلات DC-DC.

3. تصميم مبدلات DC-DC في تطبيقات وحدة المعالجة المركزية

المبدل المستخدم في هذا التصميم هو مبدل خافض للجهد نوع buck (شكل 5)[4,3]، مع مرشح LC للتخلص من توافقيات التقطيع وتجهيز جهود مستمرة ناعمة لتغذية وحدة المعالجة المركزية. في هذا الجزء سيتم أولا تصميم المرشح في مرحلة التشغيل المستقر للمبدل، وكخطوة نهائية سيتم عمل تمثيل ديناميكي للمبدل يستخدم لأغراض تصميم نظام التحكم. وباعتبار أن المبدل مطلوب أن يكون له استجابة ديناميكية سريعة وحجم فيزيائي صغير عليه فإن المبدل صمم للعمل عند تردد تقطيع عالي حوالي f_s=200kHz، وبالتالي استخدم ترانزستور قوى نوع MOSFET بدلاً من نوع IGBT لبناء دائرة القوى.



شكل 5. مبدل خافض للجهد مع مرشح.

قيم الملف L والمكثف C للمرشح تعطى كالتالي [4,3]:

$$L = V_{DC}(1-D)D\frac{T_s}{\Delta i_L} \quad (2)$$

$$C = \frac{T_s \Delta i_L}{8\Delta V} \quad (3)$$

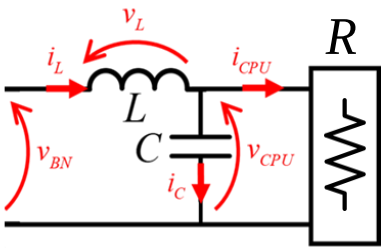
بداية نحتاج لاختيار قيم تموج التيار Δi_L وتموج الجهد ΔV، وتعتبر ΔV لها أهمية أكبر في تصميم مصادر القدرة. بالرجوع إلى متطلبات حالة الاستقرار للمعالج intel i7 (شكل 4)[1]، يتبين أن أعلى تموج مسموح به هو:

$$\Delta V_{\max} = 0.038V \quad (4)$$

يجب أن لا يتعدى التموج هذه القيمة حتى عند الحالة العابرة ، لكن استجابة الحالة العابرة في البداية يعتمد على تصميم المتحكم ونحن لانعلم بعد كيف ستكون استجابة المتحكم، ولذلك سنفرض مبدئيا أن أقصى تموج مسموح به هو:

$$\Delta V = 0.05 \times \Delta V_{\max} = 2mV \quad (5)$$

بقي أن نختار قيمة التموج في تيار الملف حيث نلاحظ ان نقصان قيمة التموج في التيار يعني زيادة قيمة المحاثة و نقصان قيمة المتسعة لنفس التموج في الجهد، لكن قيمة التموج في تيار الملف ليس بأهمية التموج في الجهد، لنبدأ بمعادلة الانتقال للمرشح المنخفض (شكل 6).



شكل 6. مرشح امرار واطئ نوع LC

$$\frac{V_{CPU}}{V_{BN}} = \frac{Z_C/R}{Z_C/R + Z_L} \quad (6)$$

حيث Z_L هي معاوقة الملف و Z_C معاوقة المكثف و R هي مقاومة الحمل.

$$\frac{V_{CPU}}{V_{BN}} = \frac{1}{s^2LC + s\frac{L}{R} + 1} \quad (7)$$

يمكننا وضع المعادلة (7) في الصور العامة كالتالي:

$$\frac{V_{CPU}}{V_{BN}} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + s\frac{L}{R}\frac{1}{LC} + \frac{1}{LC}} \rightarrow \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2s\zeta\omega_n + \omega_n} \quad (8)$$

