

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم النظم الالكترونية والميكانيكية

تقرير ورشة الالكترونيات للسنة الرابعة - نظم الكترونية

العام الدراسي 2021-2022

دائرة قيادة محرك خطوي

Stepper Motor Drive

إعداد

لونا سلامة

زيد ناصر

إشراف

م. ماهر الحمصي

م. علي العباس

ما. محبوب ضاهر

دمشق 4 نيسان 2022

المحتويات

6.....	ملخص	
7.....	المحرك الخطوي (Stepper Motor)	1
7.....	مكونات المحرك الخطوي	1.1
7.....	أنواع المحرك الخطوي	1.2
9.....	طرائق قيادة المحركات الخطوية	2
9.....	أحادية القطبية (Unipolar control)	2.1
9.....	آلية التحكم	2.1.1.
11.....	تحليل دائرة التحكم	2.1.2
15.....	ثنائي القطبية Bipolar control	2.2
15.....	آلية التحكم	2.2.1
16.....	تحليل الدارة	2.2.2
21.....	دفتر الشروط	3
21.....	المخطط الصندوقي	4
22.....	أجزاء دائرة القيادة	5
22.....	التغذية السالبة والموجبة	5.1
22.....	التغذية السالبة	5.1.1
25.....	مضخم push-pull من الصنف AB	
25.....	دائرة استعادة DC	
26.....	دائرة ملاحقة قمم سالبة	
27.....	التغذية الموجبة	5.1.2
28.....	توليد إشارة القيادة	5.2
28.....	توليد إشارتي دخل بفرق صفحة 90 (Phase Shifter)	5.2.1.
29.....	تعديل مطال إشارة القيادة	5.2.2
30.....	التحكم بجهة الدوران	5.2.3
32.....	Voltage to frequency circuit	5.3
32.....	تحليل الدارة	5.3.1
34.....	تعديل عرض ومطال خرج دائرة VTF	5.3.2.
35.....	تصميم عناصر دائرة Voltage to frequency	5.3.3
37.....	مولد الإشارة المثلثية (Wave Form Generator)	5.4
37.....	مبدأ عمل الدارة:	
37.....	تحليل الدارة:	5.4.1
38.....	تصميم الدارة:	5.4.2

39.....	توليد إشارات PWM	5.5.
40.....	تصحيح التيار	≈6
40.....	نموذج المحرك:	6.1.
41.....	حلقة التحكم.	6.2.
41.....	ربح جسر القيادة K	6.2.1.
43.....	تصميم قانس تيار (Current Measurements)	6.2.2.
46.....	تصميم المصحح PI	≈6.3
46.....	دائرة المصحح	6.3.1.
47.....	تصميم عناصر دائرة المصحح	6.3.2.
51.....	التطبيق العملي	≈7
51.....	دائرة التغذية السالبة والموجبة	≈7.1
51.....	دائرة الإشارة المثلثية.	7.2.
52.....	دائرة voltage to frequency	7.3.
53.....	إشارتي القيادة المرجعيتين المترابعتين.	7.4.
53.....	الحلقة المفتوحة	7.5.
55.....	الحلقة المغلقة:	≈7.6
56.....	الخاتمة	
57.....	مراجع	

7	Figure 1 المحرك الخطوي ذو المغناطيس الدائم
8	Figure 2 المحرك الخطوي ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة
8	Figure 3 المحرك الخطوي الهجين
9	Figure 4 القيادة بطريقة أحادية القطبية
9	Figure 5 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم A1
10	Figure 6 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم B1
10	Figure 7 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم A2
11	Figure 8 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم B2
11	Figure 9 نمذجة دائرة التحكم لنصف وشيعة
12	Figure 10 نموذج الدارة بحالة تفعيل إشارة التحكم
12	Figure 11 نموذج الدارة بحالة إلغاء تفعيل إشارة التحكم
14	Figure 12 التيار المار في الوشيعة
14	Figure 13 تيار الترانزستور (الأحمر)، تيار الديود (الأزرق)
15	Figure 14 القيادة بطريقة ثنائي القطبية
16	Figure 15 تسلسل إشارات التحكم
16	Figure 16 نمذجة دائرة التحكم لنصف الوشيعة
17	Figure 17 نمذجة المرحلة الأولى
17	Figure 18 نمذجة المرحلة الثانية
18	Figure 19 نمذجة المرحلة الثالثة
19	Figure 20 نمذجة المرحلة الرابعة
19	Figure 21 التيار المار في الوشيعة
20	Figure 22 تيار الديود D2,D3 (الأزرق)، تيار الترانزستور Q8,Q9 (الأخضر)، تيار الديود D1,D4 (الأصفر)، تيار الترانزستور Q10,Q7 (الأحمر)
20	Figure 23 الجهد المطبق بين طرفي الوشيعة
22	Figure 24 المخطط الصندوقي للتغذية السالبة
22	Figure 25 نمذجة دائرة التغذية السالبة
23	Figure 26 دائرة 555 كفادح مهتز
24	Figure 27 جزء شحن وتفريغ المكثف C
25	Figure 28 مضخم Push Pull
25	Figure 29 دائرة استعادة DC
26	Figure 30 دائرة ملاحقة قمم
27	Figure 31 خرج دائرة التغذية السالبة
27	Figure 32 دائرة المنظم
28	Figure 33 دائرة توليد فرق الطور
29	Figure 34 إشارة الساعة
29	Figure 35 خرج القلابين
29	Figure 36 دائرة تعديل مطال الإشارة المرجعية
31	Figure 37 نمذجة الجسر مع القلابين ومفتاح تغيير الجهة
31	Figure 38 الإشارتين المترابعتين
32	Figure 39 دائرة voltage to frequency
34	Figure 40 خرج دائرة voltage to frequency
35	Figure 41 دائرة Voltage to frequency بعد التعديل

37	.....	42 Figure	دائرة توليد إشارة مثلثية
38	.....	43 Figure	خرج دائرة مولد الإشارة المثلثية
39	.....	44 Figure	مولد إشارة PWM
40	.....	45 Figure	نموذج المحرك الخطوي
41	.....	46 Figure	حلقة التحكم بالتيار
41	.....	47 Figure	المخطط الصندوقي لـ PWM
42	.....	48 Figure	الإشارة المثلثية والإشارة المرجعية
43	.....	49 Figure	وصل دائرة قانس التيار مع الحمل
44	.....	50 Figure	دائرة قانس التيار
45	.....	51 Figure	دائرة القانس بعد إضافة الـ Buffers
45	.....	52 Figure	تطبيق دائرة القانس لقياس تيار الجسر
46	.....	53 Figure	دائرة المصحح
48	.....	54 Figure	استجابة النظام بعد التصحيح لدخل خطوي
48	.....	55 Figure	مخطط بود للنظام بعد التصحيح
49	.....	56 Figure	خرج المصحح (الأزرق), إشارة الدخل (الأصفر), خرج النظام (الأحمر)
49	.....	57 Figure	خرج المصحح (الأزرق), إشارة الدخل (الأصفر), خرج النظام (الأحمر)
50	.....	58 Figure	استجابة التيار
50	.....	59 Figure	خرج المصحح (command)
51	.....	60 Figure	إشارتي التغذية السالبة والموجبة
51	.....	61 Figure	الإشارة المثلثية
52	.....	62 Figure	إشارة الـ voltage to frequency
52	.....	63 Figure	منحني جهد الدخل بدلالة تردد الخرج
53	.....	64 Figure	إشارتي القيادة
53	.....	65 Figure	إشارتي القيادة المحملتان بنبضات PWM
54	.....	66 Figure	استجابة التيار من أجل تردد HZ 32.4
54	.....	67 Figure	استجابة التيار من أجل تردد HZ 85

ملخص

خلال هذا المشروع تم تصميم وتنفيذ دارة قيادة لمحرك خطوي هجين ثنائي الطور Hybrid Stepper Motor من نوع 42BYGH801 لتدوير المحرك بسرعات مختلفة تصل إلى 300 RPM. تضمن تصميم الدارة دراسة تقنيات القيادة الخاصة بالمحركات الخطوية واختيار الطريقة الأمثل لقيادة المحرك. بدايةً تم قيادة المحرك بالحلقة المفتوحة بتوليد إشارات مرجعية ومقارنتها مع إشارة مثلثية لتعطي نبضات PWM التي تفعل جسر القيادة لنحصل على دوران مستمر للمحرك. ثم تم التحكم باستجابة التيار باستخدام مصحح PI بالحلقة المغلقة لتحقيق دوران مستمر للمحرك من أجل سرعات عالية.

1. المحرك الخطوي (Stepper Motor)

المحرك الخطوي هو نظام كهروميكانيكي يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية عن طريق تدوير محور المحرك. يتميز المحرك الخطوي عن باقي المحركات بأن دورته مقسمة إلى خطوات ويمكن للمحرك أن يستقر على أي خطوة بدون تغذية راجعة في حال استخدامه في التطبيق المناسب (يمكن أن يكون العزم الذي يقدمه المحرك لا يكفي لتدوير المحور وبالتالي يتم احتساب الخطوات ولكن في الحقيقة المحرك لا يدور).

1.1 مكونات المحرك الخطوي

يوجد عدة أنواع للمحرك الخطوي لكن تشترك جميعها في هذه الأجزاء:

- 1- الدائر (Rotor): هو الجزء الذي يدور من المحرك وعليه يُثبت محور المحرك الذي يحمل الأحمال الميكانيكية.
- 2- الثابت (Stator): هو الجزء الثابت من المحرك ويحتوي الوشائع والأسلاك التي يتم تغذية المحرك من خلالها. عدد الوشائع المستخدمة في الثابت يتبع لنوع التطبيق (أحادي الطور، ثنائي الطور، ثلاثي الطور).

1.2 أنواع المحرك الخطوي

تصنف المحركات الخطوية من ناحية طريقة التصنيع إلى ثلاث مكونات أساسية:

- 1- المحرك الخطوي ذو المغناطيس الدائم (The Permanent Magnet)
في هذا النوع من المحركات يكون الدائر عبارة عن مغناطيس دائم بينما يتكون الثابت من مادة فيرو مغناطيسية تتوضع ضمنها نواقل. ينتج الدوران عن طريق تفاعل الحقل المغناطيسي الدائم للدائر مع الحقل المغناطيسي المتولد من تغذية نواقل الثابت. يتميز هذا النوع من المحركات بعزم دوران كبير مقارنة بالمحركات ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة ولكن هذا النوع من المحركات محدود من حيث عدد الخطوات الممكنة في الدورة.

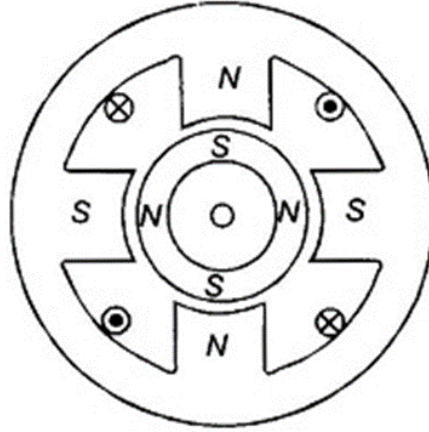


Figure 1 المحرك الخطوي ذو المغناطيس الدائم

2- المحرك الخطوي ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة (The Variable Reluctance)

يتكون الدائر من مادة فيرو مغناطيسية مصممة على شكل أسنان. يتكون الثابت من مادة فيرو مغناطيسية أيضاً مصممة على شكل أسنان على السطح الداخلي ويتم لف الوشائع حول أسنان الثابت. ينتج دوران المحرك من توضع الدائر بحيث تكون المقاومة المغناطيسية لتدفق حقل الثابت المغناطيسي عبره أقل ما يمكن بالتالي بتفعيل وشائع الثابت بتسلسل معين نحصل على دوران مستمر.

يتميز هذا النوع من المحركات بخطوة صغيرة ودقيقة لكن عزم الدوران صغير مقارنة بباقي الأنواع لكونه يعتمد على حقل مغناطيسي وحيد (حقل الثابت).

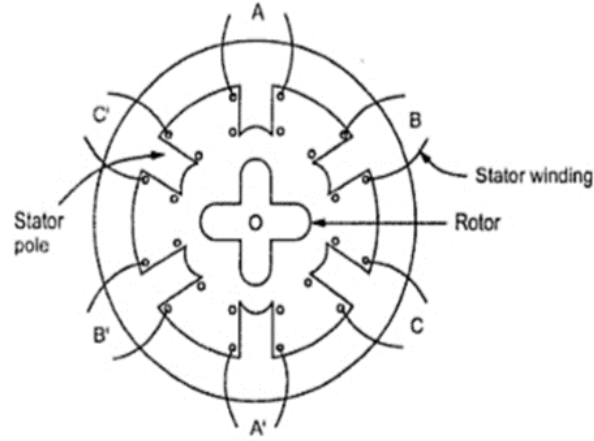


Figure 2 المحرك الخطوي ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة

3- المحرك الخطوي الهجين (The Hybrid):

هذا النوع من المحركات يعتمد على مبدأ عمل كل من المحركات ذو المغناطيس الدائم والمحركات ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة للحصول على عزم كبير بالإضافة لخطوة صغيرة ودقيقة. في هذا النوع من المحركات يكون الدائر عبارة عن مغناطيس دائم أسطواناني يتوضع ضمن أسطوانة مسننة. يتكون الثابت من مادة فيرو مغناطيسية أيضاً مصممة على شكل أسنان على السطح الداخلي. عند تغذية وشائع الثابت ينتج أقطاب مغناطيسية وكون الثابت عبارة عن مغناطيس دائم بالتالي تتوضع كل من أسنان الثابت والدائر بحيث تحقق أقل مقاومة مغناطيسية بين الأقطاب المتعاكسة وأكبر مقاومة مغناطيسية بين الأقطاب المتشابهة.

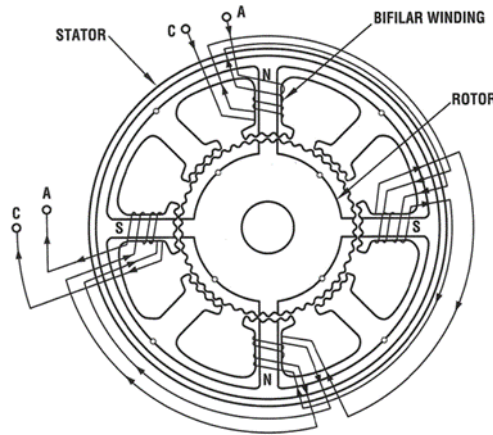


Figure 3 المحرك الخطوي الهجين

كما يتم تصنيف المحركات الخطوية تبعاً لكيفية إتاحة أطراف النواقل للمستخدم إلى:

- 1- ثنائية القطبية (Bipolar): يُتاح للمستخدم طرفي كل ناقل.
- 2- أحادي القطبية (Unipolar): يُتاح للمستخدم طرفي كل ناقل بالإضافة لنقطة الوسط.

2. طرائق قيادة المحركات الخطوية

المحرك الذي تم استخدامه في دراستنا من نوع Unipolar Hybrid Stepper Moto ثنائي الطور بالتالي يمكن التحكم به إما كأحادي قطبية أو كثنائي قطبية.

2.1. أحادية القطبية (Unipolar control)

2.1.1. آلية التحكم

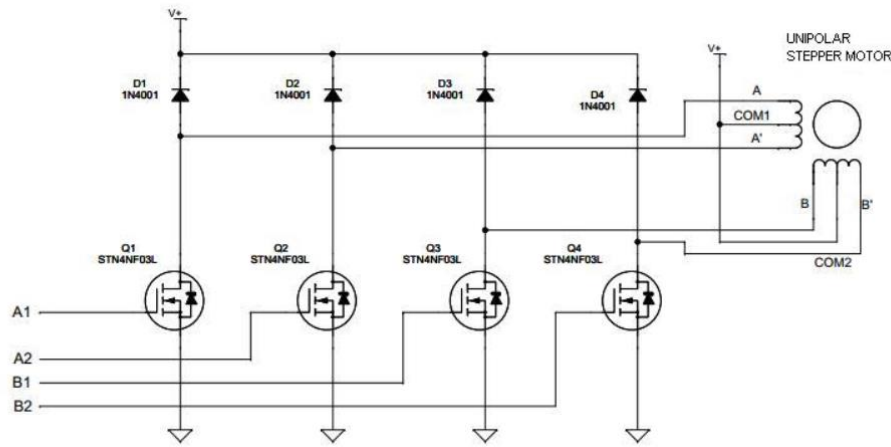


Figure 4 القيادة بطريقة أحادية القطبية

يتم وصل نقطة المنتصف لكل من الوشيعتين إلى V_+ ووصل النقاط A, A', B, B' إلى الأرضي مع قواطع هي الترانزستورات $Q1, Q2, Q3, Q4$ على الترتيب. وتم إضافة كل من الديودات $D1, D2, D3, D4$ كدولاب حر في حال تم فتح القاطعة ولم ينعلم تيار الوشيعية بعد.

لنفترض أنه في البداية تم تفعيل إشارة التحكم $A1$ عندها سيمر التيار من $COM1$ إلى A مولداً حقلاً مغناطيسياً كما في الشكل:

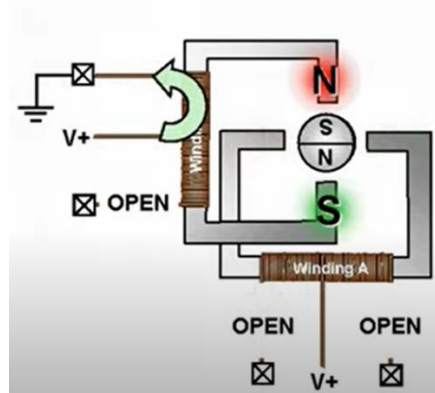


Figure 5 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم $A1$

نتيجة لهذا الحقل يدور الدائر لوضع الاستقرار الذي يفرضه حقل الثابت.

ثم يتم إلغاء تفعيل إشارة التحكم A1 وتفعيل إشارة التحكم B1 عندها يمر التيار من COM2 إلى B مولداً حقلاً مغناطيسياً كما في الشكل:

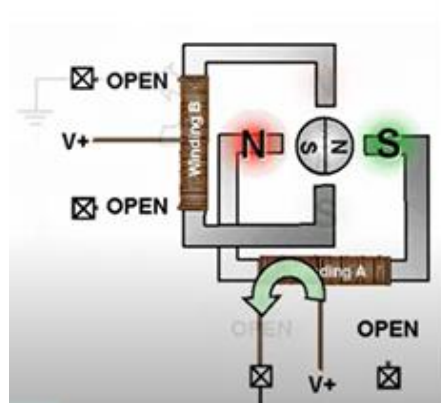


Figure 6 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم B1

نتيجة للحقل الجديد للثابت يدور الدائر 90° عكس عقارب الساعة.

بنفس الطريقة يتم إلغاء تفعيل إشارة التحكم B1 وتفعيل إشارة التحكم A2 ليتولد حقل مغناطيسي ناتج عن مرور التيار من COM1 إلى A' مسبباً دوران المحرك 90° أخرى عكس عقارب الساعة.

