

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-44-05>

УДК 621.31.33

Лишук Віктор Васильович, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4049-8467>

Євсюк Микола Миколайович, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3768-8959>

Мороз Сергій Анатолійович, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4677-5170>

Хвищун Микола Вячеславович, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3918-4527>

Бабула Ігор Віталійович, студент

Луцький національний технічний університет

МІКРОКОНТРОЛЕРНЕ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНИМИ КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ

В.В. Лишук, М.М. Євсюк, С.А. Мороз, М.В. Хвищун, І.В. Бабула. Мікроконтролерне керування гібридними кроковими двигунами. У статті запропоновано спосіб керування гібридними кроковими двигунами з допомогою мікроконтролера. Проаналізовано функціонування крокових двигунів та мостових інверторів, побудованих на МОН-транзисторах, які подають команди від контролера до двигуна та узгоджують їх входи-виходи. Запропонований мікроконтролер дає змогу керувати кроковим двигуном в різних режимах роботи, забезпечуючи високі роздільну здатність, точність позиціонування та крутний момент.

Ключові слова: мікроконтролер, драйвер, мостовий інвертор, кроковий двигун.

В.В. Лышук, Н.Н. Евсюк, С.А. Мороз, Н.В. Хвищун, И.В. Бабула. Микроконтроллерное управление гибридными шаговыми двигателями. В статье предложен способ управления гибридными двигателями с помощью микроконтроллера. Проанализировано функционирование шаговых двигателей и мостовых инверторов, построенных на МОП-транзисторах, которые подают команды от контроллера к двигателю и согласовывают их входы-выходы. Предложенный микроконтроллер позволяет управлять шаговым двигателем в различных режимах работы, обеспечивая высокие разрешающую способность, точность позиционирования и вращательный момент.

Ключевые слова: микроконтроллер, драйвер, мостовой инвертор, шаговый двигатель.

V.V. Lyshuk, M.M. Yevsiuk, S.A. Moroz, M. V. Khvyshchun, I.V. Babula. Microcontroller control of hybrid stepper motors. The article proposes a method of controlling hybrid stepper motors using a microcontroller. The operation of stepper motors and bridge inverters built on MOSFETs, which give commands from the controller to the motor and coordinate their inputs and outputs, is analyzed. The proposed microcontroller allows you to control a stepper motor in various operating modes, providing high resolution, positioning accuracy and torque.

Keywords: microcontroller, driver, bridge inverter, stepper motor.

Постановка наукової проблеми. На сьогодні розробка систем електроприводу з точним позиціонуванням є цікавим напрямком розвитку в області силової електроніки. Перехід від використання мікропроцесорів до мікроконтролерів з уже вбудованими різноманітними периферійними пристроями дає змогу перейти на системи цифрового керування. У статті розглянемо спосіб керування гібридними кроковими двигунами (ГКД) з допомогою мікроконтролера ATMEGA16. Проміжною ланкою між мікроконтролером та двигуном буде драйвер.

Крокові двигуни (КД) отримали широке застосування в промисловості завдяки високій точності виконання операцій і простоті управління. Ними оснащуються найрізноманітніші побутові і промислові пристрої, що працюють в старт-стопному режимі, наприклад роботизовані конвеєрні лінії, верстати з ЧПУ, 3D-принтери та інше обладнання. Оскільки ці двигуни неможливо безпосередньо підключити до постійної напруги, то виникає потреба керування ними. Існуючі рішення або дорогі, або реалізовані за допомогою простих, переважно аналогових компонентів, які обмежують можливості та продуктивність крокових двигунів. Завдяки інтелектуальному управлінню досягається більша швидкодія, більший крутний момент та точніше позиціонування [2, 3].

У цій статті проаналізуємо можливість реалізації мікроконтролерного управління кроковими двигунами. Крокові двигуни – це так звані синхронні двигуни, які можна покровоково повертати за допомогою обертового магнітного поля котушок статора. Також вони здійснюють точне позиціонування і регулювання швидкості без датчика зв'язку.

Окрім можливості точного позиціонування ротора, крокові двигуни відповідно до [3] володіють іншими особливими властивостями, зокрема: безколекторні, що дає змогу підвищити надійність; синхронні крокові двигуни, що обертаються з заданою швидкістю незалежно від навантаження; автономні некеровані (без систем керування); утримуючі крутний момент, тобто крокові двигуни, що можуть утримувати певне навантаження, не змінюючи свого положення.

Крокові двигуни поділяються на двигуни без системи збудження, двигуни з постійними магнітами та гібридні крокові двигуни. Ротор крокового двигуна без збудження складається з зубчастого сердечника з м'якого заліза, що означає, що магнітне поле буде відсутнім, якщо через котушки статора не протікатиме струм. Перші дві конструкції не набули широкого застосування із-за деякої неточності виконання команд та дещо зниженого крутного та утримуючого моментів [3].