حيث ζ و ω_n هما معامل الإخماد للمرشح و التردد الطبيعي على التوالي و يمكن حسابهما كالتالي:

$$\zeta = \frac{1}{2}\frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

وبالتعويض بقيم الملف والمكثف في المعادلة (9)، (10) ينتج لدينا المعادلات التالية:

$$\zeta = \frac{1}{2}\frac{1}{R}\frac{1}{\Delta i_L}\sqrt{V_{BN}(1-D)D * 8\Delta V} \quad (11)$$

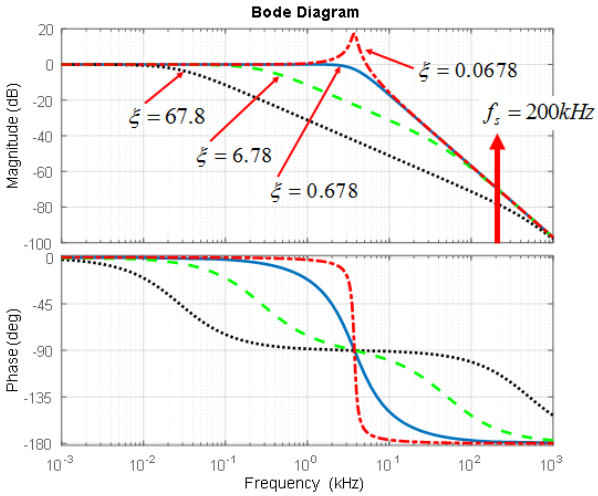
$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{\frac{V_{BN}(1-D)DT_s^2}{8\Delta V}}} \quad (12)$$

من المعادلتين (11)، (12) يتضح أن التردد الطبيعي يعتمد على مقدار تموج الجهد فقط أما معامل الإخماد فهو دالة في تموج تيار الملف، واختيار قيمة تموج صغيرة سيؤدي الى قيمة إخماد أكبر من الواحد و سيكون لدينا قطبان حقيقيان أحدهما أكبر من التردد الطبيعي $\boldsymbol{\omega_n}$ والآخر سيكون أصغر منه، وهذا سيؤدي الى زيادة حجم المرشح لترشيح التوافقيات وسيكون تصميمه أكثر صعوبة، ولذلك فعادة مايتم اختيار معامل الإخماد ليكون أصغر من الواحد أو أكبر منه بقليل.

وبتصميم مبدل DC-DC للمعالج intel i7 بالمواصفات التالية: جهد الدخل 5V وجهد الخرج 1.375V و تردد قطع 200KHz، يمكن حساب التردد الطبيعي كالتالي:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{\frac{V_{BN}(1-D)DT_S^2}{8 * \Delta V}}} = 25.33k\frac{rad}{s} \qquad (13)$$

إن اختيار قيم منخفضة لتموج التيار سيؤدي الى قيم كبيرة لمعامل التخميد وهذا سيجعل المرشح كبير الحجم ومعقد وصعب التصميم، نستطيع اختبار الاستجابة الترددية للمرشح عند قيم مختلفة لقيمة تموج التيار، وهي على سبيل المثال $\Delta i_L = 0.01A, 0.1A, 1A, 10A$ وبتثبيت قيم التردد الطبيعي نتحصل على قيم مختلفة لمعامل الإخماد (شكل 7)، حيث أنه كلما كان معامل الإخماد أقرب للواحد كانت الاستجابة أسرع نستنتج أنه يجب اختيار معامل إخماد المرشح بقيمة $\zeta = 0.678$ والتي تقابل $\Delta i_L = 1A$ ليعطينا توازنا جيداً بين معامل التخميد و التموج في التيار.