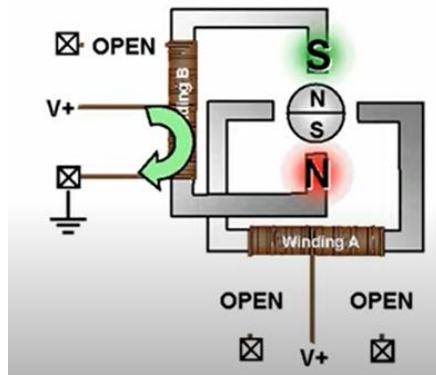


Figure 7 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم A2

أخيراً بإلغاء تفعيل إشارة التحكم A2 وتفعيل إشارة التحكم B2 ليتولد حقل مغناطيسي ناتج عن مرور التيار من COM2 إلى B' مسبباً دوران المحرك 90° أخرى عكس عقارب الساعة.

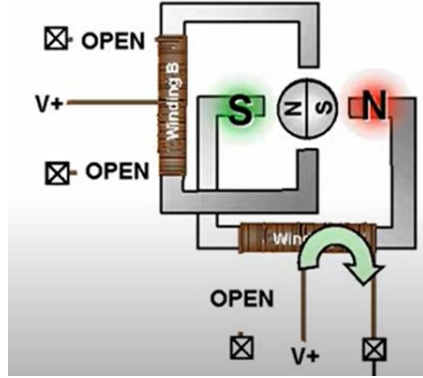


Figure 8 توضع الأقطاب بحالة تفعيل إشارة التحكم B2

بالتالي بترتيب تفعيل إشارات التحكم بالشكل الصحيح نضمن دوران مستمر للمحرك حيث يتم عند كل تغيير لإشارة التحكم تغيير الحقل المغناطيسي للثابت ويقوم الدائر بملاحقته وبذلك نحصل على دوران المحرك.

لتغيير جهة دوران المحرك علينا فقط أن نقوم بتغيير تسلسل إشارات التحكم:

دوران عكس عقارب الساعة $A1, B1, A2, B2, A1, \dots$

دوران مع عقارب الساعة $A1, B2, A2, B1, A1, \dots$

ليس من الضروري أن نبدأ دائماً من $A1$ حيث نستطيع أن نبدأ من أي إشارة تحكم ضمن السلسلة بشرط أن نكمل السلسلة بدءاً من الإشارة المختارة مثلاً كل من السلاسل التالية تؤمن دوران مع عقارب الساعة:

$B1, A2, B2, A1, B1, \dots$

$A2, B2, A1, B1, A2, \dots$

$B2, A1, B1, A2, B2, \dots$

2. 1. 2. تحليل دائرة التحكم

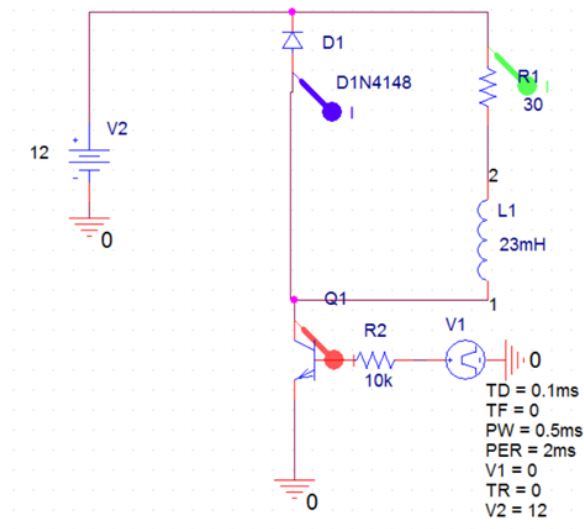


Figure 9 نمذجة دائرة التحكم لنصف وشيعة

تم العمل على محرك مقاومة ملفات الثابت له $R_1 = 30 \Omega$ وذاتية ملفاته $L_1 = 23 \text{ mH}$. وتم نمذجة إشارة التحكم بمولد نبضات مربعة.

خلال فترة تطبيق إشارة تحكم يكون الترانزستور الموافق للإشارة المفعلة في النمط ON والديود الموافق لهذه الإشارة في النمط OFF بالتالي تكون الدارة المكافئة:

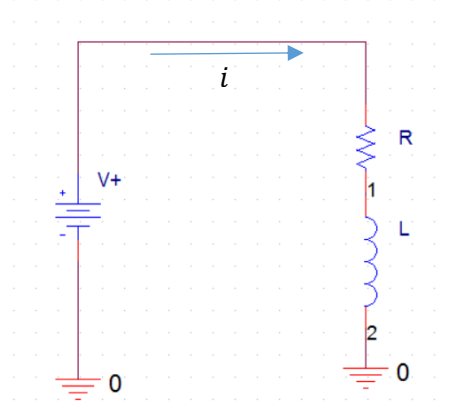


Figure 10 نموذج الدارة بحالة تفعيل إشارة التحكم

$$V_+ = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad , i(0) = i_0$$

$$\Rightarrow i(t) = \frac{V_+}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t\right) \right) + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t\right)$$

يستمر تطبيق إشارة التحكم لفترة زمنية $\frac{T}{4}$.

$$i\left(\frac{T}{4}\right) = \frac{V_+}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right) \right) + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right)$$

بعد الانتهاء زمن تفعيل إشارة التحكم يصبح الترانزستور الموافق للإشارة المفعلة في النمط OFF والديود الموافق لهذه الإشارة في النمط ON بالتالي تكون الدارة المكافئة:

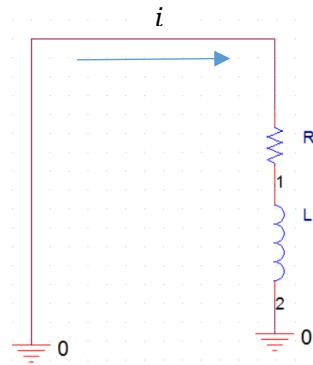


Figure 11 نموذج الدارة بحالة إلغاء تفعيل إشارة التحكم

$$0 = R \cdot i + L \frac{di}{dt}$$

ومن استمرارية التيار المار في الوشيعية:

$$i\left(\frac{T}{4}\right) = \frac{V_+}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right)\right) + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right)$$

بالتالي:

$$i(t) = \left(\frac{V_+}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right)\right) + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right)\right) \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \left(t - \frac{T}{4}\right)\right)$$

يبقى الديود في الوضع ON حتى ينعدم تياره عند اللحظة T وعندها يعود الترانزستور للوضع ON حيث تم تطبيق إشارة التحكم من جديد.

ومن استمرارية التيار المار في الوشيعية:

$$i(T) = i_0$$

$$\left(\frac{V_+}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right)\right) + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{T}{4}\right)\right) \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \frac{3T}{4}\right) = i_0$$

$$i_0 = \frac{V_+}{R} \frac{1 - \exp\left(-\frac{RT}{4L}\right)}{\exp\left(\frac{3RT}{4L}\right) - \exp\left(-\frac{RT}{4L}\right)}$$

بالتالي تصبح معادلة التيار المار في الوشيعية:

$$i(t) = \frac{V_+}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t\right) \frac{\exp\left(\frac{3RT}{4L}\right) - 1}{\exp\left(\frac{3RT}{4L}\right) - \exp\left(-\frac{RT}{4L}\right)}\right), t < \frac{T}{4}$$

$$i(t) = \frac{V_+}{R} \left(\frac{\exp\left(\frac{RT}{L}\right) - \exp\left(-\frac{3RT}{4L}\right)}{\exp\left(\frac{RT}{L}\right) - 1}\right) \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot \left(t - \frac{T}{4}\right)\right), \frac{T}{4} < t < T$$

التطبيق العددي: $V_+ = 12 \text{ volt}, R = 30 \Omega, L = 23 \text{ mH}, T = 2 \text{ ms}$

	i_0	i_{max}
نظرياً	29.2 mA	206.87 mA
المحاكاة	10 mA	209.99 mA

يعود الفرق بين قيم المحاكاة والقيم النظرية لإهمال هبوط الجهد على كل من الديود والترانزستور خلال الدراسة النظرية.

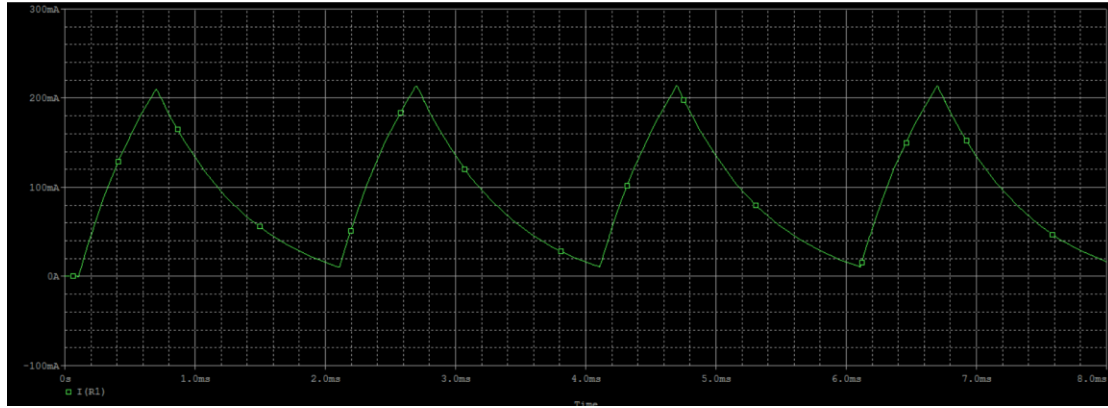


Figure 12 التيار المار في الوشيعه

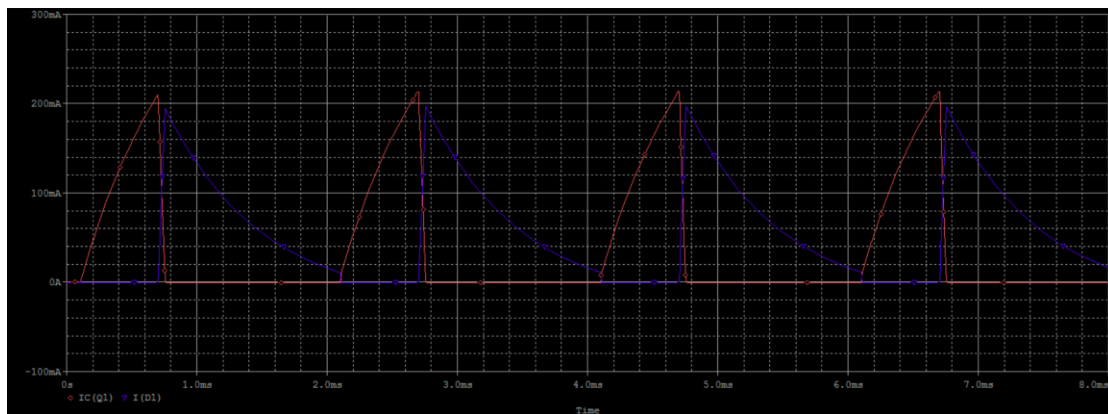


Figure 13 تيار الترانزستور (الأحمر)، تيار الديود (الأزرق)

- مساوي هذه الطريقة:

لا يتم استخدام كل الإمكانيات المتاحة (فقط نصف ملف يعمل خلال لحظة معينة) أي يتم استهلاك ربع كمية النحاس المستخدمة للو شائع.

2. 2. ثنائي القطبية Bipolar control

في هذا النوع من التحكم لا يتم استخدام نقطة الوسط بالتالي لا يوجد طريقة مباشرة لعكس جهة التيار المار في الوشائع لذلك يتم استخدام جسر H كمفعل للمحرك وهذا ما يمكننا من عكس جهة التيار.

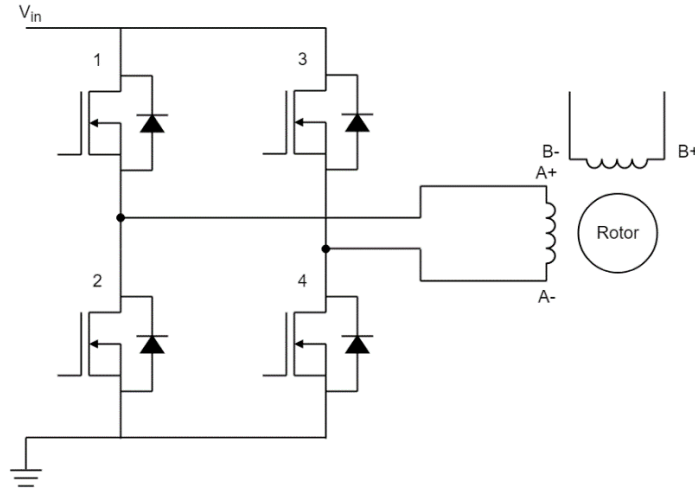


Figure 14 القيادة بطريقة ثنائي القطبية

2. 2. 1. آلية التحكم

يوجد عدة طرق لقيادة المحرك باستخدام جسر H منها

1- طور واحد فقط يعمل في كل لحظة:

أولاً يتم تفعيل إشارات التحكم 1 و 4 للوشية A ثم يتم تفعيل إشارات التحكم 1 و 4 للوشية B وإلغاء تفعيل إشارات التحكم السابقة. يليها تفعيل إشارات التحكم 3 و 2 للوشية A وإلغاء تفعيل إشارات التحكم السابقة. ثم تفعيل إشارات التحكم 3 و 2 للوشية B وإلغاء تفعيل إشارات التحكم السابقة. لا تعطي هذه الطريقة عزم كبير لأنه يتم تفعيل وشية واحدة في كل نصف دور.

2- طوران يعملان في كل لحظة:

أولاً يتم تفعيل إشارات التحكم 1 و 4 لكل من A و B معاً عندها يتشكل حقل مغناطيسي ناتج عن مجموع كل من الحقلين الناتجين عن الوشية A والوشية B ويدور الدائر إلى موضع التوازن الذي يحدده الحقل المغناطيسي الناتج من الثابت. يتم بعدها تفعيل إشارات التحكم 3 و 2 للوشية B وإلغاء 1 و 4 بنفس الوقت. تبقى على إشارات التحكم السابقة للوشية A فيدور إلى موضع التوازن الجديد. ثالثاً يتم تفعيل إشارات التحكم 3 و 2 للوشية A وتبقى على إشارات التحكم السابقة للوشية B. أخيراً يتم تفعيل إشارات التحكم 1 و 4 للوشية B وتبقى على إشارات التحكم السابقة للوشية A.

بالتالي نستطيع قيادة المحرك بتطبيق إشارتي التحكم A, B ، عندما تكون A بالمستوى المرتفع يتم تفعيل الترانزستورين 1 و 4 للجسر الأول وعندما تكون بالمستوى المنخفض يتم تفعيل الترانزستورين 2 و 3، كذلك الأمر بالنسبة للإشارة B والجسر الثاني.

لتحقيق ما سبق يجب أن تكون إشارة التحكم A على ترابع مع B.

نحصل في هذه الطريقة على عزم أكبر من الطريقة السابقة ونفس عدد الخطوات.

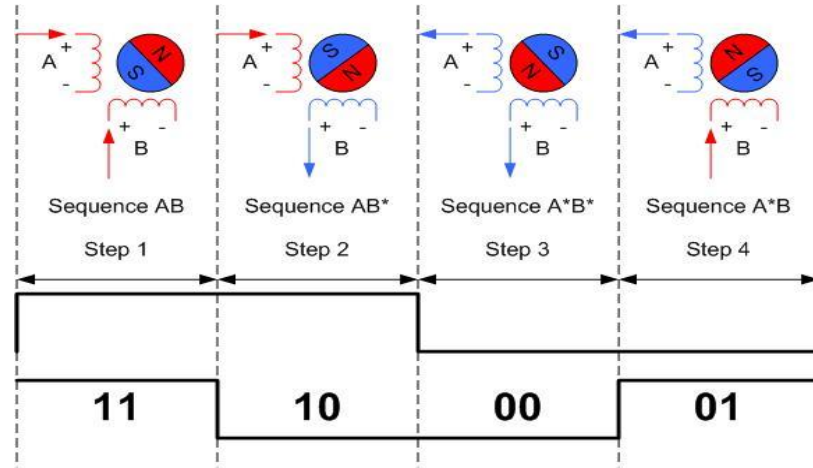


Figure 15 تسلسل إشارات التحكم

سيتم استخدام طريقة ثنائية القطبية بما أنها تؤمن عزم أكبر بنفس عدد الخطوات.

2. 2. 2. تحليل الدارة

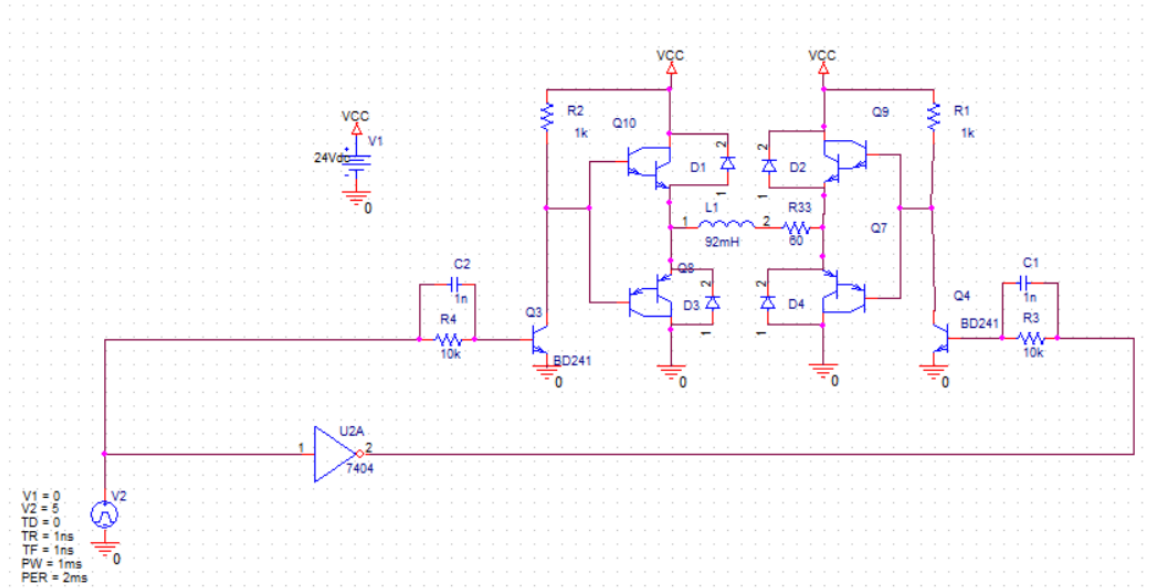


Figure 16 نمذجة دارة التحكم لوشية

يعمل الترانزستورين Q_3, Q_4 مع المقاومتين R_4, R_3 على رفع مطال إشارة التحكم من 5 volt إلى 24 volt فعند تطبيق إشارة التحكم 5 volt على قاعدة الترانزستور Q_3 يصبح في النمط ON وبالتالي يصبح جهد قاعدة كل من الترانزستورين Q_{10}, Q_8 0 volt وعند تطبيق إشارة التحكم 0 volt على قاعدة الترانزستور Q_3 يصبح في النمط OFF وبالتالي يصبح جهد قاعدة كل من الترانزستورين Q_{10}, Q_8 24 volt تقريباً. وكذلك الأمر بالنسبة لكل من الترانزستورين Q_9, Q_7 .

