

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни

«Загальні знання дистанційно пілотованих суден:

Схемотехніка безпілотних літальних апаратів»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 4 – Електропривод БПЛА

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Огляд електродвигунів що можуть застосовуватись в приводі БпЛА.
2. Властивості та характеристики безщіткових електродвигунів.
3. Електронний контролер обертів електродвигуна ESC.
4. Принципи керування бездатчиковими безколекторними електродвигунами.
5. Схема регулятора обертів електродвигуна.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) / КНТ, 2023. – 126 с.
2. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ “КОМАНДИРУ ПІДРОЗДІЛУ ПО ЗАСТОСУВАННЮ БпАК ТАКТИЧНОГО РІВНЯ” (за досвідом проведення ООС (раніше АТО), О.О. Павлишен (керівник розробки), Г.М. Тимчук, Т.В. Цокур, 2018. – 72 с.
3. UAV Based Remote Sensing, Volume 2, Special Issue Editors Felipe Gonzalez, Toro Antonios Tsourdos, 2017. – 406 p.
4. Aircraft General Knowledge 2 - Electrics and Electronics - 2014

Допоміжна література:

1. Unmanned aircraft systems : UAVS design, development and deployment / Reg Austin. This edition first published 2010. – 365 p.
2. Theory, design, and applications of unmanned aerial vehicles / A. R. Jha. Boca Raton, FL : CRC Press / Taylor & Francis Group, [2016]. 317 p.
3. SMART AUTONOMOUS AIRCRAFT Flight Control and Planning for UAV. Yasmina Bestaoui Sebbane, Université d'Evry, France. 2016 by Taylor & Francis Group, LLC – 434 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/\[bpla\]_ua_dynamics_brochure.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/[bpla]_ua_dynamics_brochure.pdf)
2. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/\[bpla\]_zastosuvannya_bpak_takty%60chnogo_rivnya.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/[bpla]_zastosuvannya_bpak_takty%60chnogo_rivnya.pdf)
3. <https://defence-ua.com/tags/389/>

Текст лекції

1. Огляд електродвигунів що можуть застосовуватись в приводі БпЛА.

На даний час залишається актуальною проблема створення безпілотного літального апарату без двигуна внутрішнього згорання, який би не поступався апаратам з такими двигунами за дальністю польоту, швидкістю, взліною масою, та перевищував би за рівнем шуму, можливостями керування, ресурсом і т.д.

Застосування електродвигунів на БпЛА має наступні переваги:

- високий коефіцієнт корисної дії;
- значний ресурс електродвигуна;
- система приводу в цілому менш вибухонебезпечна та пожеже небезпечна;
- менше рівень теплового випромінювання;
- менше рівень шуму;
- більш економічна;
- високі можливості керування.

В якості електричних двигунів застосовуються наступні типи електричних машин: асинхронні машини, синхронні машини, колекторні машини, вентильні машини. Проведемо аналіз переваг та недоліків вказаних електричних машин з точки зору застосування в якості електроприводу БпЛА.

Асинхронна машина — електрична машина змінного струму, у якій швидкість обертання ротора не дорівнює швидкості обертання магнітного поля статора (асинхронна). Найчастіше застосовуються трифазні асинхронні машини, які працюють як електродвигуни, потужністю від частки вата до десятків тисяч кіловат. Основними перевагами є:

- простота конструкції;
- відносно невисока вартість асинхронних двигунів в порівнянні з іншими видами моторів;
- невибагливість і простота в експлуатації;
- висока надійність конструкції;
- високий ККД, завдяки відсутності втрат на тертя;
- відносно великий коефіцієнт потужності.

Як і інші технічні пристрої, асинхронний двигун має свої недоліки, деякі з яких притаманні лише його окремим видам:

- малий пусковий момент при досить великому струмі у двигунів з короткозамкненим ротором;
- втрати потужності при здійсненні контролю швидкості обертання;
- зменшення крутного моменту при збільшенні навантаження.

Розглянувши недоліки асинхронних двигунів робимо висновок про можливість але недоцільність його застосування в якості приводу БпЛА з наступних причин: ковзання не дозволить точно керувати обертами двигуна..

Синхронна машина - це електрична машина змінного струму, частота обертання ротора якої дорівнює частоті обертання магнітного поля в повітряному зазорі. Синхронні двигуни мають такі переваги:

- можливість роботи при $\cos \varphi = 1$; це призводить до поліпшення $\cos \varphi$ мережі, а також до скорочення розмірів двигуна, так як його струм менше струму асинхронного двигуна тієї ж потужності. При роботі з випереджаючим струмом синхронні двигуни служать генераторами реактивної потужності, що надходить в асинхронні двигуни, що знижує споживання цієї потужності від генераторів електростанцій;

- меншу чутливість до коливань напруги, так як їх максимальний момент пропорційний напрузі першого ступеня (а не квадрату напруги);

- стабільність частоти обертання незалежно від механічного навантаження на валу.

Недоліками синхронних двигунів є:

- складність конструкції;

- складність пуску в хід;

- труднощі з регулюванням частоти обертання, яке можливе лише шляхом зміни частоти живлячої напруги.

Провівши аналіз недоліків синхронних двигунів робимо висновок, що застосування в якості приводу БпЛА можливо, але небажано в наслідок складного пуску.

Колекторний електродвигун – це електрична машина, в якій датчиком положення ротора і перемикачем струму в обмотках є один і той же пристрій – комутатор (щітково-колекторний вузол). Колекторні двигуни є універсальними. Вони можуть бути як змінного так і постійного струму. Ці двигуни мають змогу плавно змінювати швидкість обертання приводу, завдяки чому вони є дуже поширеними. Переваги колекторних електродвигунів:

- простий пристрій;

- висока швидкість обертання, до 20 000 об / хв.;

- високий обертальний момент навіть на малих обертах;

- невисока вартість;

- можливість регулювати швидкість обертання в широких межах;

- невисокі пускові струми.

Недоліки колекторних електродвигунів:

- високий рівень шумів при роботі, особливо на високих швидкостях;

- необхідність частого обслуговування щіточко-колекторного вузла;

- нестабільність показників при зміні навантаження;

- висока частота відмов через наявність колектора і щіток, малий термін служби цього вузла.

Застосування колекторного двигуна можливе в якості приводу БпЛА, але не бажане через недоліки щітково-колекторного вузла.

Вентильний (безщітковий) електродвигун — тип синхронної машини, реалізований в замкнутій системі з використанням датчика положення ротора, системи керування (перетворювача координат) і силового напівпровідникового перетворювача. Часто їх також називають безконтактними (безколекторними) двигунами постійного струму або оберненою машиною постійного струму. Цей

тип двигуна створений з метою поліпшення властивостей двигунів постійного струму.

У вентильному двигуні (ВД) індуктор знаходиться на роторі (у вигляді постійних магнітів), якірна обмотка знаходиться на статорі. Напряг живлення обмоток двигуна формується залежно від положення ротора. Якщо в двигунах постійного струму для цієї мети використовувався колектор, то у вентильному двигуні його функцію виконує напівпровідниковий комутатор.

Основною відмінністю ВД від синхронного двигуна є його самосинхронізація за допомогою датчик положення ротора (ДПР), внаслідок чого у ВД, навпаки, частота обертання поля пропорційна частоті обертання ротора, а частота обертання ротора залежить від напруги живлення. Останнім часом, цей тип двигунів швидко набуває популярність, проникаючи в багато галузей промисловості та транспорту.