شكل 7. الاستجابة الترددية لقيم مختلفة لمعامل الإخماد

من المعادلات السابقة يمكننا حساب قيم دورة الخدمة والمحاثة وسعة المكثف كالتالي:

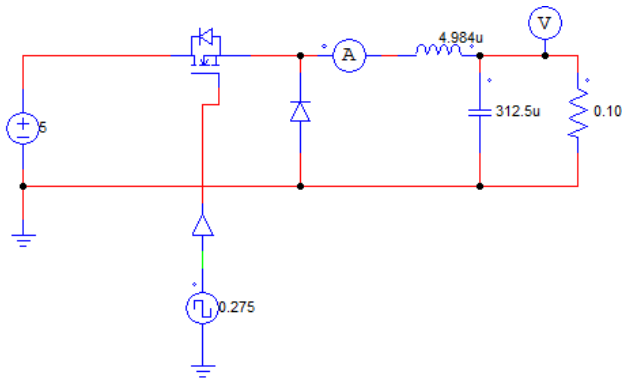
$$\boldsymbol{D = \frac{V_{CPU}}{V_{DC}} = 0.275} \qquad (14)$$

$$\boldsymbol{L = V_{DC}(1-D)D\frac{T_s}{\Delta i_L} = 4.984\mu H} \qquad (15)$$

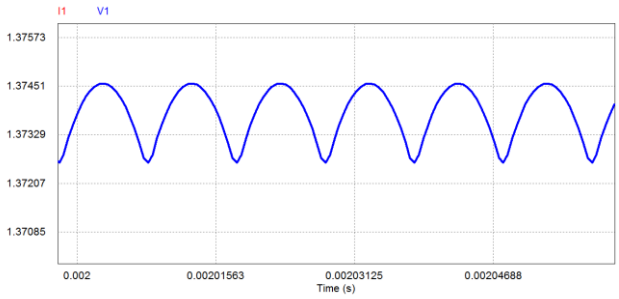
$$\boldsymbol{C = \frac{T_S \Delta i_L}{8\Delta V} = 312.5\mu F} \qquad (16)$$

استخدمت قيم التصميم في المحاكاة باستخدام برنامج PSIM (شكل 8)، وأوضحت النتائج أن موجة جهد الخرج للمبدل بقيمة متوسطة 1.364V وتموج قدره 1.5mV (شكل 9) تلبي متطلبات التصميم للمعالج من حيث تموج الجهد المسموح به في حالة الاستقرار (أقل من 2mV).

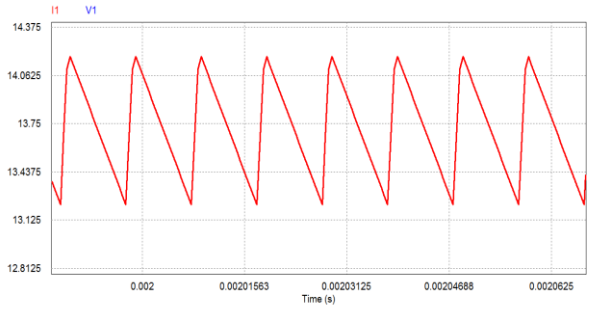
(شكل 10) يبين تيار الملف المتحصل عليه بتموج مقداره 0.98A بحيث يضمن التصميم توازن بين إخماد جيد للتوافقيات وحجم مناسب للملف.



شكل 8. محاكاة دائرة مبدل DC-DC مع المعالج



شكل 9. موجة جهد الخرج للمبدل



شكل 10. موجة تيار الملف

عند انتقال المعالج بين مستويات مختلفة من التحميل أثناء التشغيل يظهر ارتفاع مفاجئ للجهد على أطراف وحدة المعالجة، و لإبقاء جهد المعالج أثناء هذه الفترة العابرة ضمن المدى المسموح به نحتاج أن يكون للمغير استجابة سريعة جدا و هذا الأمر لا يمكن تحقيقه إلا باستخدام المتحكم.