يتم اختيار R_4, R_3 بحيث يكون التيار المسحوب من المنبع عبرهما كافياً لإدخال الترانزستورين Q_3, Q_4 بالإشباع.

تم استخدام المكثفتين $C1, C2$ لتأمين إغلاق سريع للترانزستورين $Q3, Q4$ وبدوره فتح وإغلاق سريع للترانزستورات $Q7, Q8, Q9, Q10$.

أما بالنسبة لاختيار تشكيلة دارلنغتون للترانزستورات $Q7, Q8, Q9, Q10$ فذلك لتأمين β مرتفعة وبالتالي تيار قاعدة منخفض بحكم أن تيار المجمع يتم تحديده من قبل الحمل. وكلما كان تيار القاعدة منخفض أكثر يكون جهد القاعدة أقرب إلى القيمة المطلوبة والتي هي $\approx 24 \text{ volt}$

مراحل عمل الدارة

المرحلة الأولى: عندما تكون الديودات $D1, D4$ في النمط ON :

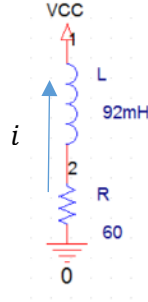


Figure 17 نمذجة المرحلة الأولى

$$-V_{CC} = L \frac{di}{dt} + Ri, i(0) = i_0$$

$$i(t) = \frac{-V_{CC}}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t\right) \right) + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t\right)$$

يبقى الديودان $D1, D4$ في النمط ON حتى ينعدم التيار عند اللحظة t_1 :

$$i(t_1) = 0 = \frac{-V_{CC}}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t_1\right) \right) + i_0 \exp\left(-\frac{R}{L} \cdot t_1\right)$$

$$t_1 = \frac{L}{R} \ln\left(\frac{Ri_0 + V_{CC}}{V_{CC}}\right)$$

المرحلة الثانية: عندما يكون $Q10, Q7$ في النمط ON والديودات $D1, D4$ في النمط OFF :

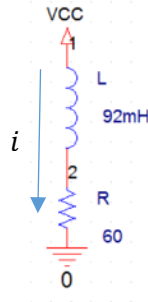


Figure 18 نمذجة المرحلة الثانية

$$V_{CC} = L \frac{di}{dt} + Ri, i(t_1) = 0$$

$$i(t) = \frac{V_{CC}}{R} \left(1 - \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (t - t_1) \right) \right)$$

تستمر هذه المرحلة من اللحظة t_1 حتى اللحظة αT

$$i(\alpha T) = \frac{V_{CC}}{R} \left(1 - \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (\alpha T - t_1) \right) \right)$$

المرحلة الثالثة: عندما تكون الديودات $D2, D3$ في النمط ON :

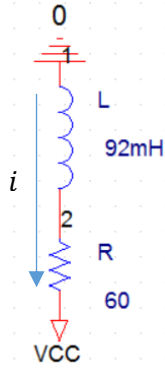


Figure 19 نموذج المرحلة الثالثة

$$-V_{CC} = L \frac{di}{dt} + Ri, i(\alpha T) = \frac{V_{CC}}{R} \left(1 - \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (\alpha T - t_1) \right) \right)$$

$$i(t) = \frac{-V_{CC}}{R} \left(1 - \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (t - \alpha T) \right) \right) + i(\alpha T) \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (t - \alpha T) \right)$$

يبقى الديودان $D2, D3$ في النمط ON حتى ينعدم التيار عند اللحظة t_2 :

$$i(t_2) = 0 = \frac{-V_{CC}}{R} \left(1 - \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (t_2 - \alpha T) \right) \right) + i(\alpha T) \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (t_2 - \alpha T) \right)$$

$$t_2 = \frac{L}{R} \ln \left(\frac{Ri(\alpha T) + V_{CC}}{V_{CC}} \right) + \alpha T$$

المرحلة الرابعة: عندما يكون $Q9, Q8$ في النمط ON والديودات $D2, D3$ في النمط OFF :

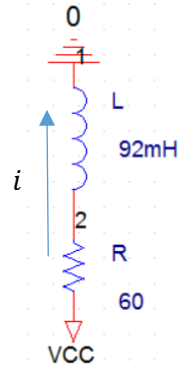


Figure 20 نموذج المرحلة الرابعة

$$V_{CC} = L \frac{di}{dt} + Ri, i(t_2) = 0$$

$$i(t) = \frac{V_{CC}}{R} \left(1 - \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (t - t_2) \right) \right)$$

تستمر هذه المرحلة من اللحظة t_2 حتى اللحظة T

$$i(T) = \frac{V_{CC}}{R} \left(1 - \exp \left(-\frac{R}{L} \cdot (T - t_2) \right) \right)$$

من استمرار تيار الوشيعه نحصل على قيمة i_0 :

$$i_0 = i(T)$$

التطبيق العددي: $V_+ = 24 \text{ volt}, R = 60 \Omega, L = 92 \text{ mH}, T = 2 \text{ ms}, \alpha = 0.5$

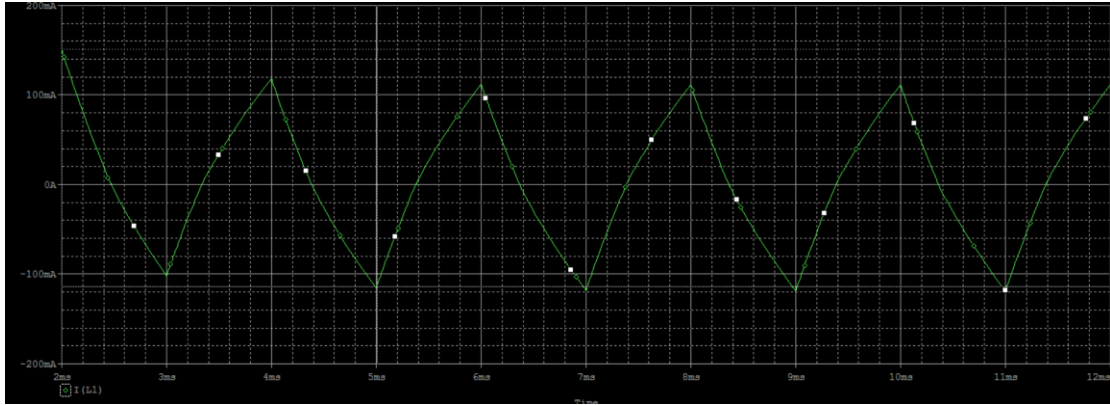


Figure 21 التيار المار في الوشيعه

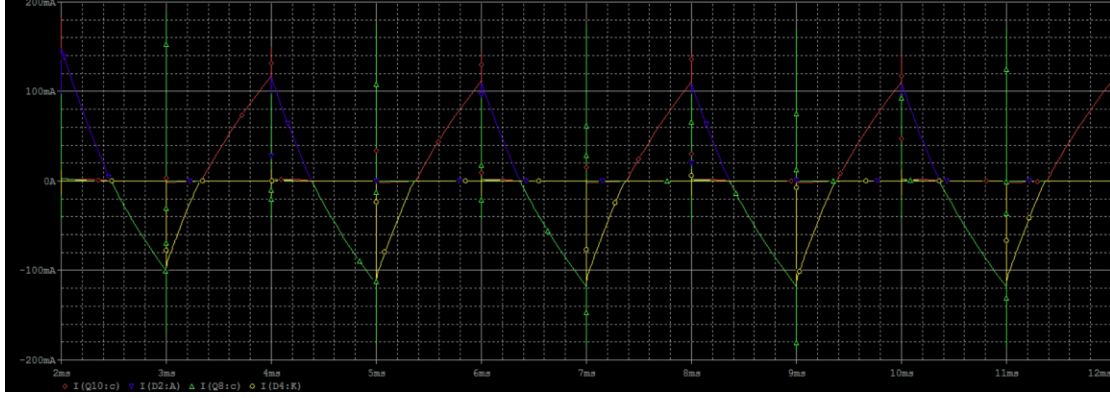


Figure 22 تيار الديود $D2, D3$ (الأزرق)، تيار الترانزستور $Q8, Q9$ (الأخضر)، تيار الديود $D1, D4$ (الأصفر)، تيار الترانزستور $Q10, Q7$ (الأحمر)

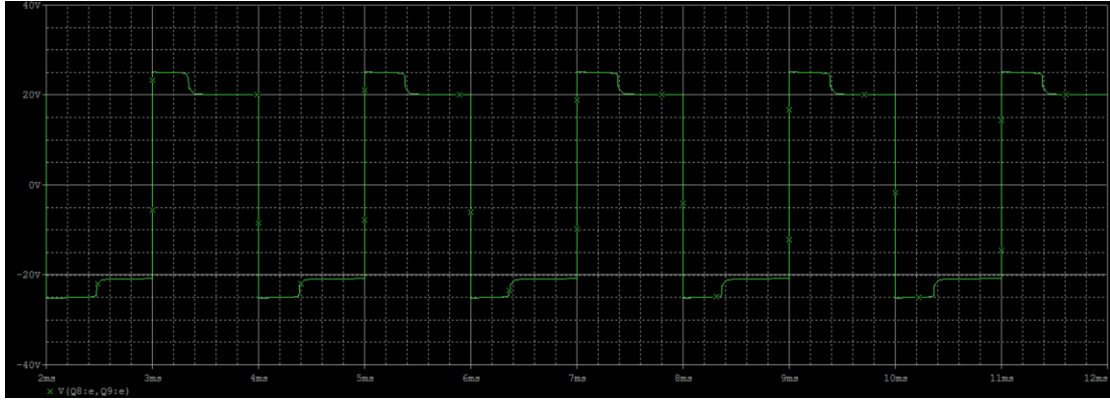


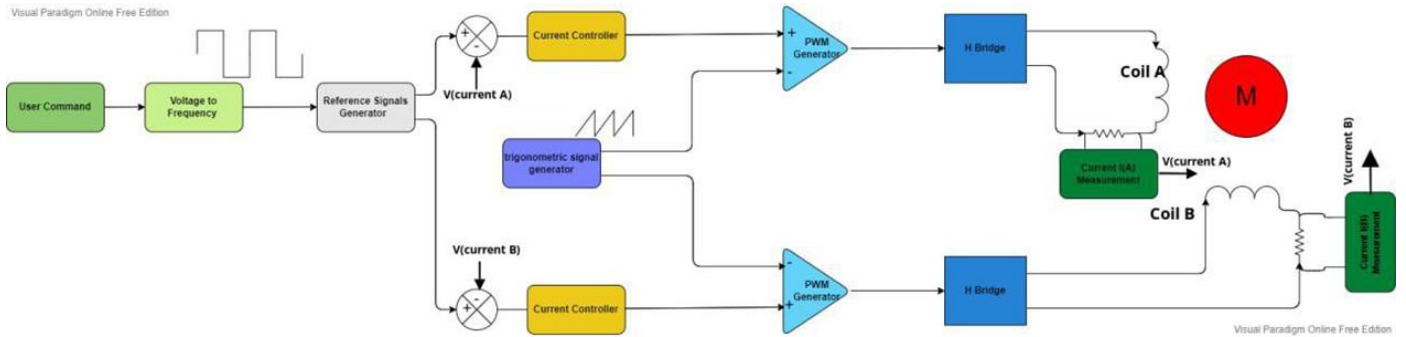
Figure 23 الجهد المطبق بين طرفي الوشاعة

نلاحظ أن مطال إشارة التيار في التحكم ثنائي القطبية تقريباً تساوي مطال إشارة التيار في التحكم أحادي القطبية لكن في التحكم ثنائي القطبية يمر هذا التيار في كل الوشاعة مما يعطي حقلاً مغناطيسياً أكبر. لذلك سنعمد التحكم ثنائي القطبية لقيادة المحرك.

3. دفتر الشروط

نرغب بالتحكم بسرعة واتجاه دوران محرك خطوي (Unipolar Hybrid Stepper Motor) نوع (42BYGH801) بحيث تكون سرعته العظمى 300 RPM، باستعمال وحدة تغذية وحيدة لتغذية جميع أجزاء دائرة القيادة.

4. المخطط الصندوقي



يتم تحديد سرعة واتجاه الدوران عن طريق User command بحيث يحدد المستخدم جهد DC متناسب طرذاً مع السرعة التي يريدها من ثم يتم توليد إشارة مربعة ترددها متوافق مع هذا الجهد عن طريق Voltage To Frequency Converter. تساهم الإشارة المربعة بتوليد إشاراتي القيادة المرجعية المترابعتين. ويتم طرحهما من خرج قانسي التيار لتوليد إشارتي الخطأ. تدخل إشارة الخطأ إلى مصحح التيار الذي يعطي أمر التحكم (command). يحدد أمر التحكم عرض النبضة (PWM) التي تقود جسر H عن طريق المقارنة مع إشارة مثلثية ترددها أكبر بكثير من تردد إشاراتي القيادة المرجعية. وأخيراً يعمل جسر H كمفعل للمحرك الخطوي بحيث يدور المحرك بالسرعة المطلوبة.

5. أجزاء دائرة القيادة

5.1. التغذية السالبة والموجبة

5.1.1. التغذية السالبة

بما أنه من متطلبات دفتر الشروط الاعتماد على وحدة تغذية وحيدة والتي تحوي على منبعي جهد متغيرين فنحن بحاجة إلى دائرة تؤمن التغذية السالبة لمضخمات العمليات المستخدمة كون أحد منابع الجهد مستخدم لتأمين جهد التغذية لجسر H.

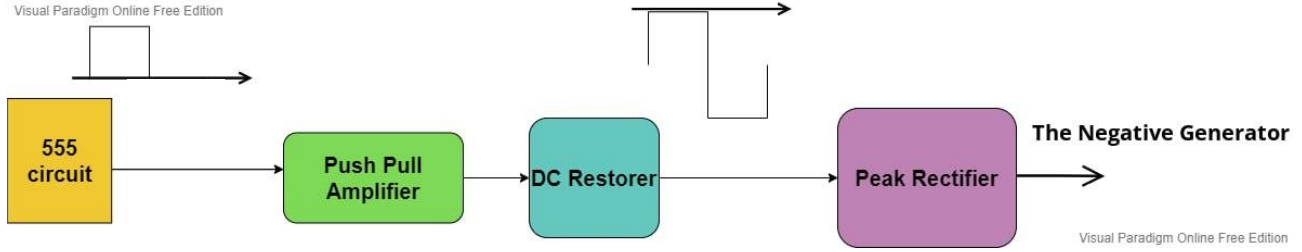


Figure 24 المخطط الصندوقي للتغذية السالبة

لتوليد تغذية سالبة تم استخدام مؤقت 555 لتوليد إشارة مربعة مطالها (0,5 volt) متبوعة بمضخم نوع (push pull) وذلك لتأمين سحب التيار المطلوب من قبل الحمل ثم استخدام دائرة استعادة DC لجعل مطالها (0,-5 volt). وأخيراً دائرة ملاحقة قمم للحصول على إشارة DC سالبة.

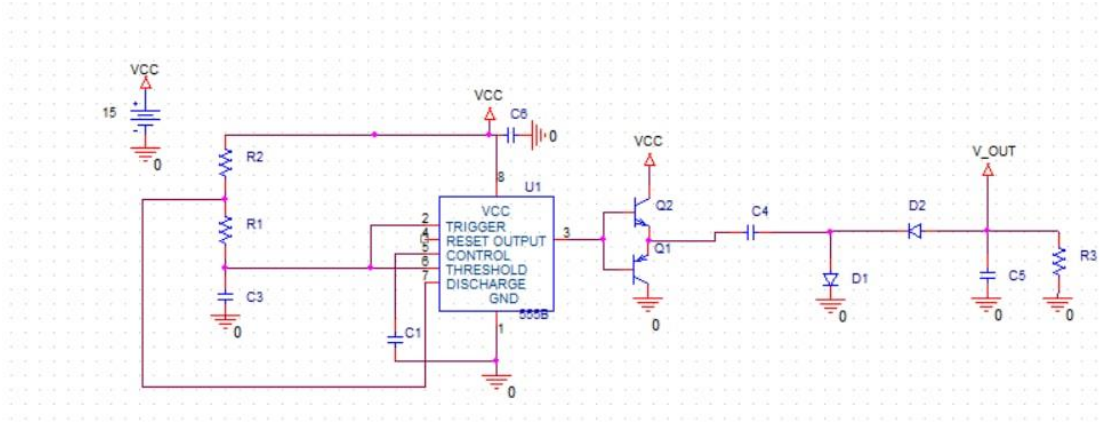


Figure 25 نمذجة دائرة التغذية السالبة

1. 1. 1. 5. مكونات دائرة توليد التغذية السالبة:

قَدَّاح مَهْتَز (Astable Multivibrator)

يتم استخدام دائرة 555 لتشكيل قَدَّاح مَهْتَز حيث يعطي خرج دائرة 555 إشارة مربعة بتردد يتبع لقيم العناصر R_1, R_2, C_3 .

آلية عمل القَدَّاح:

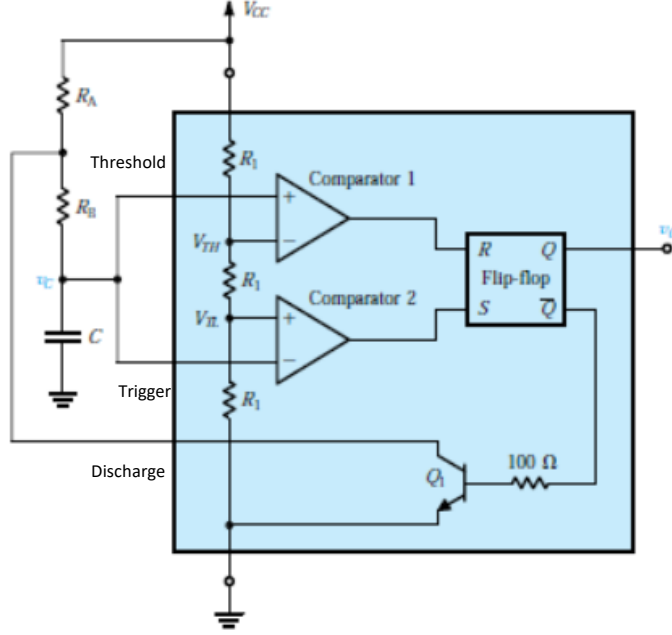


Figure 26 دائرة 555 كقَدَّاح مَهْتَز

في البداية تكون المكثفة C غير مشحونة أي يكون جهد النقطتين Threshold، Trigger صفراً وبالتالي يكون خرج المقارن الأول صفر وخرج المقارن الثاني واحد. ولذلك يكون خرج القلاب Flip-Flop واحد وبالتالي يكون الترانزستور Q_1 في النمط القاطع. يتم شحن المكثفة C من الم منبع V_{CC} عبر المقاومتين R_A, R_B حتى يصل فرق الجهد بين طرفيها إلى القيمة V_{TH} عندها يتغير خرج المقارن الأول من صفر إلى واحد ناقلاً بذلك خرج القلاب من واحد إلى صفر وبالتالي يصبح الترانزستور Q_1 في النمط الفعال. نتيجة لتغير حالة الترانزستور يتم تفريغ المكثفة C عبر المقاومة R_B حتى يصل الجهد بين طرفيها إلى القيمة V_{TL} عندها يتغير خرج المقارن الثاني من صفر إلى واحد وهذا يؤدي إلى تغير خرج القلاب من واحد إلى صفر ويعود الترانزستور Q_1 إلى النمط القاطع وتكرر عملية الشحن والتفريغ.