Вентильні двигуни з електронними системами керування об'єднують у собі найкращі якості безконтактних двигунів і двигунів постійного струму. Переваги:

- висока швидкодія і динаміка, точність позиціонування;
- широкий діапазон зміни частоти обертання;
- безконтактність і відсутність вузлів, що вимагають техобслуговування — безколекторна машина;
- можливість використання у вибухонебезпечному і агресивному середовищі;
- велика перевантажувальна здатність по моменту;
- високі енергетичні показники (ККД понад 90 % і $\cos\varphi$ понад 0,95);
- великий термін служби, висока надійність і підвищений ресурс роботи за рахунок відсутності ковзних електричних контактів;
- низький перегрів електродвигуна, при роботі в режимах з можливими перевантаженнями.

Недоліки:

- відносно складна система керування двигуном;
- висока вартість двигуна, обумовлена використанням дорогих постійних магнітів в конструкції ротора.

Використання вентильного електродвигуна в електроприводі БпЛА є найбільш раціональним рішенням. Сучасні мікроконтролери дозволяють реалізувати складні та ефективні алгоритми керування вентильним двигуном. Висока вартість вентильних двигунів не набагато здорожує весь літальний апарат, оскільки вартість силової установки не перевищує 10% вартості всього безпілотного комплексу.

2. Властивості та характеристики безщіткових електродвигунів.

При виборі безщіткового двигуна є два варіанти:

1. Двигун, в якому три статорні обмотки рівномірно намотані, а наведена електрорушійна сила (ЕРС) має трапецієподібну форму, називається

безщітковим двигуном постійного струму (Brushless Direct Current Motor - BLDC).

2. Двигун з обмоткою, яка розподілена на статорі синусоїдально, та наведена ЕРС має синусоїдальну форму, називається безщітковим двигуном змінного струму (Brushless Alternating Current Motor - BLAC), також його називають синхронним двигуном з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) [14].

Безщітковий двигун постійного струму - це вдосконалена версія щіткового двигуна постійного струму. Відсутність щіток дає двигунам BLDC можливість обертатися з високою швидкістю та підвищувати ефективність. BLDC двигун має дві основні частини – ротор (це частина, яка рухається і має постійні магніти) і статор (стаціонарна частина, складається із котушок з обмотками) (рисунок 1.1) [15].

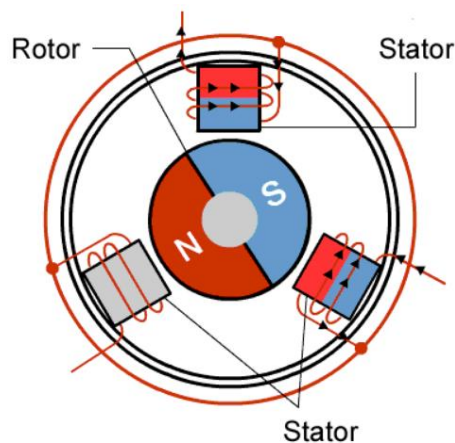


Рисунок 1. Улаштування BLDC двигуна

Переваги BLDC двигуна:

- можливість працювати з більшою швидкістю і виробляти постійний крутний момент;
- високий ресурс;
- ККД майже 85-90%;
- здатність реагувати на механізми управління на високих швидкостях;
- відсутність іскріння на знижений рівень шуму;
- легкість управління двигуном (використання контролера BLDC)
- здатність до самозапуску;
- охолоджується за допомогою кондукції і не потребує додаткових механізмів охолодження [15].

Синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM) можна розглядати як аналог безщіткового двигуна змінного струму. PMSM двигун також складається з постійних магнітів на роторі і статора з намотаними котушками (рисунок 1.2). Відмінність від BLDC полягає у формі хвилі наведеної ЕРС, яка має синусоїдальний характер, тому що котушки намотуються на статор синусоїдальним способом. Переваги PMSM двигунів:

- більш висока ефективність, ніж безщіткові двигуни постійного струму (BLDC);
- немає пульсації обертального моменту при комутації двигуна;
- більш високий обертальний момент;
- більш надійний і менш високий рівень шуму ніж асинхронні двигуни;
- висока продуктивність як на високих так і на низьких швидкостях обертання;
- низька інерція ротора полегшує управління;
- ефективне розсіювання тепла;
- компактність та низька вага двигуна [15].

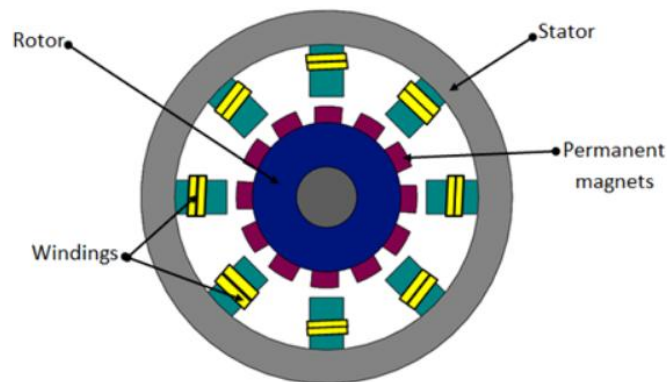


Рисунок 2. Улаштування PMSM двигуна

Важливий момент в роботі без щіткових двигунів це спосіб визначення положення ротора. Правильний час для включення фазного струму двигуна (комутація двигуна) важливий для коректної роботи машини. Існує два методи визначення положення ротора: з допомогою датчиків Холла та з допомогою наведеної ЕРС на незадіяній котушці статора.

У двигуні BLDC положення ротора зазвичай визначається набором 3 датчиків Холла. Комутація досягається шляхом шестиступеневого процесу. Це призводить до невеликих перерв у комутації, що, в свою чергу, викликає пульсацію обертального моменту (періодичне збільшення / зменшення обертового моменту двигуна) наприкінці кожного кроку.

Двигуни PMSM працюють з одним датчиком Хола, оскільки комутація є постійною. Отже, положення ротора контролюється кожною мить, вимірюється датчиком і передається до контролера двигуна PMSM.

Особливості алгоритму керування BLDC двигуна:

- керування двигуном за допомогою шестиступеневої послідовності комутації;
- виявлення магнітного кута ротора з кроком в 60 градусів;
- у випадку без сенсорного керування кут комутації визначають за допомогою вимірювання ЕРС фазової напруги.

На рисунку 1.3 показані часові діаграми напруг у фазах двигуна BLDC сформовані з допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ - PWM) та ідеальні відфільтровані фазні напруги після зняття несучої ШІМ.

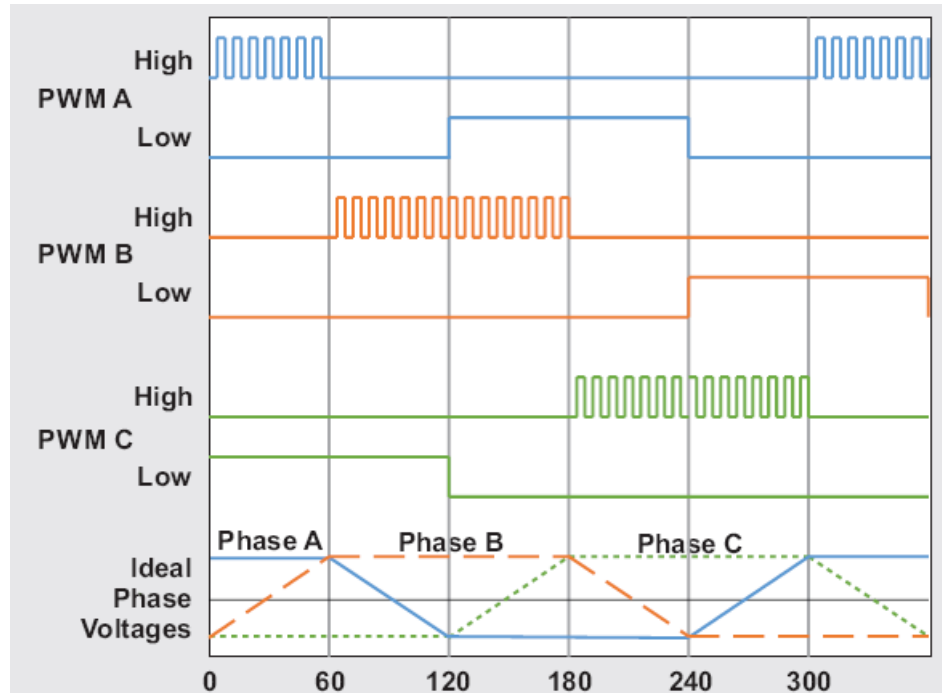


Рисунок 3. Часові діаграми напруг при трапецевидному керуванні

Особливості алгоритму керування PMSM двигуна:

- керування двигуном здійснюється синусоїдальними фазовими напругами або струмами;
- визначення кута магнітного поля ротора в межах 1-5-градусної мінімальної точності для забезпечення максимального крутного моменту;
- у випадку без сенсорного керування магнітний кут ротора визначається на основі фазних напруг і фазних струмів двигуна.