لدينا دالة الانتقال للنظام (مبدل DC-DC) من دون متحكم كالتالي[5,4]:

$$G(s) = \frac{6.42 \times 10^8}{s^2 + 32000s + 6.42 \times 10^8} \qquad (17)$$

يتم التحكم في قيمة كل من معامل التخميد والتردد الطبيعي عن طريق تصميم متحكم لديه أصفار مساوية لأقطاب النظام الذي نريد التحكم به وبالتالي سينتج لنا دالة حلقة مفتوحة من الدرجة الثانية يسهل التحكم في استجابتها للحالة العابرة. سنتحكم في سرعة الاستجابة عن طريق التحكم في التردد الطبيعي لدالة الحلقة المغلقة و نتحكم في نسبة الصعود عن طريق تغيير قيمة معامل التخميد و تكون دالة الانتقال للمتحكم كالتالي:

$$G_c = \frac{K(s^2 + As + B)}{s(s + C)} \qquad (18)$$

حسب مواصفات المعالج intel core i7 يجب ألا يتجاوز ارتفاع الجهد 50mV حتى لا يحدث عطب لوحدة المعالجة المركزية في حال كانت قيمته عالية، و بناء على هذا فإن قيمة معامل التخميد ستحسب كالتالي :

$$M_p = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \qquad (19)$$

حيث Mp: أقصى ارتفاع في الجهد عن الجهد التشغيلي.

وبناء على المعطيات السابقة نتحصل على معامل إخماد بقيمة 0.7، أما التردد الطبيعي فسنختاره ليعطينا زمن استقرار مقداره 50µs وذلك حسب مواصفات المعالج. يمكن حساب التردد الطبيعي من خلال المعادلة التالية:

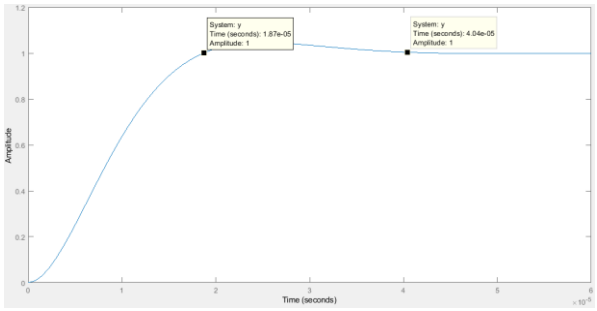
$$T = \frac{2\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} = 50\mu s \qquad (20)$$

حيث T: الزمن الدوري.

مما سبق نتحصل على دالة انتقال المتحكم كالتالي:

$$G_c(s) = \frac{9.636 * (s^2 + 31768.86s + 6.42 * 10^8)}{s(s + 246225.25)} \qquad (21)$$

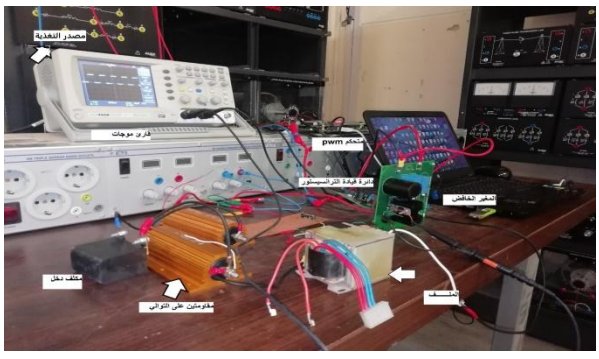
(شكل 11) يبين استجابة نظام الحلقة المغلقة لدالة الخطوة والتي يحافظ فيها المتحكم على مستويات آمنة لجهد التغذية وزمن وصول الجهد للاستقرار، وهذا يضمن استجابة سريعة لمصدر التغذية للتغير في الحمل ويطيل من عمر وحدة المعالجة المركزية.