حساب زمن شحن وتفريغ المكثفة:

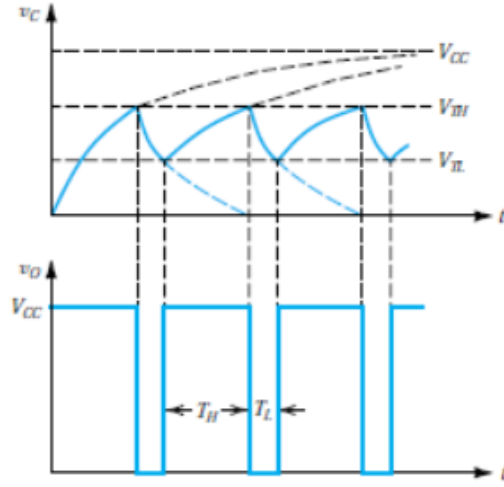


Figure 27 جزء شحن وتفريغ المكثفة C

زمن الشحن: يتم شحن المكثفة من المصدر V_{CC} عبر المقاومتين R_A, R_B . عند بدء عملية الشحن يكون الجهد بين طرفي المكثفة C مساوياً لـ V_{TL} (في الحالة المستقرة) بالتالي:

$$V_C(t) = V_{CC} - (V_{CC} - V_{TL}) \exp\left(-\frac{t}{C(R_A + R_B)}\right)$$

زمن الشحن T_H :

$$V_C(T_H) = V_{TH} = V_{CC} - (V_{CC} - V_{TL}) \exp\left(-\frac{T_H}{C(R_A + R_B)}\right)$$

لكن من بنية مؤقت 555 نلاحظ أن علاقة الجهود V_{TH}, V_{TL} بالجهد V_{CC} هي علاقة تقسيم فولتية:

$$V_{TH} = \frac{2}{3} V_{CC}$$

$$V_{TL} = \frac{1}{3} V_{CC}$$

بالتعويض نجد أن زمن الشحن t_{ch} :

$$T_H = C(R_A + R_B) \ln 2 \approx 0.69C(R_A + R_B)$$

زمن التفريغ: يتم تفريغ المكثفة عبر المقاومة R_B فقط. عند بدء عملية التفريغ يكون الجهد بين طرفي المكثفة C مساوياً لـ V_{TH} بالتالي:

$$V_C(t) = V_{CC} - (V_{CC} - V_{TH}) \exp\left(-\frac{t}{CR_B}\right)$$

$$\Rightarrow V_C(T_L) = V_{TL} = V_{CC} - (V_{CC} - V_{TH}) \exp\left(-\frac{T_L}{CR_B}\right)$$

معادلة زمن التفريغ T_L :

$$T_L = CR_B \ln 2 \approx 0.69CR_B$$

ومنه دور إشارة الخرج T :

$$T = T_L + T_H = 0.69C(R_A + 2R_B)$$

أي خرج القادح المهتز هو إشارة دورية مربعة دورها يُعطى بالعلاقة السابقة.

مضخم push-pull من الصنف AB:

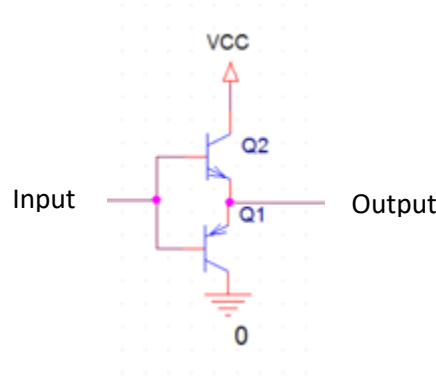


Figure 28 مضخم Push Pull

خرج دائرة 555 تيار محدود قد لا يكون كافي لتغذية كافة مضخمات العمليات لذلك نحتاج إلى مرحلة تقوم بتأمين التيار اللازم لقيادة كل مضخمات العمليات. يتم وصل كل من الترانزستورين $Q1, Q2$ بتقنية المجمع المشترك (common collector) حيث تحافظ تقنية الوصل هذه على مطال إشارة الدخل تقريباً لكن تساهم بتضخيم تيار الدخل بنسبة β .

دائرة استعادة DC

خرج مرحلة push pull هو إشارة مربعة مطالها بين 0 و V_{CC} . لتوليد جهد سالب علينا أن نحصل أولاً على إشارة سالبة لذلك نحتاج إلى Clamper Circuit لتنتقل المطال الإشارة من 0 و V_{CC} إلى 0 و $-V_{CC}$.

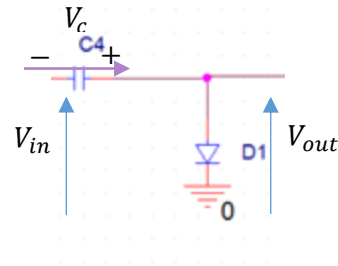


Figure 29 دائرة استعادة DC

عندما يكون الدخل في المستوى العالي أي V_{CC} يكون الديود في النمط ON وبالتالي $V_{out} = 0 \text{ volt}$ لكن بتطبيق كيرشوف:

$$V_{out} = V_{in} + V_c$$

بالتالي عندما يكون $V_{out} = 0$ يكون $V_c = -V_{CC}$ أي أن جهد اللبوس الموجب هو صفر وجهد اللبوس السالب هو V_{CC} . عندما ينتقل الدخل من V_{CC} إلى الصفر لحظياً (بحكم أن الإشارة مربعة) فإن المكثفة تمنع التغير المفاجئ لفرق الجهد بين طرفيها بالتالي يحافظ V_c على قيمته والتي هي $-V_{CC}$ لكن جهد اللبوس السالب أصبح صفر بالتالي جهد اللبوس الموجب أصبح $-V_{CC}$ والديود في النمط OFF بالتالي أصبح جهد الخرج $-V_{CC}$.

بهذا التحليل تقوم الدارة السابقة بتوليد إشارة خرج مربعة مطالها بين 0 و $-V_{CC}$.

دائرة ملاحقة قمم سالبة

المرحلة الأخيرة من دائرة توليد التغذية السالبة هي دائرة ملاحقة قمم سالبة وبما أن إشارة الدخل هي إشارة مربعة بين 0 و $-V_{CC}$ فيوجد قمة وحيدة هي $-V_{CC}$ وبالتالي الخرج هو قيمة ثابتة $-V_{CC}$ وهذا هو المطلوب.

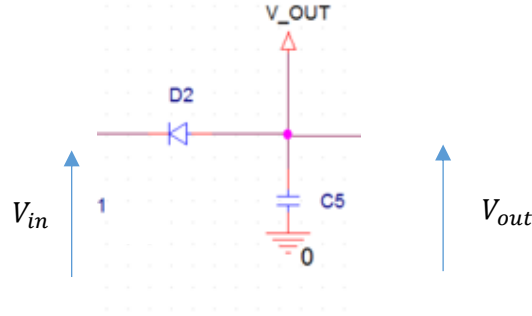


Figure 30 دائرة ملاحقة قمم

عندما يكون الدخل في المستوى 0 يكون الديود في النمط OFF والخرج صفر. عندما ينتقل الخرج إلى المستوى $-V_{CC}$ يصبح الديود في النمط ON ويتم شحن المكثفة حتى يصبح جهد الخرج $-V_{CC}$. ثم يصبح الديود في النمط OFF عندما يعود الدخل إلى المستوى صفر يبقى الديود في النمط OFF (حيث أن فرق الجهد بين طرفيه سالب). وبالتالي يبقى جهد الخرج $-V_{CC}$.

عملياً سيكون هنالك حمل يسحب تيار من المكثفة عندما يكون الديود في النمط OFF بالتالي سيؤدي ذلك إلى أن يصبح جهد الخرج أكثر من $-V_{CC}$ ويتم تعويض هذا الفرق عندما يصبح الدخل في المستوى $-V_{CC}$. بالتالي سيكون هنالك اهتزاز في جهد الخرج لذلك نقوم باختيار مكثفة بسعة كبيرة بحيث لا يتأثر جهد الخرج بالتيار المسحوب خلال الفترة التي يكون فيها الديود في النمط OFF.

5. 1. 1. 2 تصميم دائرة التغذية السالبة

- تم اختيار عناصر دائرة 555 كالتالي

$$R_1 = 10 \text{ k} , R_2 = 1 \text{ k} , C_3 = 10 \text{ nF} , C_1 = 0.047 \text{ nF}$$

بحيث $R_1 \gg R_2$ ليكون زمن الهبوط يساوي تقريباً زمن الصعود.

فيكون دور إشارة الخرج

$$T = 0.69 C_3 (2R_1 + R_2) = 0.15 \text{ ms}$$

- اختبرت قيمة $C_4 = 11\mu F$ بحيث لا يتأثر الجهد بين طرفيها بالتيار المسحوب عندما يكون D_1 OFF and D_2 ON.
- اختبرت $C_5 = 1001\mu F$ بحيث لا يتأثر جهد الخرج V_{out} بالحمل ($V_{ripples}$ small):

$$V_r = \frac{V_p}{f C_3 R_{load}} = \frac{1.5}{R_{load}}$$

ونظراً لاستخدام التغذية السالبة لتغذية المضخمات العمليات

$$R_{load} \gg 1.5 \Rightarrow V_r \approx 0$$

بنمذجة الدارة كانت النتيجة كما يلي

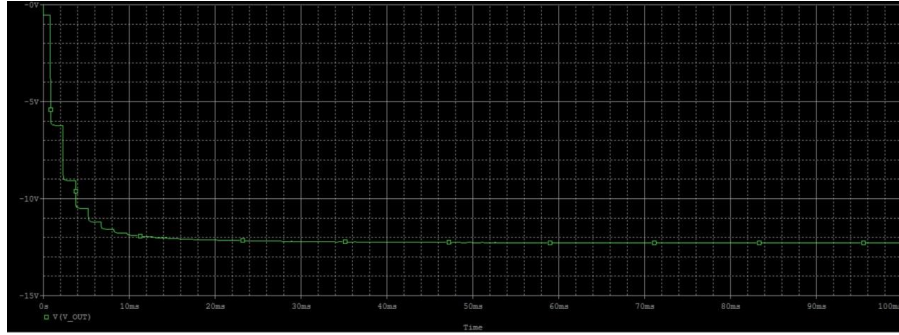


Figure 31 خرج دائرة التغذية السالبة

2. 1. 5. التغذية الموجبة

بحكم أنه يوجد فقط وحدة تغذية وحيدة فنحن محدودون بمنبع جهد وحيد لتغذية مضخمات العمليات. ولتوليد التغذية السالبة بمطال 10 volt تم تثبيت جهد هذا المنبع على ≈ 15 volt

لذلك للحصول على تغذية موجبة قريبة من قيمة التغذية السالبة بالقيمة المطلقة تم استخدام voltage regulator يعطي على خرجه ≈ 9 volt

وتم توصيله بالشكل الموضح.

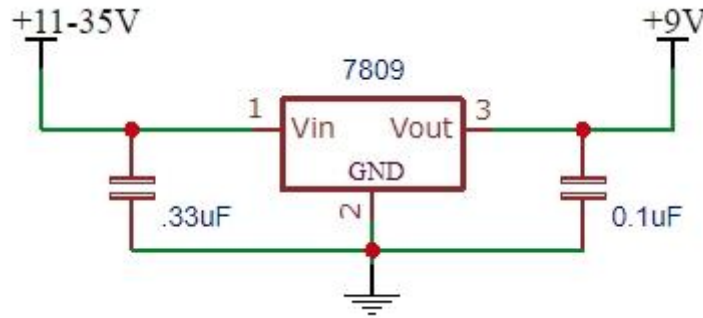


Figure 32 دائرة المنظم

5. 2. توليد إشارة القيادة

لقيادة المحرك سنتبع طريقة الإشارتين المترابعتين

5. 2. 1. توليد إشارتي دخل بفرق صفحة 90 (Phase Shifter)

لتوليد إشارات قيادة محرك بفرق صفحة 90 تم استخدام قلابين نوع D كما يظهر المخطط:

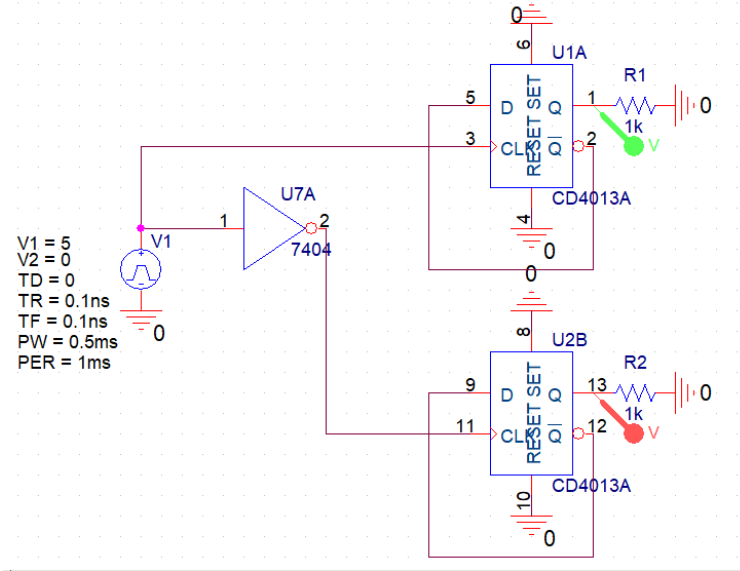
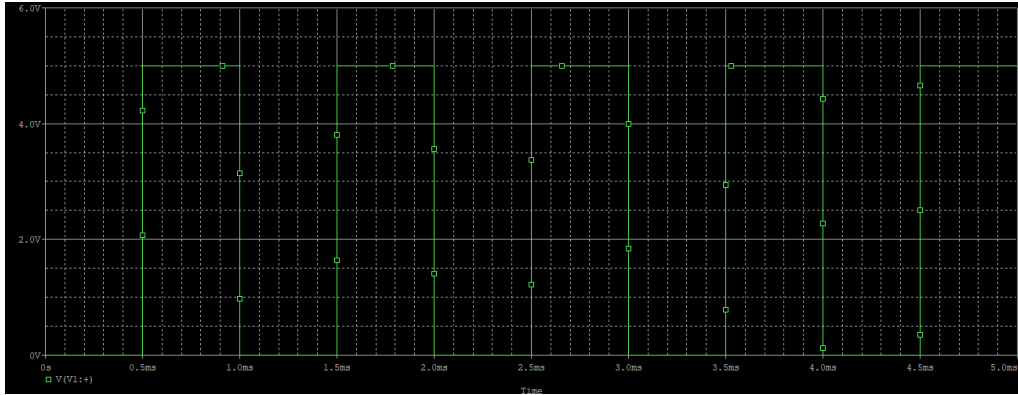


Figure 33 دائرة توليد فرق الطور

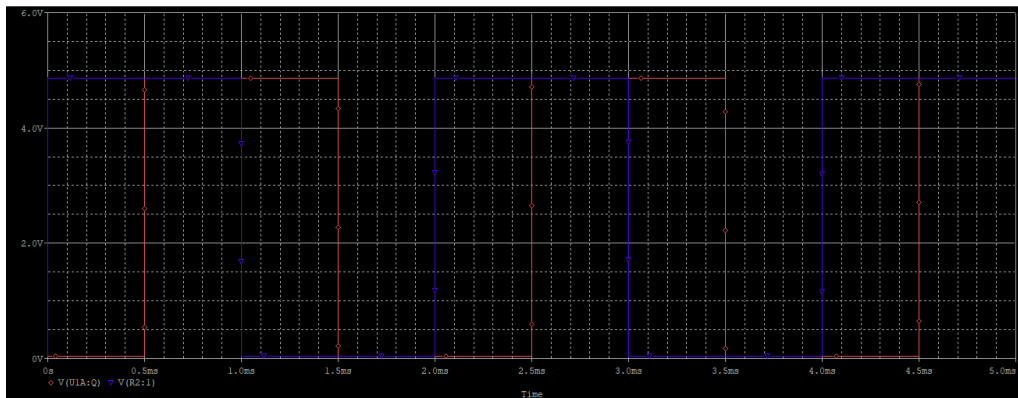
الدخل Inputs			الخرج Outputs
EN	D	CLK	Q^{*+1}
0	X	X	$Q^{*+1} = Q^*$
1	0	1	$Q^{*+1} = 0$
1	1	1	$Q^{*+1} = 1$

Table 1 جدول الحقيقة لقلاب D

اعتماداً على جدول الحقيقة لقلاب D، نجد أنه بوصل D مع \bar{Q} يتغير خرج القلاب مع كل نبضة صاعدة لإشارة الساعة، بالتالي لتوليد إشارتين مترابعتين يتم إدخال إشارة مربعة لساعة القلاب الأول بحيث يعطي الخرج إشارة مربعة أيضاً لكن بتواتر هو نصف تواتر نبضة الساعة، وأخذ معكوس إشارة الدخل كدخل لساعة القلاب الثاني فيكون الخرج عبارة عن إشارة متأخرة بالنبضة الهابطة للساعة فيتولد لدينا إشارتين مترابعتين عن بعضهما بإزاحة مقدارها 90 درجة وتواتر هو نصف تواتر إشارة الدخل.