На рисунку 4 показані часові діаграми напруг у фазах двигуна PMSM сформовані з допомогою ШІМ та ідеальні відфільтровані фазні напруги після зняття несучої ШІМ.

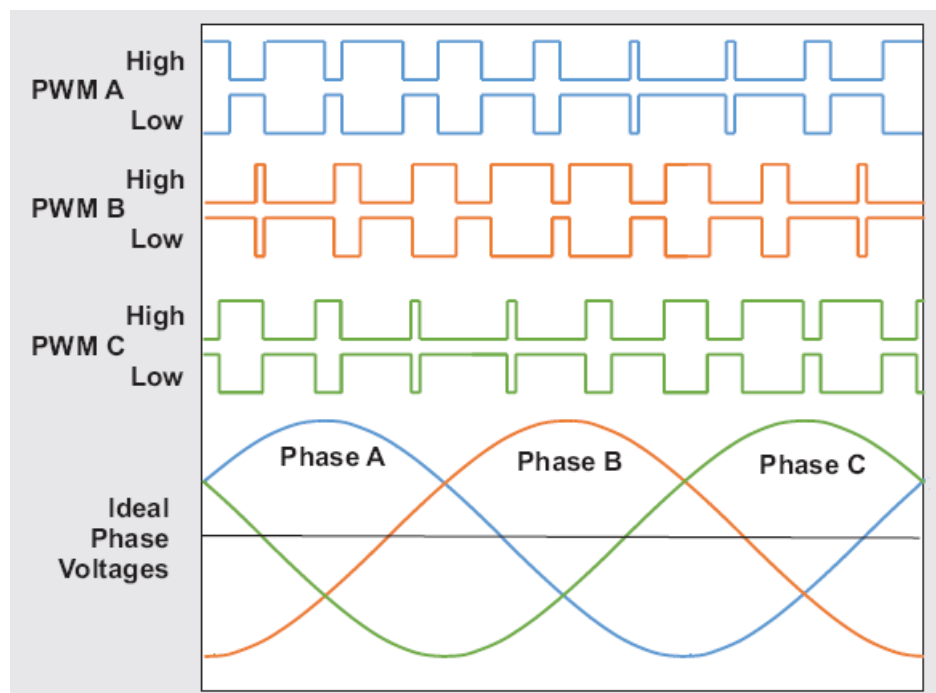


Рисунок 4. Часові діаграми напруг при синусоїдальному керуванні

Шіроотно-імпульсна модуляція (ШИМ), яка приводить в дію силовий каскад в електронному регуляторі швидкості обертів двигуна (Electronic Speed Controller – ESC), буде відрізнятися в залежності від типу управління. На рисунках 1.3 та 1.4 типові діаграми ШИМ з верхньої та нижньої сторони для трьох фаз і відповідні ідеальні відфільтровані фазні напруги після зняття несучої ШИМ при роботі двигуна в трапецієподібному або синусоїдальному керуванні [15].

Загальна проблема з трапецієподібним управлінням полягає в тому, що пульсація крутного моменту і сплеск струму виникають при кожній комутації.

Ця пульсація крутного моменту знижує ефективність і може привести до вібрації; і того, і іншого можна уникнути за допомогою синусоїдального контролю.

Напруга в шині постійного струму, яке зазвичай використовується для ESC, коливається в межах від 7,4 В до 22,4 В, а струм постійного струму від літій-полімерної батареї (LiPo), як правило, становить від 10 А до 20 А.

Бажана частота ШИМ для модулів ESC становить від 30 кГц до 60 кГц через відносно низьку індуктивність високошвидкісних двигунів та можливі перешкоди на сенсорних платах. Це потрібно враховувати при виборі контролера, оскільки потрібно забезпечити роботу системи ESC в режимі реального часу. Це може робити це шляхом налаштування повного алгоритму управління двигуном у програмному чи апаратному забезпеченні.

Однією із переваг двигуна PMSM є відсутність пульсацій, що робить ці двигуни більш ефективними, ніж BLDC. У двигунів PMSM є кожен атрибут двигуна BLDC з додатковою перевагою меншого рівня шуму, відсутності пульсації обертового моменту та підвищення ефективності.

Вибір типу двигуна, як правило, базується на алгоритмі управління двигуном, наприклад, трапецієподібним або полевым управлінням (FOC). Спосіб намотки котушок статора двигуна також впливає, який алгоритм управління забезпечить найкращу ефективність двигуна. Обраний алгоритм управління впливає на характеристики польоту літального апарату на основі алгоритму. Керуванню без датчиків Холла часто надається перевага, оскільки вони збільшують проектну вартість і покращують надійність системи порівняно з механічним датчиком швидкості. Таким чином, в якості тягових електродвигунів для БпЛА типу конвертоплан раціонально застосувати PMSM двигун без датчиків Холла з системою керування FOC.

3. Електронний контролер обертів електродвигуна ESC.

Електронний контролер обертів електродвигуна (electronic speed controller) - пристрій для управління оборотами електродвигуна, що застосовується на БпЛА з електричною силовою установкою. Дозволяє плавно варіювати електричну потужність, що подається на електродвигун. На відміну від більш простих резистивних регуляторів ходу, які управляли потужністю двигуна шляхом включення в ланцюг послідовно з мотором активного навантаження, що перетворює надлишкову потужність в тепло, електронний регулятор ходу володіє значно більш високим ККД, не витрачаючи енергію акумуляторної батареї на даремний нагрів.

Регулятори обертів безколекторного двигуна є самостійним пристроєм на основі мікроконтролера. Незважаючи на зовнішню простоту задачі, що вирішується — комутувати струм в обмотках безколекторного двигуна, мікроконтролер регулятора працює за дуже складним алгоритмом.

Сучасний регулятор має:

- автоматично визначати величину напруги силової батареї;
- мати захист від перевантаження струмом;
- мати захист від запуску при механічно заблокованому двигуні;
- автоматично підлаштовуватись під кількість полюсів конкретного двигуна;
- мати захист від зриву синхронізації фази.

Останні два пункти, мабуть, слід розкрити докладніше. Залежно від конструкції двигун може містити різну кількість полюсів котушок статора і магнітів ротора. Комутація струму в обмотках має відбуватися синхронно (у фазі) з переміщенням магнітів ротора, як би "підганяючи" їх. Якщо алгоритм комутації не відповідає числу полюсів або регулятор намагається надати двигуну прискорення, яке двигун не може розвинути через слабкі магніти або невдалу конструкцію, відбувається зрив синхронізації, "проскок" фази комутації обмоток статора щодо реального положення магнітів ротора. При зриві синхронізації рівномірний високочастотний свист двигуна, що працює, порушується клацаннями або хрипінням, іноді можна візуально спостерігати ривки в обертанні пропелера. Зрив синхронізації може статися також при просіданні силової напруги живлення в момент пікового навантаження.