شكل 11. استجابة نظام الحلقة المغلقة لدالة الخطوة

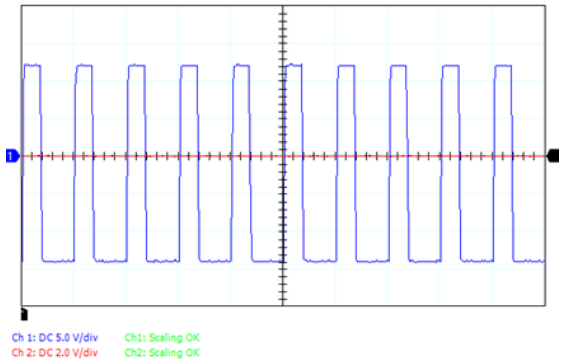
4. التطبيق العملي

لإثبات النظرية العلمية لعمل مبدل DC-DC باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة، تم تنفيذ هذه الدائرة عملياً باستخدام دائرة المبدل الخافض (شكل 12) ووضعها تحت الاختبار. رغم اقتصار الجزء العملي في هذا البحث على الدائرة المفتوحة إلا انه تم تنفيذ دائرة القدرة والتحكم لمصدر تغذية المعالج وما ترتب عنه من اختبارات لوحدة التحكم في الحصول على إشارات تحكم بفترات خدمة مختلفة وكذلك تشغيل دائرة القيادة للمواءمة بين وحدة التحكم ودائرة القدرة للمبدل.

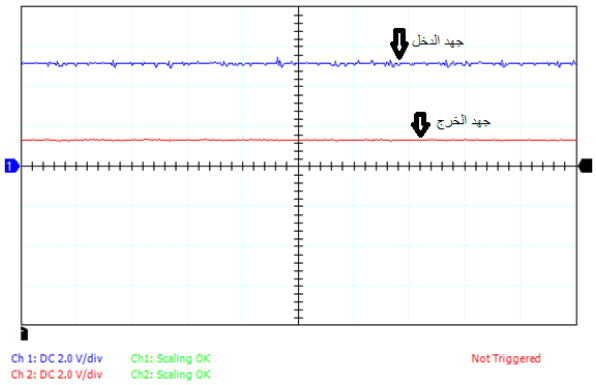


شكل 12. الدائرة العملية

يوضح (شكل 13) إشارة التضمين النبضي لقيادة ترانزستور MOSFET بدورة خدمة تساوي 40%. عملياً تم الحصول على جهد خرج المبدل المطلوب لتغذية المعالج بجهد 1.37V (شكل 14) عند دورة خدمة 40% مقارنة بقيمتها النظرية والتي تساوي 27% وذلك بسبب هبوط الجهد عبر أشباه الموصلات و أسلاك التوصيل والملفات.



شكل 13. إشارة قيادة الترانزستور بدورة خدمة 0.4



شكل 14. موجة جهد الدخل والخرج للمبدل

5. الإستنتاجات

التطور السريع في تقنية صناعة أشباه الموصلات والدوائر المتكاملة تمكن من تصميم مصادر تغذية بترددات عالية جدا وبالتالي التقليل من حجم المعدة وبكفاءة عالية وهذا يناسب التطبيقات المتنقلة الحديثة مثل الهواتف الذكية والحواسيب المحمولة.

لتحقيق متطلبات ومواصفات المعالج الدقيق intel core i7 في الحالة المستقرة والعابرة استوجب ذلك دراسة تصميمية شاملة للمكونات والتحكم في ذات الوقت، حيث أمكن تحقيق بعض المتطلبات بتصميم المكونات الصلبة وبعضها الآخر عن طريق تصميم نظام التحكم.

المراجع

[1] Intel corporation. 2010. Intel® Core™ i7-900 Desktop Processor Extreme Edition Series and Intel® Core™ i7-900 Desktop Processor Series.

[2] Alessandro Costabeber. 2019. Power Electronic Applications and Control, H63EEG module.

[3] Dragan Maksimovic, Robert Erickson, 2005, Fundamentals of *Power Electronics*, 2nd ed.: Springer.

[4] Venable Technical Paper #3, Optimum feedback amplifier design for control systems.

[5] Sonali Pandit ,V.N.Shet. 2020. controller design and analysis for a buck converter, ITEE journal