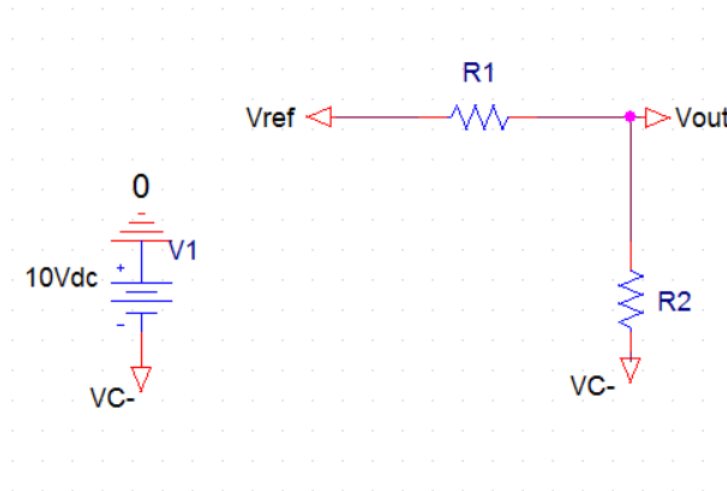
إشارة الساعة Figure 34



35 Figure خرج القلابين

5. 2. 2. تعديل مطال إشارة القيادة

من أجل مقارنة الإشارة المرجعية مع الإشارة المثلثية يجب إزاحة الإشارة بحيث تصبح متغيرة بين $[-2.5, 2.5]$ ولتحقيق ذلك تمت الاستفادة من التغذية السالبة بتطبيق تقسيمة جهد مناسبة تحقق المطلوب



36 Figure دائرة تعديل مطال الإشارة المرجعية

تحليل الدارة وتصميمها

$$\text{when } V_{ref} = V_{high} \Rightarrow V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_{high} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} V_{c-}$$

$$\text{when } V_{ref} = 0 \Rightarrow -V_{out} = \frac{R_1}{R_2 + R_1} V_{c-}$$

عملياً كان مطال الإشارة المرجعية $V_{ref} = 4 \text{ volt}$ وقيمة التغذية السالبة $V_{c-} = -10 \text{ volt}$ بالتالي

$$V_{ref} = 4 \Rightarrow V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} 4 + \frac{R_1}{R_2 + R_1} (-10)$$

$$V_{ref} = 0 \Rightarrow -V_{out} = \frac{R_1}{R_2 + R_1} (-10)$$

$$x = \frac{R_1}{R_2} \text{ بفرض}$$

$$V_{out} = \frac{4}{1+x} 4 + \frac{x}{1+x} (-10)$$

$$-V_{out} = \frac{x}{1+x} (-10)$$

بتقسيم المعادلتين السابقتين

$$x = \frac{1}{5}$$

بتعويض المعادلة الثانية بالأولى

$$2V_{out} = \frac{4}{x+1} \Rightarrow x = \frac{2}{V_{out}} - 1$$

$$\Rightarrow \frac{2}{V_{out}} - 1 = \frac{1}{5} \Rightarrow V_{out} = \pm \frac{5}{3}$$

بالتالي تم اختيار $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ و $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$

3. 2. 5. التحكم بجهة الدوران

لعكس جهة دوران المحرك يجب أن تصبح إشارتي القيادة المترابعتين بتقديم 90 درجة، مترابعتين بتأخير 90 درجة بالتالي لتحقيق الفكرة السابقة تم استخدام مبدل (switch) من النوع (single pole double throw) وتوصيلها بالشكل التالي إلى جسر القيادة (H_bridge)

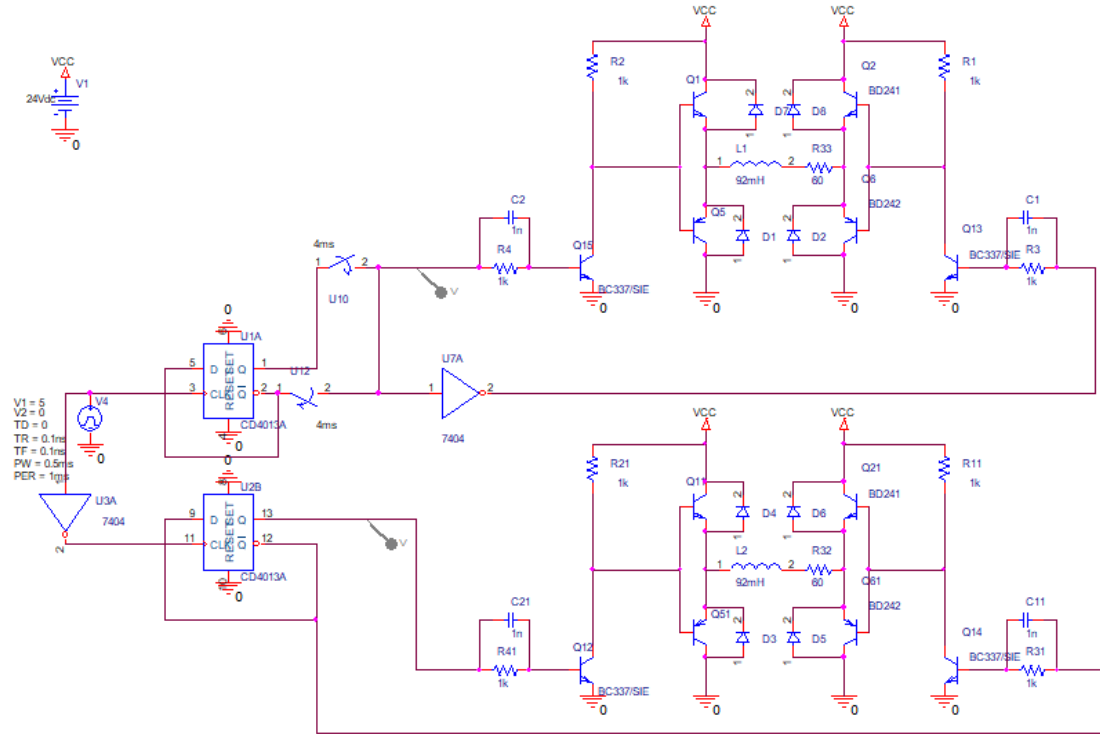


Figure 37 نمذجة الجسر مع الثايرسترون ومفتاح تغيير الجهة

يقوم switch بهذا النموذج بعكس جهة الدوران عند 4 ms فتكون إشارتي القيادة كما يظهر نموذج المحاكاة

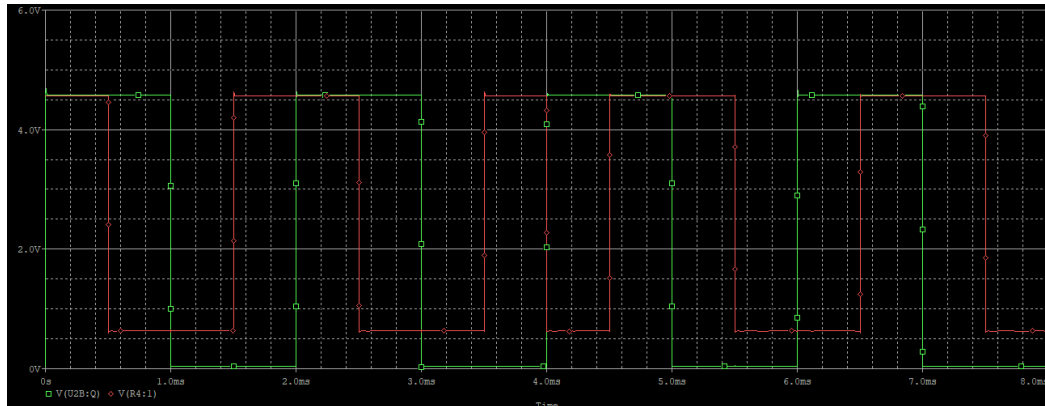


Figure 38 الإشارتين المترابعتين

5.3. Voltage to frequency circuit

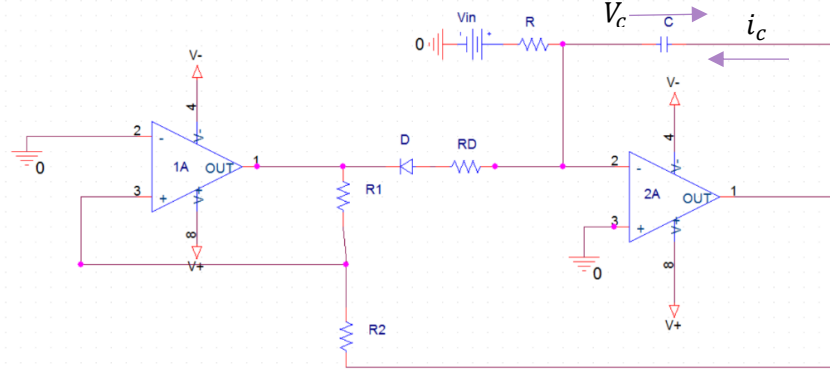


Figure 39 دائرة voltage to frequency

تقوم هذه الدارة بتوليد نبضات مربعة ذو مطال ثابت يتعلق بقيم $V+$ و $V-$ وبتردد متناسب مع قيمة الجهد المستمر V_{in} .

5.3.1. تحليل الدارة

مضخم العمليات A1 يعمل كمقارن حيث يكون خرجه هو $L+$ أو $L-$ حسب قيمة الجهد عند المدخل الموجب له. بالحالة المثالية قيم $L+$ و $L-$ تكون مساوية لقيم التغذية $V+$ و $V-$ على الترتيب.

- إيجاد عتبات الجهد التي يقوم عندها المقارن بتغيير قيمته:

يتم إيجاد علاقة الجهد للمدخل الموجب باستخدام نظرية التراكب. بوضع خرج A1 صفر نحصل على علاقة المدخل الموجب مع خرج A2:

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{o2}$$

بوضع خرج A2 صفر نحصل على علاقة المدخل الموجب مع خرج A1:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{o1}$$

وبالتالي تصبح علاقة المدخل الموجب:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{o1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{o2}$$

بما أن A1 يعمل كمقارن فخرجه هو $L+$ أو $L-$. لنفترض أنه $L+$ أي أن جهد المدخل الموجب أكبر من جهد المدخل السالب:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} L_+ + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{o2}$$

يغير A1 قيمته إلى $L-$ عندما يصبح جهد المدخل الموجب أقل من جهد المدخل السالب أي عندما يصبح جهد المدخل الموجب أقل من الصفر:

$$0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} L_+ + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{o2}$$

$$\Rightarrow V_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} L_+$$

أي عندما يصل جهد خرج A2 إلى القيمة $-\frac{R_2}{R_1} L_+$ ينتقل جهد خرج A1 من L_+ إلى L_- . بنفس الطريقة عندما يصل جهد خرج A2 إلى القيمة $-\frac{R_2}{R_1} L_-$ ينتقل جهد خرج A1 من L_- إلى L_+ . أما مضخم العمليات A2 فهو يعمل كمكامل عاكس. جهد المدخل السالب له يساوي جهد المدخل الموجب:

$$V_+ = V_-$$

وبالتالي التيار الذي يمر في المقاومة R هو $\frac{V_{in}}{R}$ وباختيار $R \gg R_D$ عندما يكون خرج A1 هو L_- يكون الديود D في النمط ON وبالتالي يتم تفريغ المكثفة C عبر المقاومة R_D حتى يصبح خرج A2 يساوي $V_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} L_-$ عندها ينتقل خرج A1 من L_- إلى L_+ ويصبح الديود D في النمط OFF. في هذه الحالة يتم شحن المكثفة من V_{in} عبر R حتى يصبح خرج A2 يساوي $V_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} L_+$ عندها ينتقل خرج A1 إلى المستوى L_- ويصبح D في النمط ON وتكرر عملية الشحن والتفريغ.

حساب زمن شحن وتفريغ المكثفة C

• زمن التفريغ

عندما D في النمط ON:

$$i_c = c \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow -\frac{L_-}{R_D} - \frac{V_{in}}{R} = c \frac{dV_c}{dt}, \quad V_c(0) = -\frac{R_2}{R_1} L_+$$

$$\Rightarrow V_c(t) = -\left(\frac{L_-}{R_D} + \frac{V_{in}}{R}\right) \frac{t}{c} - \frac{R_2}{R_1} L_+$$

بتعويض $V_c = -\frac{R_2}{R_1} L_-$ نحصل على زمن التفريغ t_1 :

$$V_c(t_1) = -\frac{R_2}{R_1} L_- = -\left(\frac{L_-}{R_D} + \frac{V_{in}}{R}\right) \frac{t_1}{c} - \frac{R_2}{R_1} L_+$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{c \frac{R_2}{R_1} (L_+ - L_-)}{-\frac{L_-}{R_D} - \frac{V_{in}}{R}}$$

باعتبار $R \gg R_D$ و V_{in}, L_- من نفس الرتبة بالتالي نستطيع إهمال الحد $\frac{V_{in}}{R}$ أمام الحد $\frac{L_-}{R_D}$ وباعتبار $L_+ = -L_-$ تصبح علاقة t_1 :

$$t_1 \simeq 2c \cdot R_D \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

• زمن الشحن

عندما D في النمط OFF:

$$i_c = c \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow -\frac{V_{in}}{R} = c \frac{dV_c}{dt}, \quad V_c(0) = -\frac{R_2}{R_1} L_-$$

$$\Rightarrow V_c(t) = -\frac{V_{in}}{R \cdot c} t - \frac{R_2}{R_1} L_-$$

بتعويض $V_c = -\frac{R_2}{R_1} L_+$ نحصل على زمن التفريغ t_2 :

$$V_c(t_2) = -\frac{R_2}{R_1} L_+ = -\frac{V_{in}}{R \cdot c} t_2 - \frac{R_2}{R_1} L_+$$

$$\Rightarrow t_2 = \frac{R_2 \cdot R \cdot c}{R_1 \cdot V_{in}} (L_+ - L_-)$$

وباعتبار $L_+ = -L_- = L$

$$t_2 \simeq \frac{R_2 \cdot R \cdot c \cdot L}{R_1 \cdot V_{in}}$$

ضمن نطاق عمل دارتنا سيكون $L > V_{in}$ وبالتالي نلاحظ أن:

$$\frac{t_1}{t_2} < \frac{R_D}{R}$$

وذكرنا مسبقاً أن $R_D \gg R$ بالتالي $t_2 \gg t_1$ أي نستطيع إهمال زمن التفريغ مقارنة بزمن الشحن:

$$f = k \cdot V_{in} = \frac{R_1}{R_2 \cdot R \cdot c \cdot L} V_{in}$$

يُسمى k بمفتاح حساسية الدارة ويتم اختياره وفقاً لمجال الترددات الذي نريده ومجال تغيرات V_{in} الممكن.

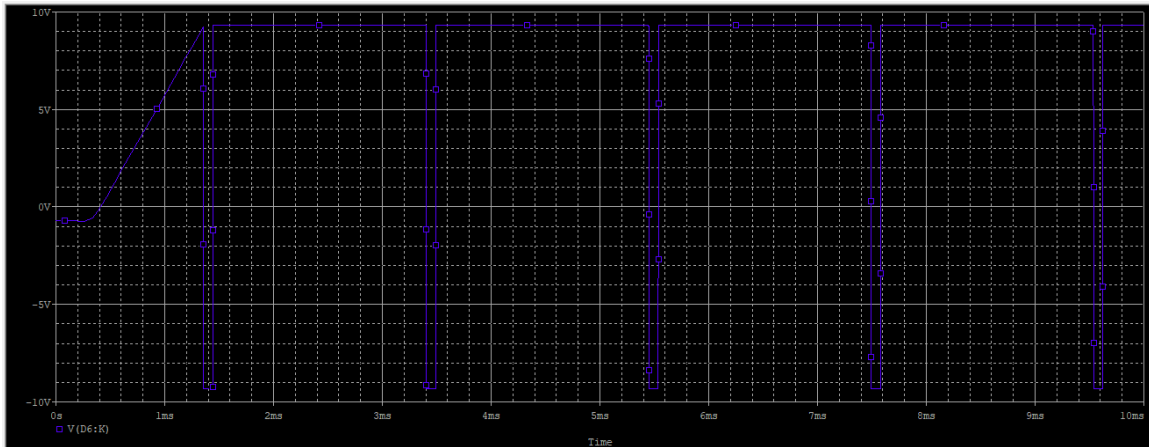


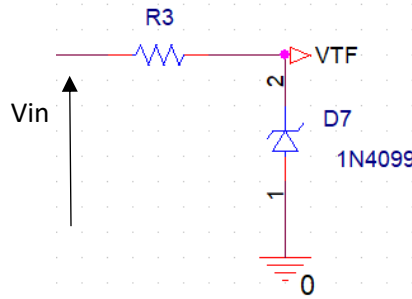
Figure 40 خرج دارة voltage to frequency

2. 3. 5. تعديل عرض ومطال خرج دارة VTF

من كون خرج الدارة هو دخل لمولد الإشارة المرجعية (قلاب D) فإن مطالها غير مناسب كدخل لبوابة منطقية وعرضها غير مناسب لتوليد إشارات القيادة المترابطة بالتالي تحتاج لتعديل مطال وعرض النبضة.

تعديل المطال

لتعديل مطال الإشارة استخدمنا دائرة من الشكل



عندما تكون Vin موجبة يقوم ديود زينر بتحديد المطال على 5 volt وعندما تكون سالبة يكون الديود ON فيكون الخرج 0 .

تعديل العرض

لتوليد إشارتي القيادة المترابعتين نحتاج لإشارة ساعة يكون نصف دورها بالمستوى المرتفع والنصف الثاني بالمستوى المنخفض، ولتحقيق ذلك يتم إدخالها إلى قلاب ثالث المدخل D له موصول بـ \bar{Q} .

تكون الدارة النهائية بالشكل:

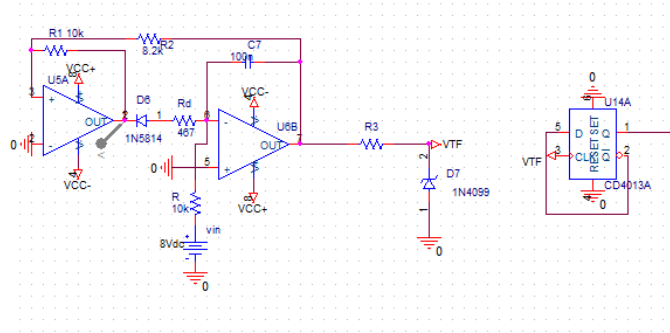


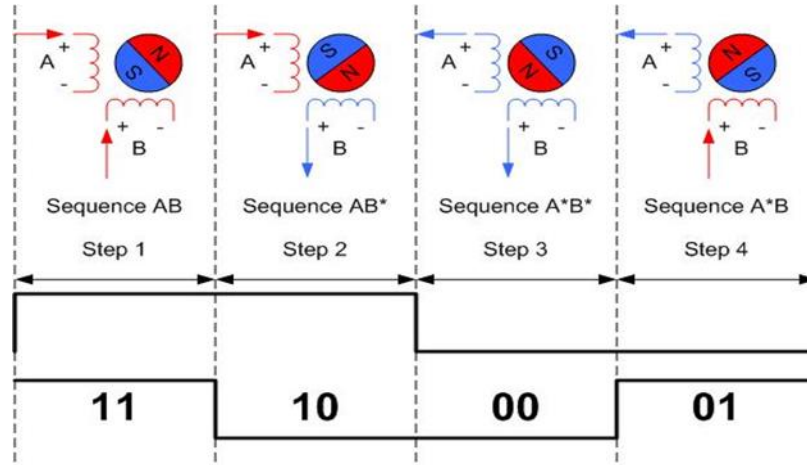
Figure 41 دائرة Voltage to frequency بعد التعديل

3. 3. 5. تصميم عناصر دائرة Voltage to frequency

نختار مفتاح الحساسية K اعتماداً على مجال الترددات المطلوبة ليدور المحرك بمجال سرعة $[0,300]RPM$.

$$motor\ step = 1.8^\circ \Rightarrow one\ turn = 360^\circ = 200 \times step$$

نقوم المحرك بطريقة طوران يعملان في كل دور بالتالي في كل دور من إشارة التحكم يتحرك الدائر 4 خطوات



فمن أجل سرعة عظمى 300 RPM يكون التردد المطلوب

$$300 \text{ RPM} = \frac{300}{60} \times 200 = 10^3 \text{ step per second} \Rightarrow f_{ref} = \frac{10^3}{4} = 250 \text{ Hz}$$

كون إشارة القيادة التي يكون ترددها الأعظمى 250 Hz ، تنتج عن مرور خرج دائرة voltage to frequency عبر قلابين بالتالي التردد الأعظمى لدائرة voltage to frequency:

$$f_{vtf} = 2 * 2 * f_{ref} = 1000 \text{ Hz}$$

تم اختيار مجال دخل دائرة voltage to frequency

$$V_{in} \in [0,10] \text{ volt}$$

$$\Rightarrow K = \frac{f_{vtf}}{V_{in,max}} = \frac{R_1}{R_2 \cdot R \cdot C \cdot L} = 100 \text{ Hz/volt}$$

تم اختيار قيم العناصر حيث $L = 12 \text{ volt}$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 8.2 \text{ k}\Omega$$

$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_d = 470 \Omega$$

$$C = 100 \text{ nF}$$

$$\Rightarrow K = 101 \text{ Hz/volt}$$

5. 4. مولد الإشارة المثلثية (Wave Form Generator)

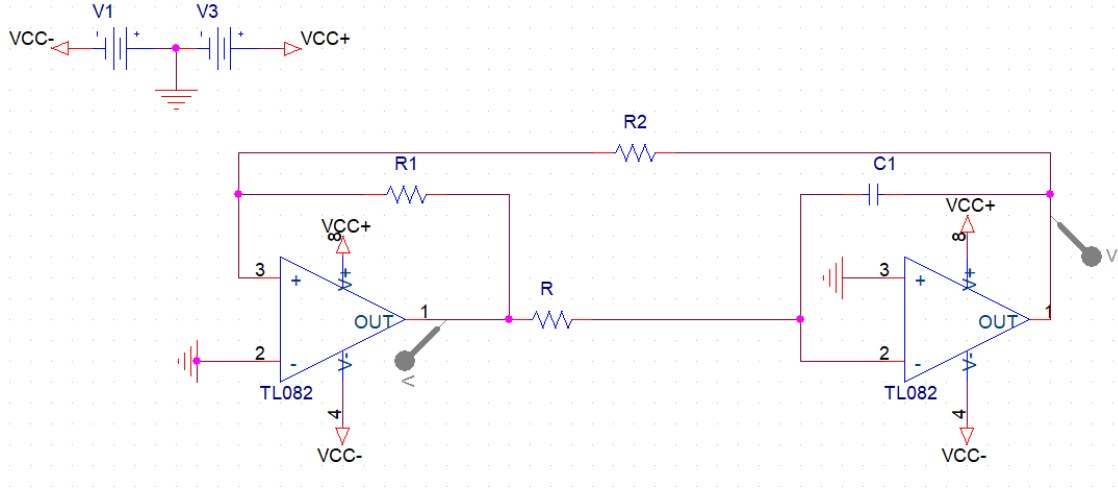


Figure 42 دائرة توليد إشارة مثلثية

تم توليد إشارة مثلثية اعتماداً على الدارة التالية.