Крім вищезазначених опцій, регулятори для квадрокоптерів повинні забезпечувати особливо гострий відгук моторів на зміни сигналів, що управляють, що надходять з контролера. Від цього безпосередньо залежить стабільність та керованість мультикоптера. З іншого боку, квадрокоптеру не потрібні літакові режими плавного розгону та гальмування пропелера. Навпаки, такі режими шкідливі. Тому для використання на квадрокоптерах розроблено спеціальні регулятори. Точніше розроблено спеціальні прошивки для мікроконтролера в регуляторі. З відкритих проектів прошивок найбільш популярні SimonK і BLHeli. При бажанні та наявності досвіду можна самостійно прошити відповідні регулятори, проте в даний час можна легко придбати готові, прошиті потрібною прошивкою контролери (рис. 5).

Регулятори зазвичай кріплять зовні на промені рами, забезпечуючи їм гарне обдування.

Окремо слід згадати спеціальні комбо-регулятори для квадрокоптерів, коли чотири регулятори та джерело живлення бортової електроніки змонтовані в одному корпусі (рис. 6). По суті, це чотири однакові незалежні регулятори, які об'єднані лише загальною друкованою платою.

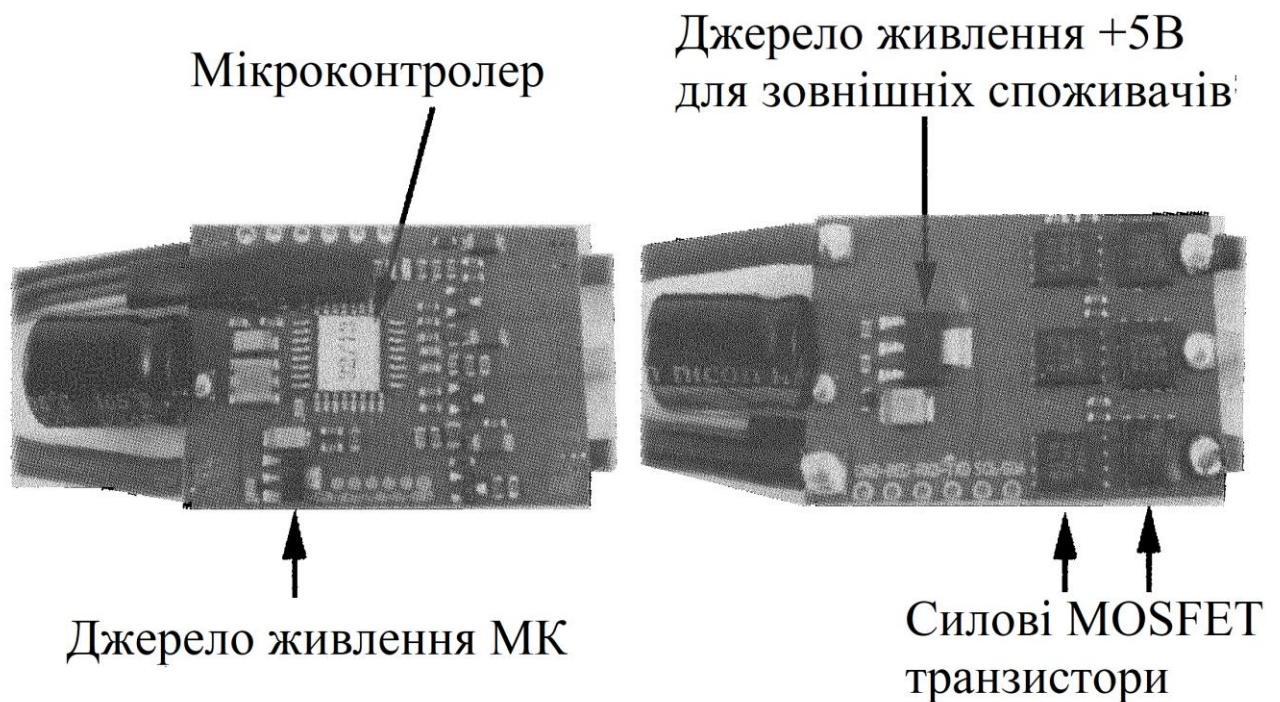


Рисунок 5. Регулятор обертів безколекторного двигуна

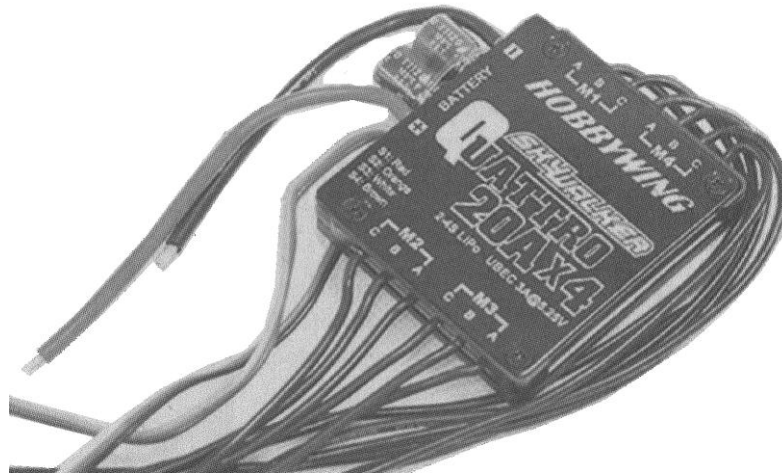


Рисунок 6. Комбінований чотириканальний регулятор

Достоїнствами такої конструкції є відсутність розгалужувача силового живлення та короткі силові дроти, що зменшує магнітні наведення на компас, а також простота та естетичність монтажу. Але є й дуже серйозна вада, що перекреслює переваги: неможливість заміни згорілого регулятора. При аварії із замиканням проводки в ланцюгу мотора регулятор часто перегорає, і для швидкого ремонту достатньо мати запасний регулятор, а згодом, що перегорів, можна не поспішаючи налагодити або придбати ще один. У разі комбо-регулятора доведеться або ремонтувати несправний канал, що далеко не завжди можна здійснити, або купувати новий комбо-регулятор цілком.

Силова електросистема (рисунок 7) складається із двох головних тягових електродвигунів (motor 1, motor 2) з контролерами швидкості та акумуляторів; та двох допоміжних електродвигунів (motor 3, motor 4) для приводу повороту головних двигунів з контролерами та акумуляторами. Окремим контуром електродвигуни та контролери під'єднані до польотного контролера (рисунок 8).