مبدأ عمل الدارة:

تتألف الدارة من جزأين جزء يعمل كمقارن بين الجهد على طرفي المضخم وجزء يعمل كمكامل، بحيث يكون خرج المضخم الأول (المقارن) هو إشارة مربعة بين (v_{sat}^+, v_{sat}^-) وخرج المضخم الثاني (المكامل) هو إشارة مثلثية ناتجة عن مكاملة إشارة الدخل (الإشارة المربعة).

1. 4. 5. تحليل الدارة:

جزء المقارن

يعمل المقارن على المقارنة بين v_+ , v_- وتكون قيمة كل منهما كالتالي

$$v_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{O1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{O2} \quad \text{حسب مبدأ superposition}$$

$$v_- = 0$$

عند قيمة معينة لدخل المقارن ولتكن $v_{O2} = v_p^+$ تصبح قيمة $v_+ > v_-$ فيعطي خرج المقارن قيمة عليا تدل على قيمة المقارنة وهي قيمة الاشباع المضخم v_{sat}^+ ، وتكون معادلة الخرج عند نقطة القلب:

$$0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{sat}^+ + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_p^+ \Rightarrow v_p^+ = -\frac{R_2}{R_1} v_{sat}^+$$

وبنفس الطريقة تصبح $v_+ < v_-$ عند قيمة معينة للدخل $v_{O2} = v_p^-$ بحيث

$$v_p^- = -\frac{R_2}{R_1} v_{sat}^-$$

جزء المكامل

من جهة أخرى من كون المضخم الثاني يعمل كمكامل لإشارة v_{O1} وهي إشارة مربعة بين (v_{sat}^+, v_{sat}^-) يكون خرجه إشارة مثلثية بحيث $(v_{pick\ to\ pick})$ v_{pp} تساوي التكامل على نصف الدور

$$v_{pp} = -\frac{1}{RC} \int_0^{\frac{T}{2}} v_{sat}^- dt = \frac{v_{sat}}{RC} \left(\frac{T}{2} \right)$$

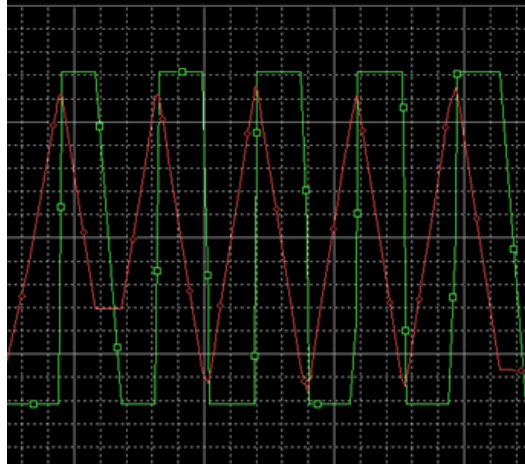


Figure 43 خرج دائرة مولد الإشارة المثلثية

من كون إشارة التكامل كما تظهر الإشارة الحمراء في الشكل-- تكون قيمة قلب المقارن إلى قيمة الإشباع الموجبة v_{sat}^+ هي $v_{pick}^+ = v_{sat}^+$ بالتالي نجد:

$$v_{pp} = v_p^+ - v_p^- = -\frac{R_2}{R_1} v_{sat}^+ + \frac{R_2}{R_1} v_{sat}^- = -\frac{2R_2}{R_1} v_{sat}$$

$$v_{sat}^+ = -v_{sat}^- = v_{sat} \quad \text{حيث}$$

بالتعويض بالعلاقة نجد

$$v_{pp} = \frac{2R_2}{R_1} v_{sat} = \frac{v_{sat}}{RC} \left(\frac{T}{2} \right) \Rightarrow T = \frac{4R_2}{R_1} RC \Rightarrow f = \frac{R_1}{4R_2} \left(\frac{1}{RC} \right)$$

فالدائرة التالية عبارة عن هزازة تقوم بتوليد إشارة مثلثية بتردد f وبمطال $v_{pp} = \frac{2R_2}{R_1} v_{sat}$.

2. 4. 5. تصميم الدارة

لتوليد نبضات PWM يجب أن يكون تردد الإشارة المثلثية أكبر بكثير من تردد إشارات القيادة المرجعية

$$f_t \gg f_{ref} \Rightarrow f_t = 13 \text{ KHz}$$

$$f_t = \frac{R_1}{4R_2} \left(\frac{1}{RC} \right) = 13 \text{ KHz}$$

بالتالي تم اختيار قيم عناصر الدارة

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 8.2 \text{ k}\Omega$$

$$R = 2.3 \text{ k}\Omega, \quad C = 10 \text{ nF}$$

5. توليد إشارات PWM

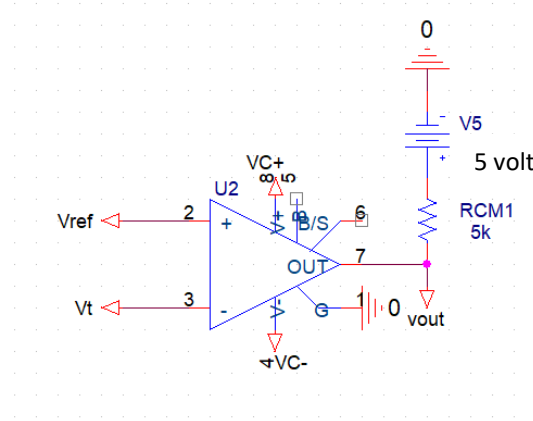


Figure 44 مولد إشارة PWM

لتوليد إشارات متغيرة عرض النبضة نستخدم مقارن للمقارنة بين إشارات القيادة المرجعية وإشارة المثلثية. تم استخدام مقارن من نوع LM311 يتم تغذيته بـ 10 volt و -10 volt. خرج هذا المقارن موصول على مجمع ترانزستور ونتيجة المقارنة تحدد إما أن يفتح أو يغلق هذا الترانزستور لذلك عندما يكون المدخل الموجب للمقارن أكبر من المدخل السالب للمقارن يتم فتح هذا الترانزستور وبالتالي سحب جهد الخرج إلى الصفر وعندما يكون جهد المدخل السالب أكبر من جهد المدخل الموجب يتم فتح هذا الترانزستور وبالتالي يكون جهد الخرج 5 volt.

6. تصحيح التيار

في البداية لتفسير حاجتنا لمصحح تيار نحتاج لفهم نظام المحرك.

6.1 نموذج المحرك:

يمكن نمذجة المحرك كهربائياً بالشكل-- حيث R هي مقاومة أسلاك الثابت لطور واحد و L هي ذاتية ملفات الثابت للطور، بقياس قيمة كل منهما كانت

$$R = 60 \Omega$$

$$L = 92 \text{ mH}$$

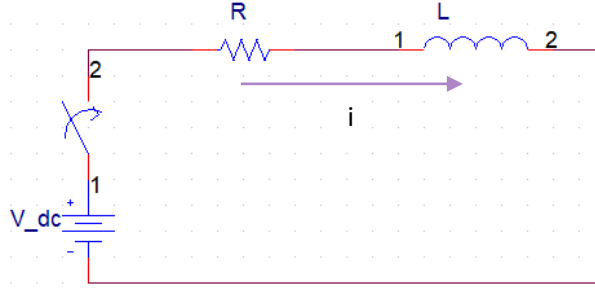


Figure 45 نموذج المحرك الخطوي

$$V_{dc} = Ri + L \frac{di}{dt}$$

بتطبيق تحويل لابلاس

$$V_{dc} = RI + Lp I \Rightarrow \frac{I}{V_{dc}} = \frac{1}{R + Lp}$$

بالتالي ينمذج نظام المحرك الخطوي بنظام درجة أولى من الشكل

$$G = \frac{1}{Lp + R}$$

وقد تم التأكد من نموذج النظام عملياً بتدوير المحرك بالحلقة المفتوحة عند أصغر تردد مرجعي ممكن ($f = 17 \text{ Hz}$) يكفي لتدويره بحيث يكون التيار قادراً على الوصول إلى الاستقرار وملاحقة الدخل المرجعي ومن ثم رسم إشارة التيار على راسم الاهتزاز فكان شكل تابع الاستجابة يكافئ شكل تابع استجابة نظام درجة أولى.

ومن كون قياس الذاتية ذو ارتياب كبير نظراً لسوء مقاييس الذاتية تم التأكد من معاملات النظام بحساب زمن الاستجابة عملياً فكانت النتائج:

من أجل تردد $f = 17 \text{ Hz}$ كان زمن الاستجابة $t_r = 6 \text{ msec}$

$$t_r = 3\tau = \frac{3L}{R} = 6 \times 10^{-3} \Rightarrow L = R * \frac{0.0112}{3} = 0.12 \text{ H} = 120 \text{ mH}$$

من حساب زمن الاستجابة عملياً نجد أنه بحالة تطبيق دخل مرجعي بدور أقل من 6 ms لن يقدر التيار على الوصول إلى زمن الاستجابة بالتالي لن يلاحق إشارة الدخل المرجعية ولن يدور المحرك وهنا تأتي حاجتنا للمصحح الذي يجبر التيار على ملاحقة الخرج.

6. 2. حلقة التحكم

لتصحيح التيار نستخدم مصحح PI بالحلقة المغلقة بالشكل:

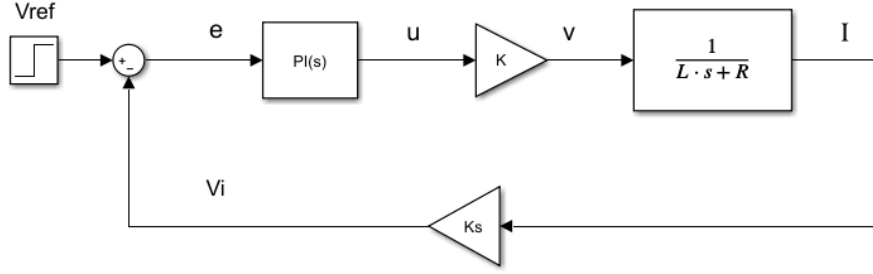


Figure 46 حلقة التحكم بالتيار

حيث K هو ربح جسر القيادة و K_s هو نسبة تضخيم قانس التيار.

فيكون تابع تحويل الحلقة المغلقة من الشكل:

$$H = \frac{I}{V_{ref}} = \frac{K(K_p p + K_i)}{Lp^2 + (R + K_p K K_s)p + K_i K K_s}$$

6. 2. 1. ربح جسر القيادة K

للتحكم بعمل جسر القيادة يجري توليد نبضات PWM من خلال المقارنة بين إشارة مثلثية ترددها أكبر بعشر أضعاف من تردد إشارة الدخل u المربعة

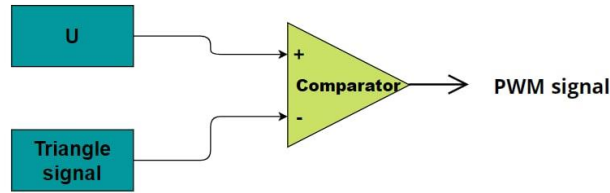


Figure 47 PWM المخطط الصندوقي

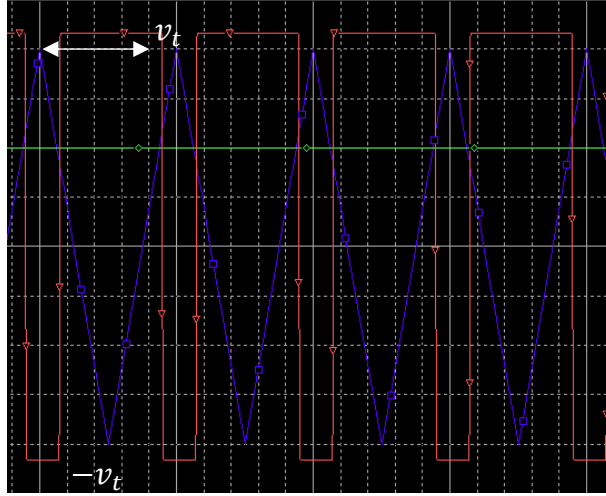


Figure 48 الإشارة المثلثية والإشارة المرجعية

معادلة الإشارة المثلثية الصاعدة

$$v = at + b, \text{ where } a = \frac{v_t - (-v_t)}{T/2} = \frac{4v_t}{T}$$

$$b = -v_t$$

$$v(t) = \frac{4v_t}{T}t - v_t$$

يكون خرج المقارن 1 طالما $u > v(t)$

$$u > \frac{4v_t}{T}t - v_t \Rightarrow t < \frac{T}{4} \left(\frac{u}{v_t} + 1 \right) \Rightarrow t \in \left[0, \frac{T}{4} \left(\frac{u}{v_t} + 1 \right) \right]$$

بالتالي تكون

$$\frac{\tau}{2} = \frac{T}{4} \left(\frac{u}{v_t} + 1 \right) \Rightarrow \alpha = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{u}{v_t} + 1 \right)$$

ولما كانت القيمة الوسطى للجهد لجسر H تعطى بالعلاقة $\bar{V} = (2\alpha - 1)V_{dc}$ بالتالي نجد

$$\bar{V} = (2\alpha - 1)V_{dc} = \left(2 \frac{1}{2} \left(1 + \frac{u}{v_t} \right) - 1 \right) V_{dc} = \frac{V_{dc}}{v_t} u$$

بالتالي يمكن نمذجة نظام المقارن مع الجسر بمعامل تناسبي $K = \frac{V_{dc}}{v_t}$ دخله هي الإشارة المرجعية u وخرجه هي القيمة الوسطى للجهد المطبق على نظام المحرك \bar{V} .

بالتطبيق العملي باستخدام النمذجة كان مطال الإشارة المثلثية 3.2 volt وتم اختيار $V_{dc} = 24 \text{ volt}$ بالتالي:

$$K = 7.5$$

6. 2. 2. تصميم قانس تيار (Current Measurements)

أولى خطوات تصحيح التيار هو قياس تيار خرج دائرة القيادة أي التيار المسحوب من المحرك بالتالي تم تصميم دائرة قانس تيار يكون خرجها كمون موافق لقيمة التيار المار بالحمل

6. 2. 2. 1. مبدأ عمل الدارة

لقياس تيار مار بحمل ما نضيف مقاومة قياس على التسلسل مع الحمل وهي عبارة عن مقاومة صغيرة جداً بحيث لا تؤثر بقيمة الجهد المطبق على طرفي الحمل من ثم قياس فرق الكمون على طرفيها وتضخيمه بحيث نحصل على كمون موافق للتيار $V_{measured} = R_{sens} \cdot I_{load}$ since R_{sens} too small $V_{measured} \approx I_{load}$

يتم اختيار مقاومة القياس بحيث تكون أصغر بعشر مرات تقريباً من الحمل الأومي $R_{sens} < \frac{R_{load}}{10}$.

6. 2. 2. 2. تحليل الدارة:

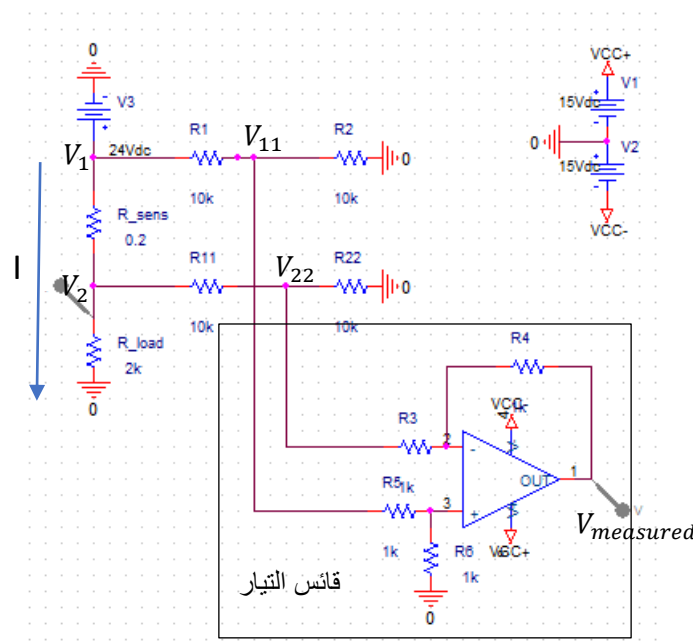


Figure 49 وصل دائرة قانس التيار مع الحمل

في البداية من كون كمون المنبع 24 volt ستكون قيمة كل من V_1 تساوي قيمة كمون المنبع و V_2 أقل بقليل كون R_{sens} صغيرة لا يمكن تطبيق جهد دخل على مضخم أكبر من كمون تغذيته وهو بحالتنا $\pm 15 \text{ volt}$ بالتالي يتم تقسيم الجهد لكل من V_1 و V_2 بنسبة متساوية ومناسبة بحيث يصبح كل منهما أقل من كمون تغذية المضخم أي

$$\begin{aligned} \text{first condition } |V_{11}| < 15, \quad |V_{22}| < 15 &\Rightarrow \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{R_{22}}{R_{11} + R_{22}} < \frac{15}{24} \\ \text{second condition } \frac{V_{11}}{V_1} = \frac{V_{22}}{V_2} &\Rightarrow R_{22} = R_2, \quad R_1 = R_{11} \end{aligned}$$

بالتالي يكون

$$V_1 - V_2 = \frac{R_2 + R_1}{R_2} (V_{11} - V_{22}) = n \cdot (V_{11} - V_{22}), \quad \text{where } n = \frac{R_2 + R_1}{R_2}$$

في الحقيقة يوجد شرط ثالث على اختيار مقاومات تقسيم الجهد وهو أن تكون أكبر بكثير من مقاومة القياس بحيث لا يمر فيها تيار تقريباً أي يكون تأثيرها شبه معدوم

$$R_{sens} \ll R_1, R_2$$

دائرة القائس

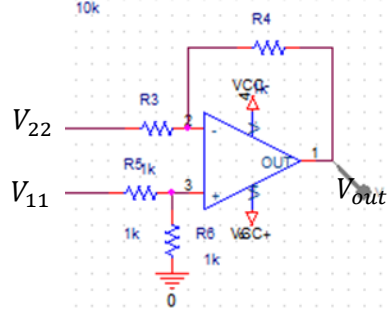


Figure 50 دائرة قائس التيار

$$\text{when } V_{11} = 0 \Rightarrow V_+ = 0 \Rightarrow V_- = 0 \Rightarrow -\frac{V_{22}}{R_3} = \frac{V_{out}}{R_4}$$

$$\text{when } V_{22} = 0 \Rightarrow \begin{aligned} V_+ &= \frac{R_6}{R_6 + R_5} V_{11} \\ V_- &= \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{out} \end{aligned} \Rightarrow V_+ = V_- \Rightarrow \frac{R_6}{R_6 + R_5} V_{11} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{out}$$

من 1 و 2 نجد

$$V_{out} = -\frac{R_4}{R_3} V_{22} + \frac{R_6}{R_6 + R_5} \frac{R_3 + R_4}{R_3} V_{11}$$

$$\text{when } I = 0 \Rightarrow V_1 = V_2 \Rightarrow V_{22} = V_{11}, \text{ and } V_{out} \text{ should be } 0$$

$$\text{then } \frac{R_6}{R_6 + R_5} \frac{R_3 + R_4}{R_3} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow \frac{R_3 + R_4}{R_6 + R_5} R_6 = R_4 \Rightarrow \text{we have to choose } \begin{aligned} R_6 &= R_4 \\ R_3 &= R_5 \end{aligned}$$

وتكون نسبة تضخيم المصحح بهذه الحالة

$$\begin{aligned} V_{out} &= A \cdot (V_{11} - V_{22}), \quad \text{where } A = \frac{R_4}{R_3} \\ I &= \frac{V_1 - V_2}{R_{sens}} = \frac{n}{R_{sens}} \cdot (V_{11} - V_{22}) \end{aligned} \Rightarrow K_S = \frac{V_{out}}{I} = A \cdot \frac{R_{sens}}{n}$$

ملاحظة عند التطبيق العملي على برنامج المحاكاة لاحظنا خطأً بنتيجة القياس سببه أن تقسيم الجهد غير مثالي بسبب إدخال القائس بين طرفي V_{11}, V_{22} بالتالي تم استخدام Buffers لمنع دائرة القائس من سحب تيار بالتالي أصبحت دائرة القائس المستخدمة من الشكل:

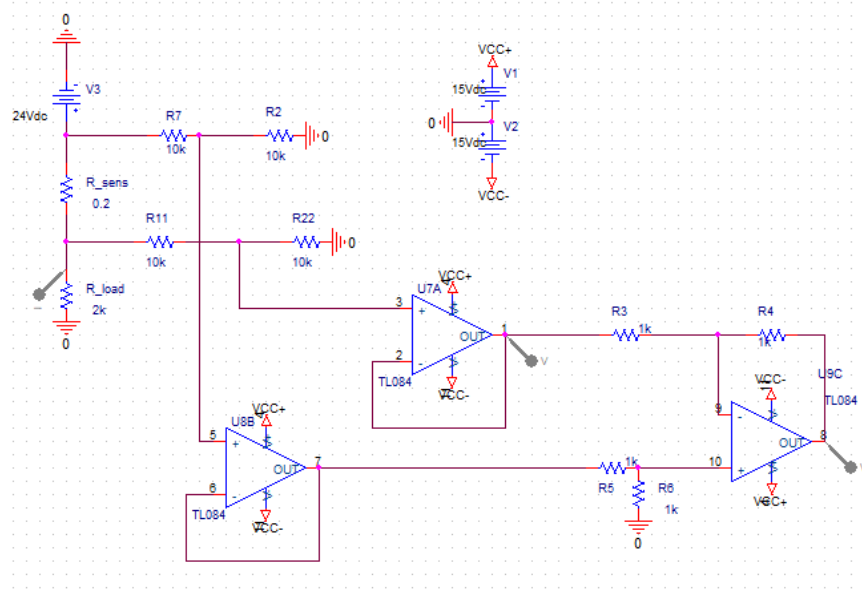


Figure 51 دائرة القائس بعد إضافة ال Buffers

3. 2. 2. 6. تصميم دائرة القائس

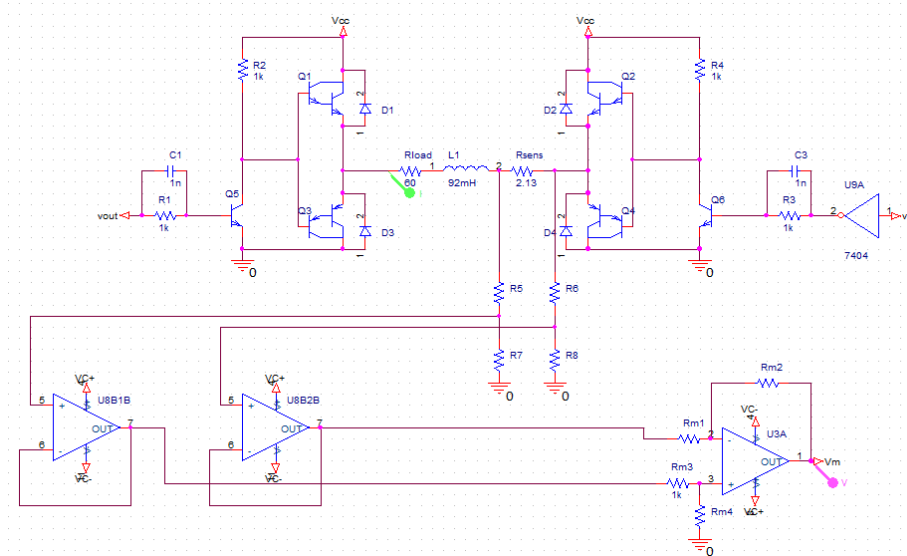


Figure 52 تطبيق دائرة القائس لقياس تيار الجسر

من أجل مقاومة حمل لطور المحرك $R = 60 \Omega$ وتغذية جسر $V_{dc} = 24 \text{ volt}$ تكون قيمة التيار الأعظمي المار بالحمل

$$I_{max} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{24}{60} = 0.4 \text{ A}$$

لكن بنمذجة الحلقة المفتوحة لدائرة التحكم وجدنا أن $I_{max} = 0.325 \text{ A}$ بالتالي تم اختيار نسبة للقائس

$$K_s = \frac{V_{ref}}{I_{max}} = \frac{1.3}{0.4} = 3.25 \Omega \Rightarrow A \cdot \frac{R_{sens}}{n} = 3.25$$

تم اختيار نسبة تقسيم جهد ليكون دخل مضخم العمليات للقائس أقل من جهد تغذيته بحالتنا (10, -10 volt)

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{4} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{4}$$

$$R_{22} = 5 \text{ k}\Omega, \quad R_{11} = 15 \text{ k}\Omega$$

واختيار R_{sens} بحيث لا تؤثر على تيار الحمل بنسبة أكثر من 5%

$$R_{sens} = 2.13 \Rightarrow I = \frac{V_{dc}}{R_{load} + R_{sens}} = 0.386 \text{ A} = 96\% \text{ of } I_{max}$$

$$\Rightarrow A = Ks * \frac{n}{R_{sens}} = 6.1 \Rightarrow \frac{R_6}{R_5} = 6.1 \Rightarrow R_6 = 6 \text{ k}\Omega, R_5 = 1 \text{ k}\Omega$$

6. 3. تصميم المصحح PI

6. 3. 1. دائرة المصحح

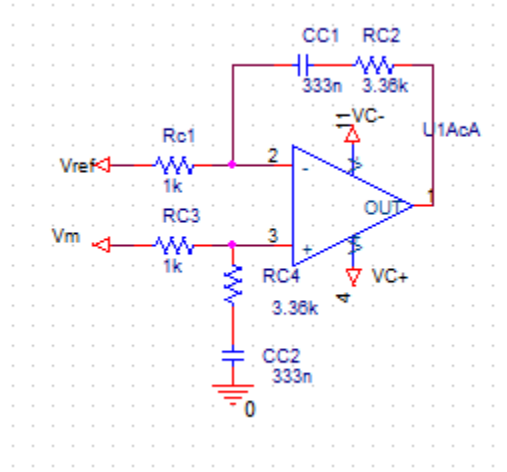


Figure 53 دائرة المصحح

$$V_- = \frac{R_1}{\frac{1}{C_1 s} + R_4 + R_1} V_{out}$$

$$\text{when } V_{ref} = 0 \Rightarrow V_+ = V_- \Rightarrow V_+ = \frac{\frac{1}{C_2 s} + R_3}{\frac{1}{C_2 s} + R_3 + R_2} V_m$$

$$\Rightarrow \frac{R_1}{\frac{1}{C_1 s} + R_4 + R_1} V_{out} = \frac{\frac{1}{C_2 s} + R_3}{\frac{1}{C_2 s} + R_3 + R_2} V_m$$

$$V_+ = 0 \Rightarrow V_- = 0$$

$$\text{when } V_m = 0 \Rightarrow \frac{V_{ref}}{R_1} = \frac{V_{out}}{\frac{1}{C_1 s} + R_4}$$

$$\Rightarrow C_{C1} = C_{C2}, R_{C2} = R_{C4}, R_{C1} = R_{C3}$$

$$V_{out} = \frac{R_{C2} + \frac{1}{C_{C1} s}}{R_{C1}} (V_{ref} - V_m)$$

$$\Rightarrow C(s) = \frac{R_{C2}}{R_{C1}} + \frac{1}{R_{C1} C_{C1} s} \Rightarrow K_p = \frac{R_{C2}}{R_{C1}}, K_i = \frac{1}{R_{C1} C_{C1}}$$

2. 3. 6. تصميم عناصر دائرة المصحح

كما وجدنا سابقاً إن تردد الإشارة المرجعية الموافقة للسرعة الأعظمية 300 RPM يساوي 250 Hz

$$f_{ref} = 250 \text{ Hz} \Rightarrow T_{ref} = 4 \text{ ms}$$

بالتالي فترة تطبيق كل من الجزء الموجب والسالب من الإشارة المرجعية هو 2 ms .

لتحقيق عزم دوران يكفي لتدوير المحرك نختار زمن استجابة:

$$t_r = 0.2 * 0.5 * T_{ref} = 0.4 \text{ ms}$$

تم حساب K_p و K_i باستراتيجية حذف صفر مع قطب، فكانت قيم K_p و K_i الموافقة لزمن الاستجابة المطلوب:

$$K_p = 20.5, K_i = 13368$$

وتابع التحويل الناتج للنظام:

$$H(p) = \frac{36.167}{p + 1444.67}$$

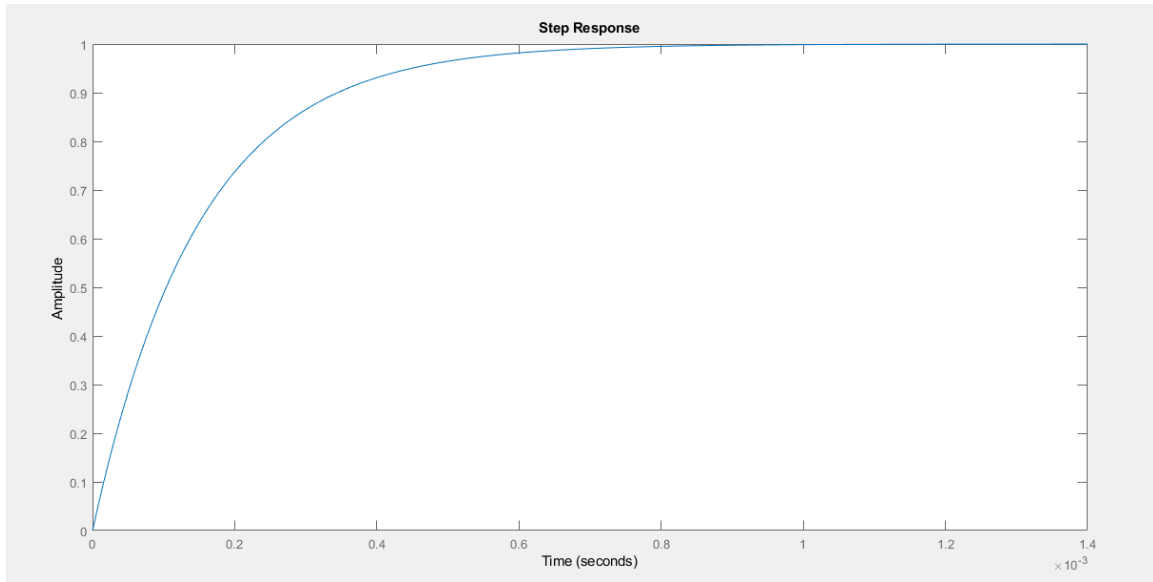


Figure 54 استجابة النظام بعد التصحيح لدخل خطوي

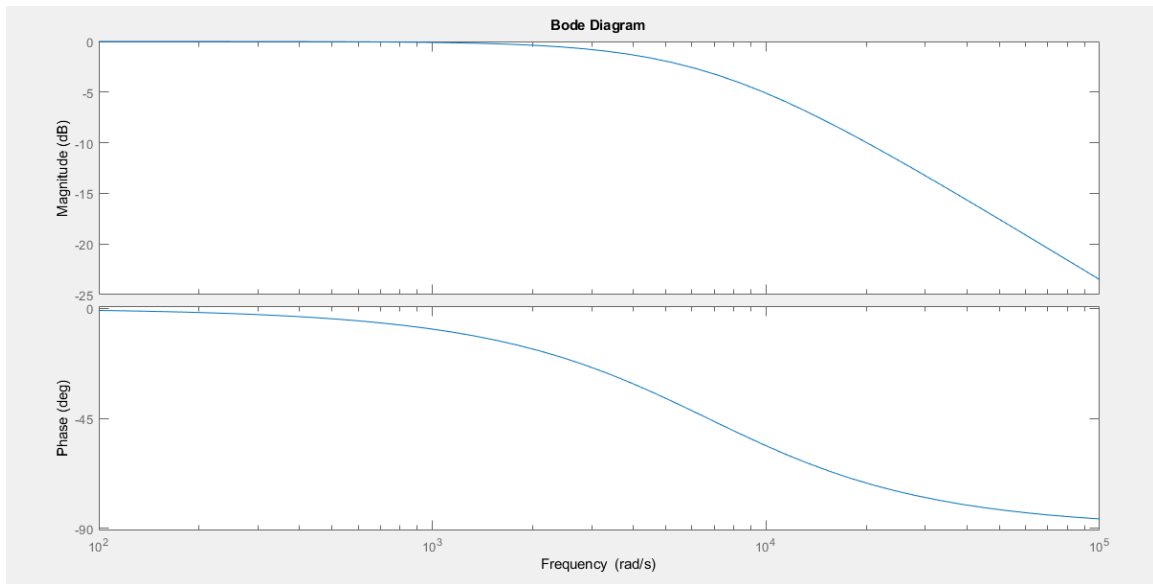


Figure 55 مخطط بود للنظام بعد التصحيح

من مخطط بود للنظام الناتج بعد التصحيح نلاحظ أنه يتصرف كنظام بقطب وحيد مستقر.

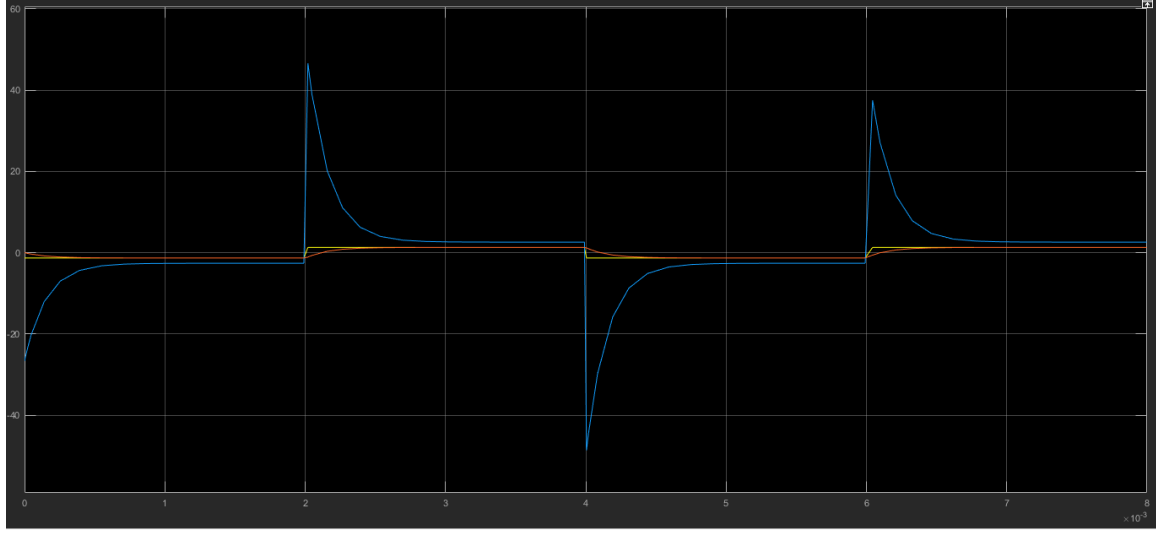


Figure 56 خرج المصحح (الأزرق), إشارة الدخل (الأصفر), خرج النظام (الأحمر)

نلاحظ أن خرج المصحح (Command) يصل إلى 80 volt وهو أكبر بكثير من جهد إشباع المصحح عملياً بالتالي لن نكون قادرين على تحقيق زمن استجابة من رتبة $t_r = 0.4 \text{ ms}$.