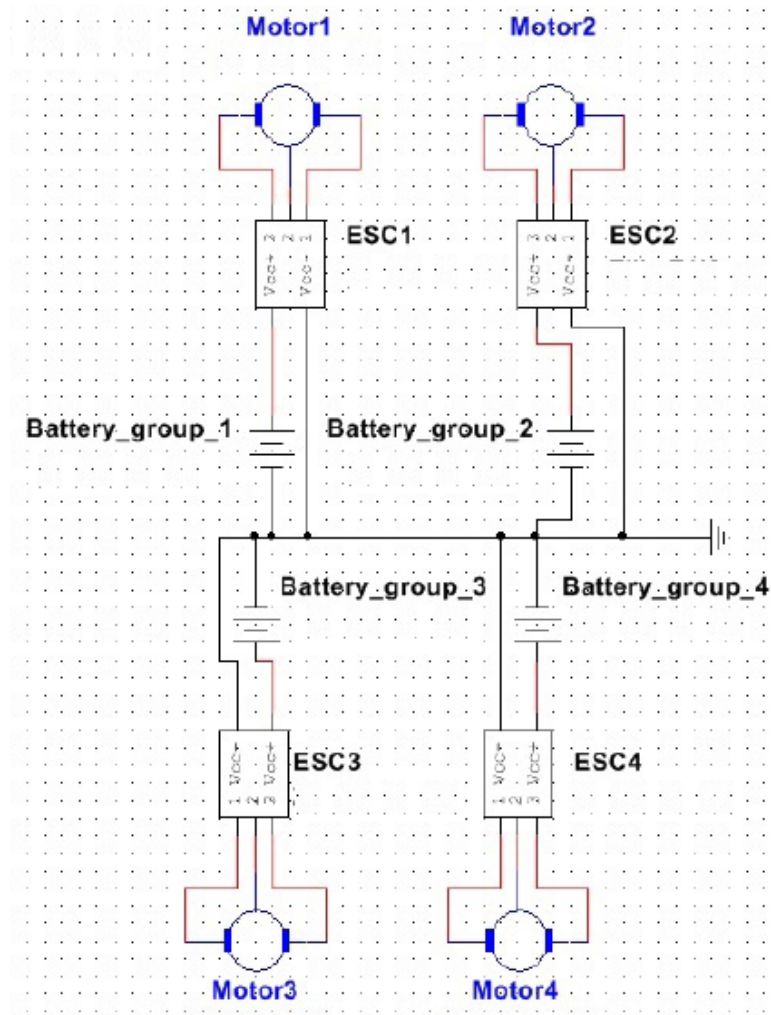


Рисунок 7. Схема силової установки

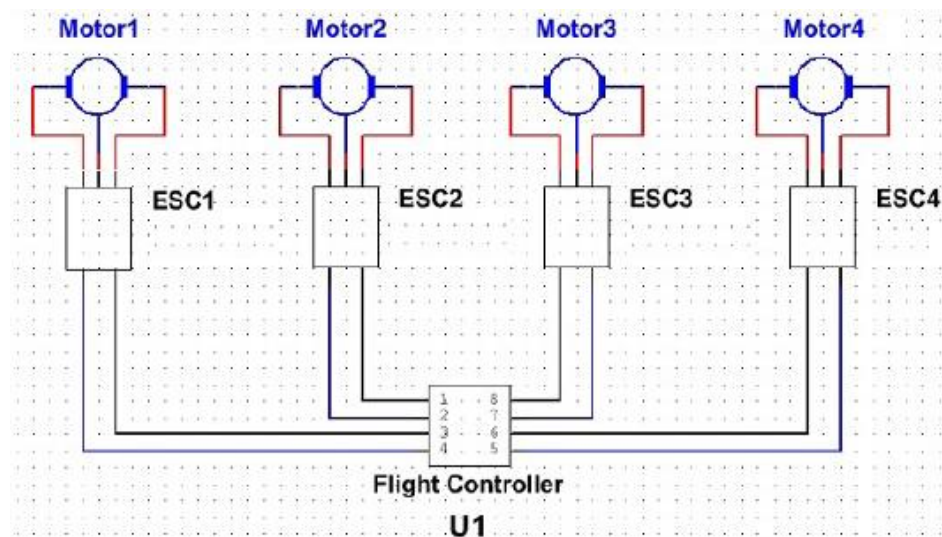


Рисунок 8. Система керування силовою установкою

4. Принципи керування бездатчиковими безколекторними електродвигунами.

Існують безколекторні двигуни без будь-яких датчиків положення або енкодерів. У таких двигунах визначення положення ротора виконується шляхом вимірювання ЕРС на вільній фазі. В кожен момент часу до однієї з фаз підключений "+" до іншої "-" живлення, одна з фаз залишається вільною. Обертаючись, двигун наводить ЕРС у вільній обмотці. У міру обертання напруга на вільній фазі змінюється. Вимірюючи напругу на вільній фазі, можна визначити момент перемикавання до наступного положенню ротора. Зазвичай визначають момент переходу напруги на вільній фазі через нульову точку (половину напруги живлення). Тобто потрібно відстежити момент, коли напруга на вільній фазі зрівняється із середньою точкою. Для роботи цього методу двигун повинен обертатися. Цей метод добре працює при порівняно високих оборотах двигуна. При низьких оборотах ЕРС може виявитися недостатньою для чіткого визначення положення ротора. Проте, цей метод застосовується.

Схема з середньою точкою (рисунок 3.4). Коли ключі відкриті, через фази протікає струм і середня точка "прив'язана" до живлячої напруги. У цей момент на вільній фазі двигуна виконуються вимірювання. Очевидно, що при розімкнутих ключах, вимір напруги на вільній фазі не дасть результату.

Віртуальна середня точка (рисунок 3.5). У більшості випадків середня точка недоступна. Тобто немає можливості фізично підключитися до неї без розбирання двигуна. Обійти цю ситуацію допоможе створення віртуальної середньої точки.

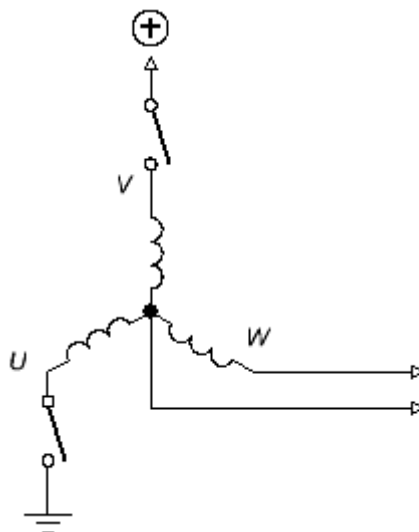


Рисунок 9. Схема з середньою точкою

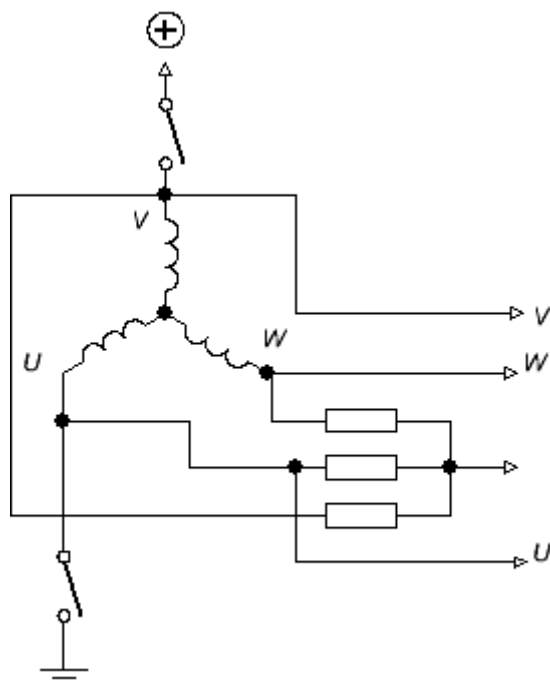


Рисунок 10. Схема з віртуальною середньою точкою

Ця схема проста і застосовується часто, але вона має свої недоліки. Через ШІМ напруга середньої точки непостійна. Вона коливається в широкому діапазоні напруг. Для того щоб мікроконтролер зміг виміряти напругу, застосовуються ланцюги узгодження сигналів - дільники напруги і RC-фільтри для згладжування коливань (рисунок 3.6).