بالتالي نبحث عن أفضل زمن استجابة يمكن تحقيقه عملياً من قبل المصحح:

$$t_r = 1.36 \text{ ms}$$

فكانت قيم K_p و K_i الموافقة لزمن الاستجابة المطلوب:

$$K_p = 4.5, K_i = 2991$$

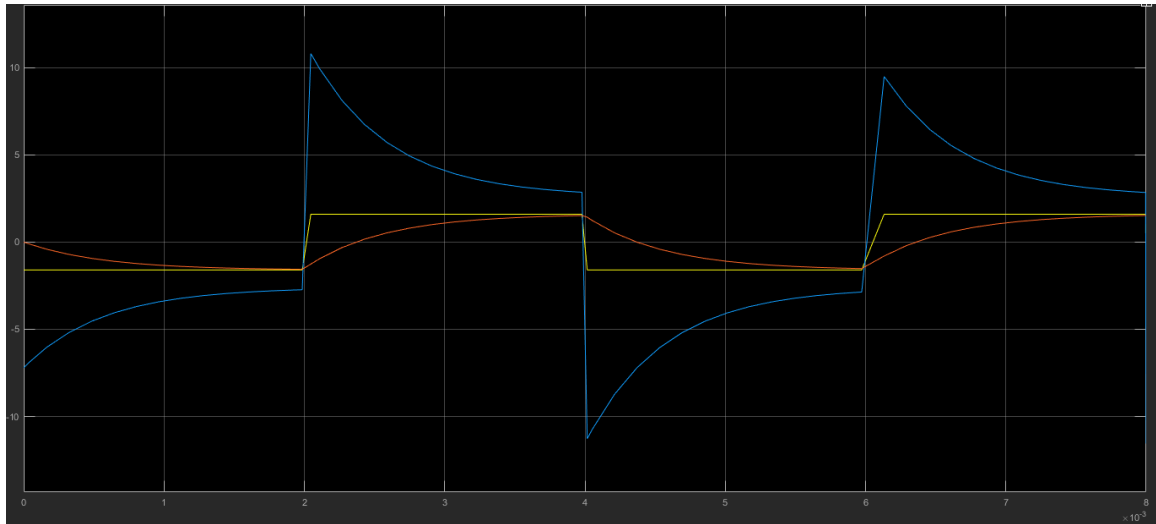


Figure 57 خرج المصحح (الأزرق), إشارة الدخل (الأصفر), خرج النظام (الأحمر)

اعتماداً على المحاكاة المطبقة تم اختيار قيم دارة المصحح:

$$R_{C2} = 4.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{C1} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C_{C1} = 330 \text{ nF}$$

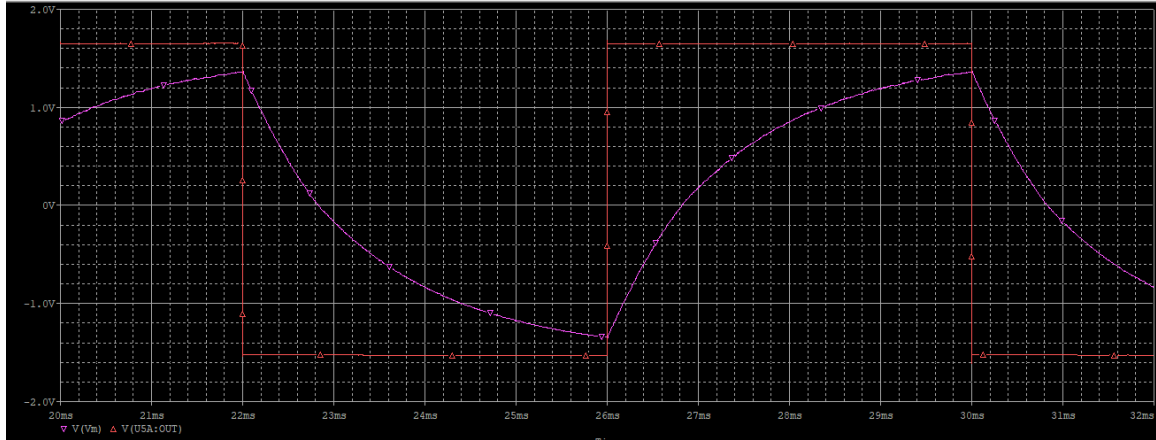


Figure 58 استجابة التيار

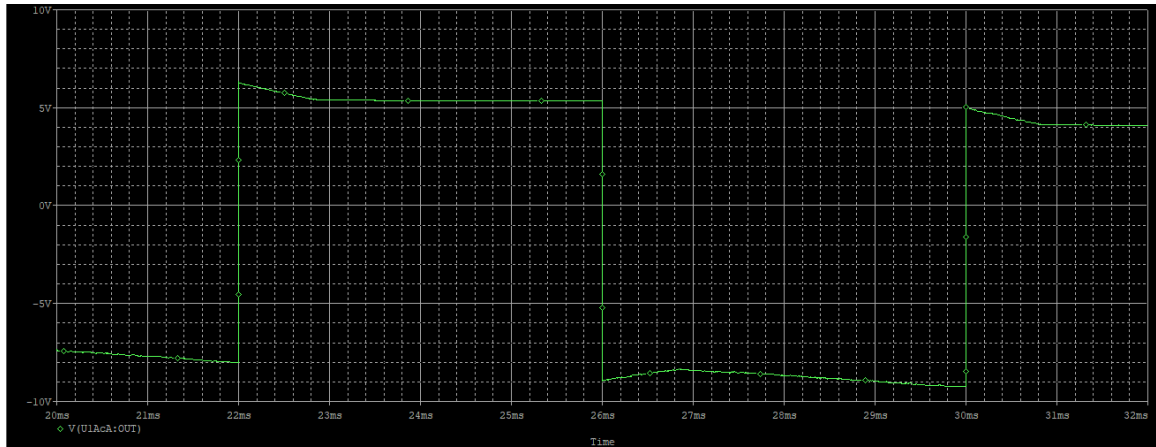


Figure 59 خرج المصحح (command)

7. التطبيق العملي

7.1. دارة التغذية السالبة والموجبة



Figure 60 إشارتي التغذية السالبة والموجبة

نلاحظ أن خرج دارة التغذية السالبة مستقر على 10 volt بدون أي تعرجات وكذلك الأمر بالنسبة للتغذية الموجبة المستقرة عند 9 volt

7.2. دارة الإشارة المثلثية



Figure 61 الإشارة المثلثية

بالتطبيق العملي حصلنا على إشارة مثلثية بتردد $F_{practical} = 12.6 \text{ kHz}$ وهو قريب من القيمة النظرية $F_{theoretical} = 13 \text{ kHz}$ ويعود هذا الاختلاف إلى الارتياح في قيم العناصر المستخدمة.

7. 3. دائرة voltage to frequency

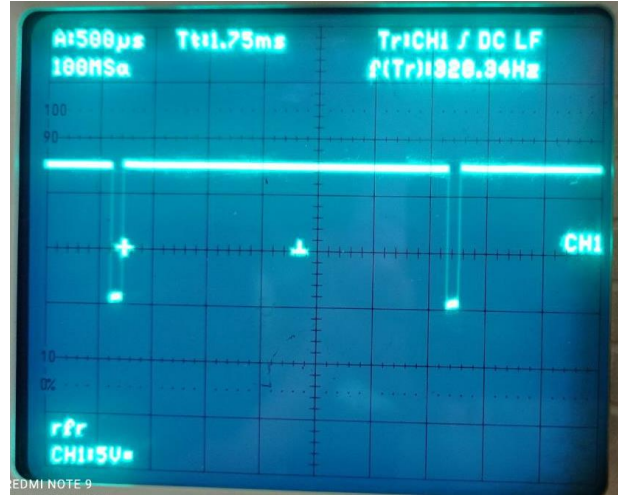
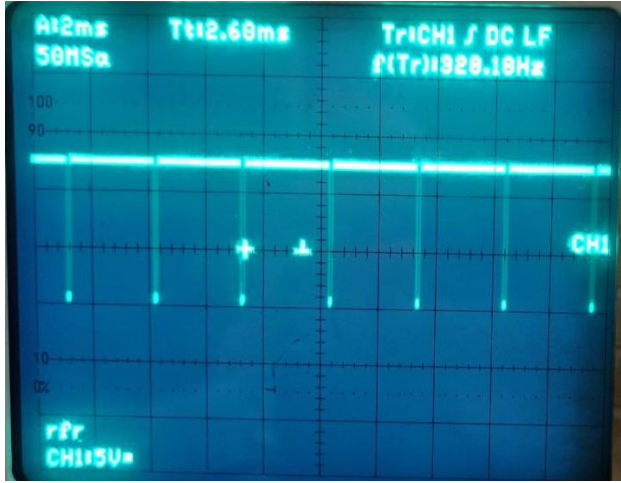


Figure 62 إشارة الـ voltage to frequency

نلاحظ اختلاف بين النتائج العملية وبين نتائج المحاكاة حيث أن مطال الإشارة غير متناظر بالتالي هذا أدى لتغير صغير بعلاقة جهد الدخل بتردد الخرج.
لضمان خطية العلاقة بين الجهد والتردد تم تجربة عدة قيم لجهد الدخل وقياس التردد الناتج ورسم منحنى التردد بدلالة الجهد:

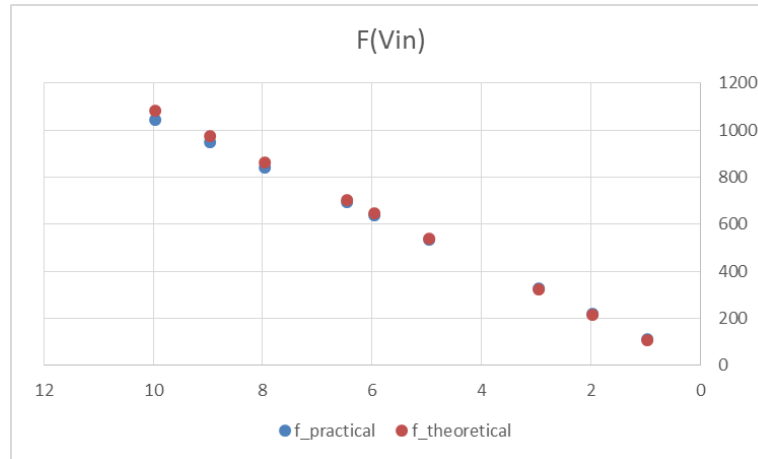


Figure 63 منحنى جهد الدخل بدلالة تردد الخرج

نلاحظ أن النتائج العملية قريبة جداً من النتائج النظرية وأن العلاقة خطية بين جهد الدخل وتردد الخرج عملياً.

7. 4. إشارتي القيادة المترابعتين

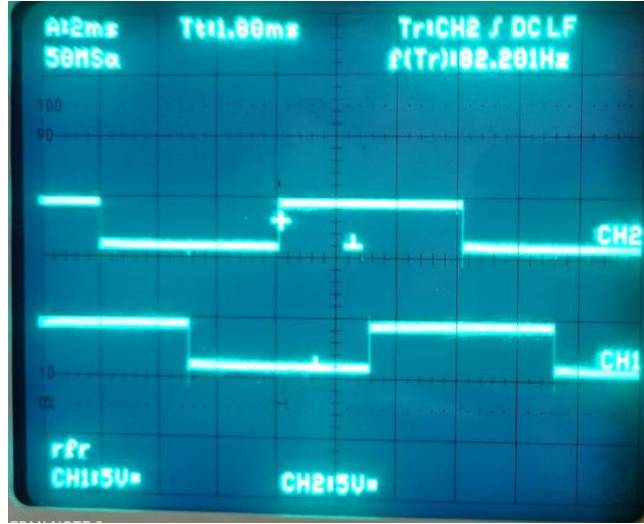


Figure 64 إشارتي القيادة

عملياً تم توليد إشارات مرجعية مترابطة لمطابقة لنتيجة النمذجة والنتائج النظرية.

7. 5. الحلقة المفتوحة

لتدوير المحرك بالحلقة المفتوحة تم مقارنة إشارات القيادة المرجعية مع الإشارة المثلثية لتوليد نبضات PWM التي تقود جسر H.



Figure 65 إشارتي القيادة المحملتان بنبضات PWM

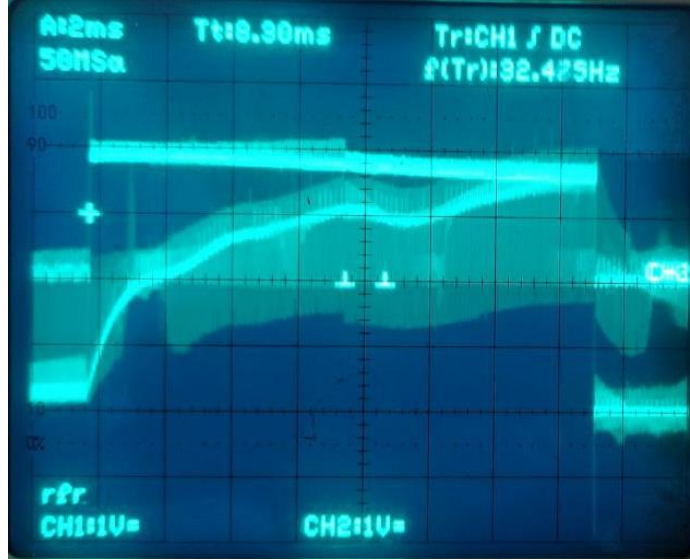


Figure 66 استجابة التيار من أجل تردد 32.4 HZ

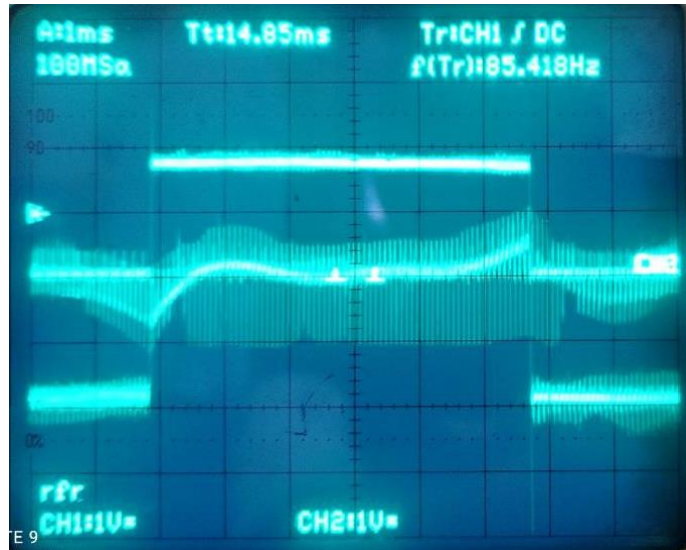
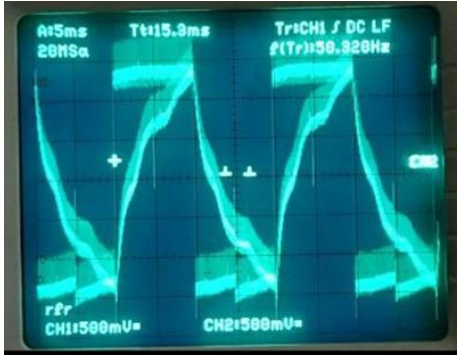


Figure 67 استجابة التيار من أجل تردد 85 HZ

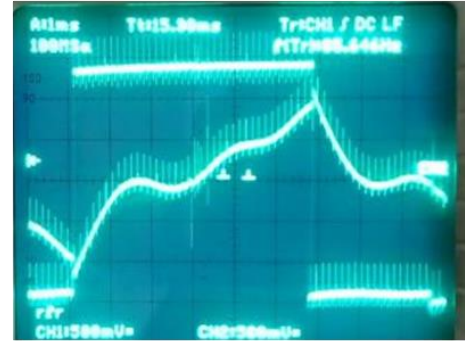
نلاحظ أنه عند إشارة مرجعية بتردد 32.475 Hz فإن التيار يقوم بملامحة الإشارة المثالية باستجابة مقبولة ولكن عند إشارة مرجعية بتردد 85.418 Hz فإن التيار لا يصل إلى القيمة المرجعية مع ذلك فإن المحرك يدور في الحالتين ونستطيع الاستفادة من هذه الفكرة بتصميم مصحح عملياً بزم من استجابة أكبر من الزمن المحسوب نظرياً.

7.6. الحلقة المغلقة:

بتطبيق المصحح عملياً كانت النتائج كما يلي:



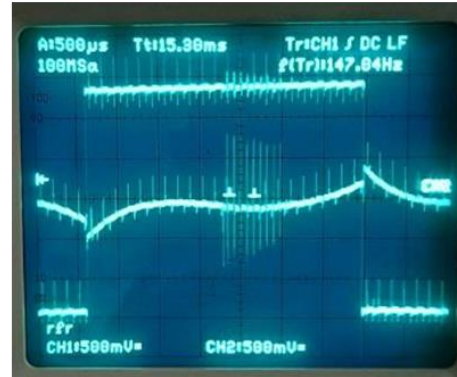
50 Hz



85 Hz

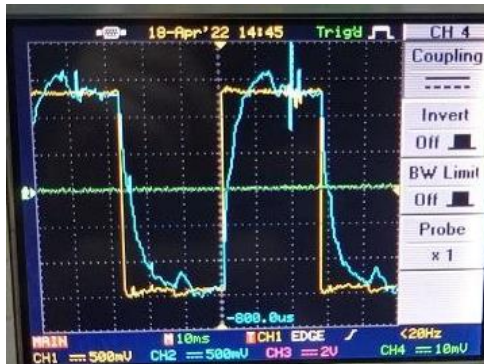


74 Hz

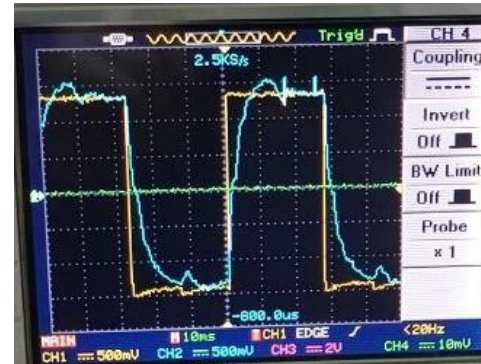


147 Hz

توضح كل من الصور السابقة ملاحظة التيار للإشارة المرجعية عند ترددات معينة، نلاحظ عند زيادة التردد مع ثبات جهد الجسر أن التيار لا يصل للقيمة المرجعية رغم أن المحرك يستمر في الدوران، ذلك لأن دوران المحرك يتم دون وجود حمل ميكانيكي يتطلب عزمًا كبيراً بالتالي التيار الذي يستجده كافي للدوران.



استجابة التيار عند جهد جسر 30 volt



استجابة التيار عند جهد جسر 24 volt

تم اختبار استجابة التيار كتابع لجهد الجسر عند تردد 20 Hz، فنلاحظ أن التيار يستمر في ملاحظة الإشارة المرجعية حتى عند زيادة جهد الجسر بالتالي فنظام الحلقة المغلقة هو نظام صلب (Robust).

الخاتمة

تم في هذا المشروع تصميم وتنفيذ دائرة قيادة لمحرك خطوي 42BYGH801 بحيث استطعنا تدويره حتى سرعة 150 RPM بالحلقة المفتوحة. تم بعد التحكم باستجابة التيار باستخدام مصحح PI بالحلقة المغلقة حيث من خلال الدراسة لنموذج المحرك وجدنا أنه لا يمكن الوصول عملياً لزمن استجابة $t_r = 0.4 \text{ ms}$ ، فخفضنا زمن الاستجابة حتى $t_r = 1.36 \text{ ms}$ وهو أفضل زمن استجابة ممكن بإمكانيات المصحح المستخدم.

Sedra,A.S, Smith,K.C.(1982). *Microelectronic Circuits*. OXFORD UNIVERSITY PRESS.

<https://blog.inventables.com/p/stepper-motors.html>

<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/everything-about-stepper-motors.html>