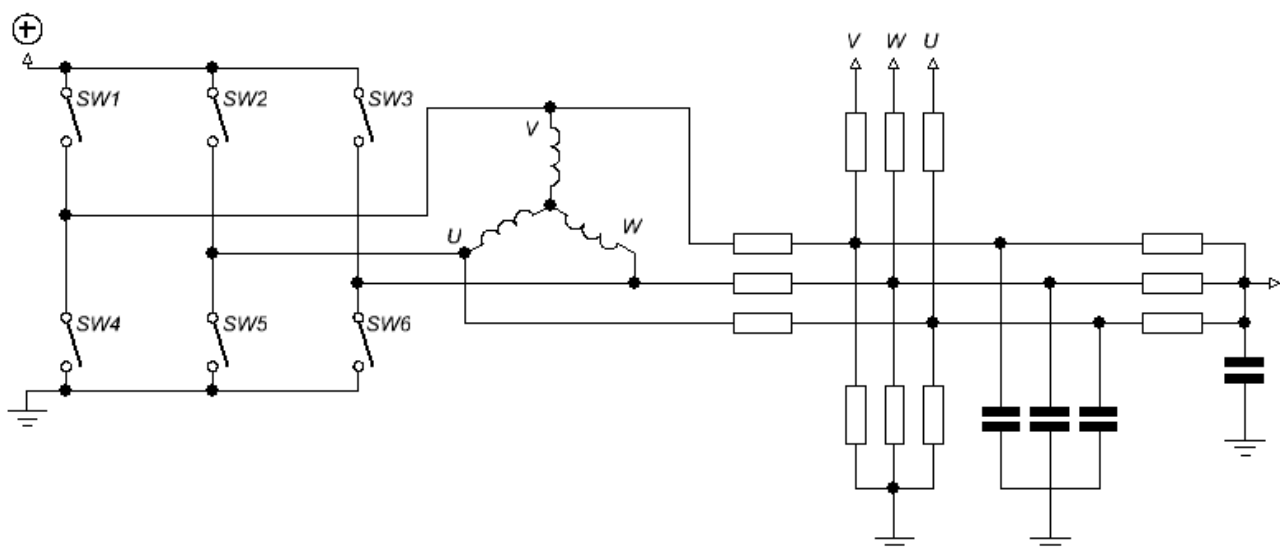


Рисунок 11. Схема з середньою точкою, ланцюги узгодження сигналів

Якщо двигун живиться напругою 24 вольт, то в середній точці напруга може знаходитися в межах від 0 до 24 Вольт. Мікроконтролери зазвичай мають межі вимірювання 5 В. Без схем узгодження рівнів сигналів не обійтися. Підвищивши напругу живлення двигуна, слід змінити і дільники напруги в ланцюгах узгодження. В іншому випадку напруга може перевищити допустиму

і вивести з ладу мікроконтролер. Для запобігання таких ситуацій додатково застосовують схеми захисту.

Присутність дільника напруги веде до зниження чутливості на малих обертах двигуна, а наявність фільтрів вносить затримку. Затримка є причиною похибок у визначенні положення ротора і може стати критичною для управління двигунами на високих швидкостях.

Оскільки схема з віртуальної середньої точкою досить гучна, можна застосувати іншу схему (рисунок 3.7), де стабільну напругу середньої точки встановлюють окремо залежно від напруги живлення.

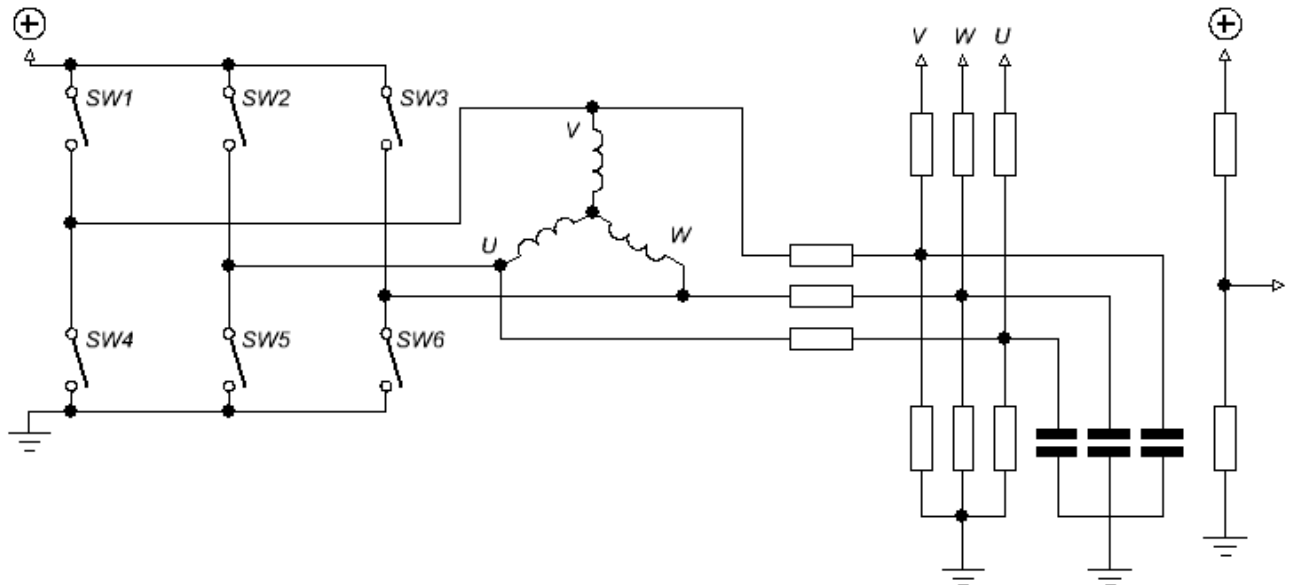


Рисунок 12. Схема з середньою точкою з стабілізацією напруги

Далі будемо розглядати схему, в якій стабільну напругу середньої точки встановлюють окремо.

Алгоритм комутацій. На вільній фазі потрібно вимірювати напругу. Напругу можна вимірювати за допомогою АЦП і порівнювати із середньою точкою. АЦП мають час перетворення, що вносить похибка в обчислення. Логічніше використовувати компаратори, адже не обов'язково знати значення напруги. Важливо визначити сам момент переходу через середню точку. Компаратор спрацьовує саме в момент переходу напруги через середню точку і може генерувати переривання для мікроконтролера. Розглянемо часову діаграму, наведену на рисунку 3.8.

На першому етапі P1 на фазу V подається "+", мінус - на фазу U. При цьому напруга на фазі W починає рости і в середині періоду P1 перетинає нульову точку - половину напруги між фазами V і U, тобто половину напруги живлення. Як видно з діаграми, зміну стану ключів потрібно виконати на половині періоду між подією перетину нульової точки (ZC). Після перемикання стану ключів (етап P2) вимірювання проводиться на вільній фазі V. При цьому напруга на вільній фазі може рости або падати. Це враховується при роботі компараторів. Таким чином, регулятор повинен пам'ятати на якому етапі від P1

до P6 знаходиться, і переходити до наступного стану, виходячи з розрахунків часу, обчислених між подіями ZC.

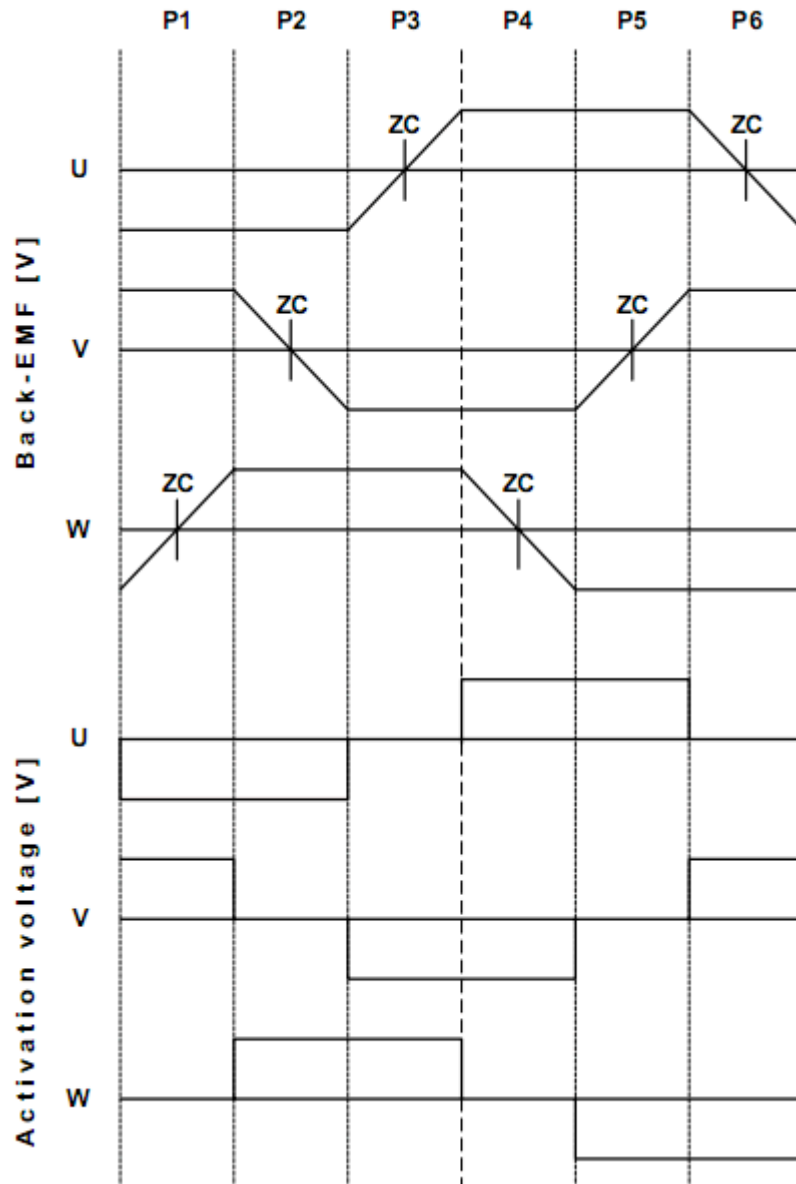


Рисунок 13. Часова діаграма

Тобто необхідно підраховувати час між ZC, і відміряти час від події ZC до перемикання ключів. Цей час має враховувати кут випередження фази.

Вибір частоти ШІМ. Найчастіше в приводах визначення положення ротора, вимірювання струму, напруги і т.п. синхронізують з сигналом ШІМ. Тобто в певні моменти з періодичністю, яка залежить від частоти ШІМ сигналу.

Таблиця 1. Відповідність стану ключів і вільних фаз для кожного з 6 положень ротора

Етап	Живлення +	Живлення -	Ключі які відкриті	Вимір на фазі
P1	V	U	SW1, SW5	W↑
P2	W	U	SW3, SW5	V↓
P3	W	V	SW3, SW4	U↑
P4	U	V	SW2, SW4	W↓
P5	U	W	SW2, SW6	V↑
P6	V	W	SW1, SW6	U↓

Припустимо ситуацію, коли, частота ШІМ 8 кГц, шпаруватість 100% (повний газ), двигун обертається зі швидкістю, при якій частота комутацій теж дорівнює 8 кГц. Тобто від моменту перемикавання ключів до наступного перемикавання проходить рівно один період ШІМ сигналу. Якщо швидкість обертання зросте і частота комутацій перевищить частоту ШІМ, виникне ситуація, при якій ШІМ сигнал буде утримувати ключі відкритими довше необхідного і протидіяти обертанню двигуна. Крім того, вимірювання напруги на вільної фазі синхронізовані частотою ШІМ сигналу, тому немає технічної можливості обчислити швидкість комутації вище частоти ШІМ. Іншими словами контролер теоретично не зможе керувати двигуном, якщо той обертається зі швидкістю, при якій частота комутацій перевищує частоту ШІМ сигналу. Це тільки теоретичні розрахунки. На практиці, бажано щоб частота ШІМ в кілька разів перевищувала частоту комутацій.

Наприклад, маємо регулятор з частотою ШІМ 8 кГц, і двигун з 14 магнітами. Максимальна теоретично можлива частота обертання валу двигуна буде:

$$V = (Q / 6 / (N / 2) * 60);$$

де Q - частота ШІМ в герцах;

6 - кількість комутацій за один електричний оберт;

N - кількість магнітів;

60 - кількість секунд в хвилині.

$$V = ((8000/6 / (14/2)) * 60) = 11428 \text{ об / хв.}$$

Двигун з 28 магнітами:

$$V = ((8000/6 / (28/2)) * 60) = 5714 \text{ об / хв.}$$

Тобто якщо потрібно управляти багатополосним двигуном на високих оборотах, доведеться використовувати регулятор з більш високою частотою ШІМ.

Наприклад, щоб розкрутити двигун з 24 магнітами до 10000 об/хв знадобиться регулятор з частотою ШІМ не нижче 24кГц. Потрібно також пам'ятати, що чим вище частота ШІМ, тим більше перехідних процесів відбувається на ключах за одиницю часу. Це може привести до збільшення втрат і до збільшення тепловиділення на ключах.

5. Схема регулятора обертів електродвигуна.

Схема (рисунок 3.9) умовно розділена на дві частини: ліва - мікроконтролер з логікою, права - силова частина. Силу частину можна модифікувати для роботи з двигунами іншої потужності або з іншою напругою живлення.

Контролер - ATMEGA168. Ця схема може використовуватись в якості випробувального стенду, на якому є можливість створити універсальний регулятор для роботи з різними за потужністю безколекторними двигунами: як з датчиками, так і без датчиків положення.

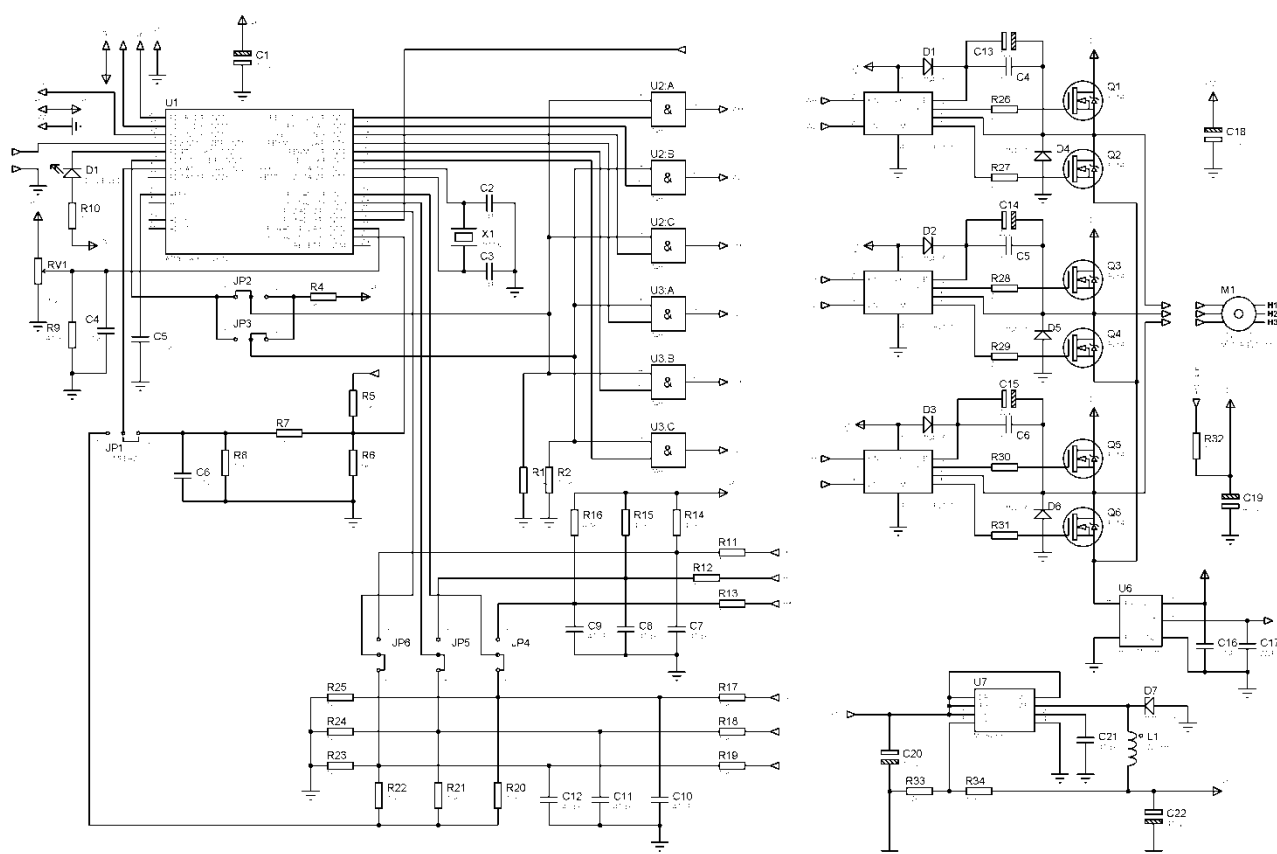


Рисунок 14. Схема регулятора ESC

Живлення схеми роздільне. Оскільки драйвери ключів вимагають живлення від 10В до 20В, використовується живлення 12В. Живлення мікроконтролера здійснюється через DC-DC перетворювач (рисунок 14), зібраний на мікросхемі MC34063. Можливо застосування лінійного стабілізатора з вихідною напругою 5В. Передбачається, що напруга VD може бути від 12В і вище і обмежується можливостями драйвера ключів і самими ключами.

ШІМ і сигнали для ключів. На виході OC0В (PD5) мікроконтролера U1 генерується ШІМ сигнал. Він надходить на перемикачі JP2, JP3. Цими перемикачами можна вибрати варіант подачі ШІМ на ключі (на верхні, нижні або на все ключі). На схемі перемикач JP2 встановлений в положення для

подачі ШІМ сигналу на верхні ключі. Перемикач JP3 на схемі знаходиться в положенні для відключення подачі ШІМ сигналу на нижні ключі. Якщо відключити ШІМ на верхніх і нижніх ключах, ми отримаємо на виході перманентну повну потужність, яка може розірвати двигун. Після перемикачів ШІМ сигнал надходить на входи елементи логіки "&" (U2, U3). На цю ж логіку надходять 6 сигналів з висновків мікроконтролера PB0..PB5, які є керуючими сигналами для 6 ключів. Таким чином, логічні елементи (U2, U3) накладають ШІМ сигнал на керуючі сигнали. На драйвери верхніх ключів сигнали підуть безпосередньо з мікроконтролера, а на нижні - через логічні елементи.

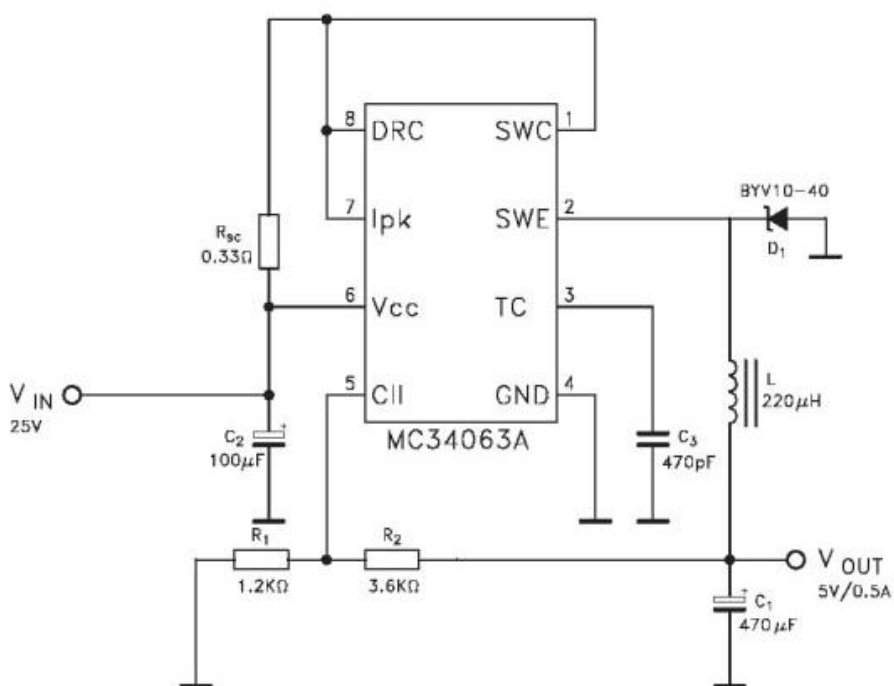


Рисунок 15. Схема DC-DC перетворювача на мікросхемі MC34063

Зворотній зв'язок (контроль напруги фаз двигуна). Напруга фази двигуна W, V, U через резистивні подільники W - (R17, R25), V - (R18, R24), U - (R19, R23) надходить на входи контролера ADC0 (PC0), ADC1 (PC1), ADC2 (PC2). Ці висновки використовуються як входи компараторів. Резистивні дільники вибираються таким чином, щоб напруга, що подається на вхід мікроконтролера, не перевищувала допустиму. В даному випадку, резисторами 10K і 5K ділиться на 3. Тобто При живленні двигуна 12В на мікроконтролер буде подаватися

$12B \cdot 5K / (10K + 5K) = 4B$. Опорна напруга для компаратора (вхід AIN1) подається від половинної напруги живлення двигуна через дільник (R5, R6, R7, R8). Резистори (R5, R6) за номіналом такі ж, як і (R17, R25), (R18, R24), (R19, R23). Далі напруга зменшується вдвічі дільником R7, R8, після чого надходить на ногу AIN1 внутрішнього компаратора мікроконтролера. Перемикач JP1 дозволяє переключити опорну напругу на напругу "середньої точки" що формується резисторами (R20, R21, R22). Якщо немає в необхідності, JP1, R20, R21, R22 можна виключити зі схеми.

Вимірювання аналогових сигналів. На вхід ADC5 (PC5) через дільник R5, R6 подається напруга живлення двигуна. Ця напруга контролюється мікроконтролером. На вхід ADC3 (PC3) надходить аналоговий сигнал від датчика струму. Датчик струму ACS756SA. Це датчик струму на основі ефекту Холла. Перевага цього датчика в тому, що він не використовує шунт, а значить, має внутрішній опір близький до нуля, тому на ньому не відбувається тепловиділення. Крім того, вихід датчика аналоговий в межах 5В, тому без будь-яких перетворень подається на вхід АЦП мікроконтролера, що спрощує схему. Якщо буде потрібно датчик з великим діапазоном вимірювання струму, Ви просто замінюєте існуючий датчик новим, не змінюючи схему.

Сигнал, що задають оберти двигуна, з потенціометра RV1 надходить на вхід ADC4 (PC4). Резистор R9 - він шунтує сигнал в разі обриву проводу до потенціометра. Крім того, є вхід RC сигналу, який повсюдно використовується в дистанційно керованих моделях. Вибір керуючого входу і його калібрування виконується в програмних настройках регулятора.

UART інтерфейс. Сигнали TX, RX використовуються для налаштування регулятора і видачі інформації про стан регулятора - обороти двигуна, струм, напруга живлення і т.п. Для настройки регулятора його можна підключити до USB порту комп'ютера, використовуючи FT232 перехідник (рисунок 3.11). Налаштування виконується через будь-яку програму терміналу. Наприклад: Hyperterminal або Putty.

Також є контакти реверсу - висновок мікроконтролера PD3. Якщо замкнути ці контакти перед стартом двигуна, двигун буде обертатися в протилежному напрямку. Світлодіод, що сигналізує про стан регулятора, підключений до висновку PD4.