Аналіз досліджень. Як зазначалось вище, основним призначенням крокового двигуна є поворот валу на визначений кут і утримання цього положення до отримання нових команд. Швидкість повороту і крутний момент таких двигунів відносяться до основних характеристик. Забезпечення точності повороту на заданий кут і надійність утримання положення – це основні завдання, що виникають при проектуванні крокових двигунів. Поворот валу двигуна виконується стрибкоподібно або дискретно, а величина кроку зумовлюється конструкцією та іншими конструктивними особливостями двигуна і становить 30° , 15° , $7,5^\circ$, 5° , $2,5^\circ$, $1,8^\circ$.

Конструкція електродвигуна вимагає точного контролю над виконуваними операціями. Особливість крокових двигунів полягає в тому, що контролеру немає необхідності зчитувати поточний стан валу, щоб повернути його в наступну позицію. Наприклад, якщо мінімальний крок двигуна становить $2,5^\circ$, то кожний наступний керуючий сигнал, що надходить від контролера, буде подавати команду повернути вал точно на цей кут незалежно від його вихідного положення.

На сьогодні перевагу отримують двигуни з як найменшим кроком. Головною технічною характеристикою двигуна є мінімальний кут повороту валу (кутова роздільна здатність). Друга важлива характеристика – це утримуючий момент. Він визначає критичний крутний момент, при якому вал утримується в зайнятому положенні незважаючи на зовнішні навантаження, що діють на нього [3].

Кроковий двигун з постійними магнітами має ротор з постійними магнітами, який на відміну від крокового двигуна без збудження, має крутний момент зубчастого колеса. Обертання створюється шляхом синхронізації ротора за допомогою магнітних полів статора (рис.1). Недоліком цієї конструкції є технічно обмежена кількість полюсів і пов'язана з цим низька кутова роздільна властивість.

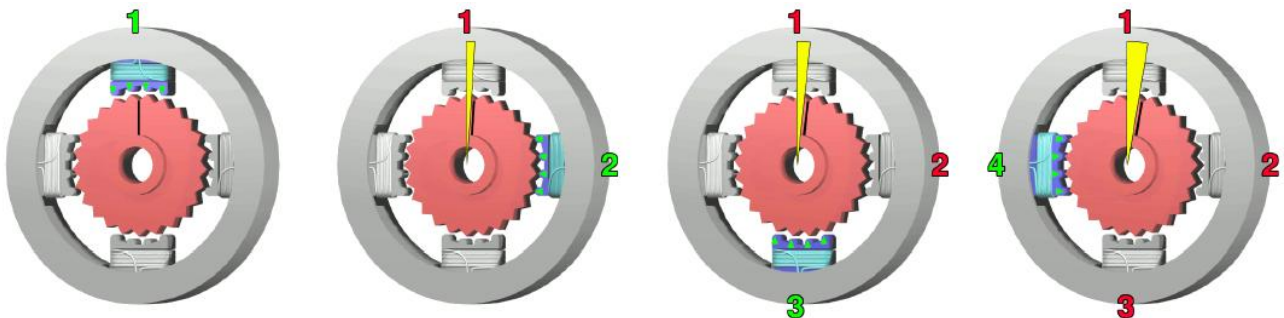


Рис.1. Поперечний переріз крокового двигуна з почерговим ввімкненням обмоток.

Поєднання двигуна без системи збудження та крокового двигуна з постійним магнітом дало змогу отримати гібридний кроковий двигун. Ротор тут складається з сердечника з постійним магнітом і двох зубчастих ободів з м'якого заліза, які зміщені на півкроку. Один відображає магнітний північний полюс, а інший південний. Таке поєднання дає змогу досягти високої роздільної здатності, високого коефіцієнту утримання та крутного та утримуючого моменту [3]. Більшість доступних на сьогодні крокових двигунів проектуються з таким виконанням.

Обмотки гібридного крокового двигуна з'єднані попарно, а тому можуть отримувати багатофазове живлення. На практиці ж більшість гібридних крокових двигунів, як і крокових двигунів з постійним магнітами, отримує живлення за двофазною схемою.

Електроживлення подається на кожну фазу в прямому напрямку або зворотньому напрямку або взагалі не подається. При збудженні обмоток однієї з фаз вони притягують зубці одного з полюсів ротора. Подача електричного струму на обмотки другої фази викликає притягання зубців протилежного полюса ротора. Зазвичай ротори гібридних крокових двигунів містять від 50 до 60 зубів, що дозволяє досягти високої кутової роздільної здатності (до $1,8^\circ$).

Гібридні крокові двигуни можуть бути побудовані в уніполярній або біполярній конструкції та відрізнятися за електричним керуванням котушок статора. Біполярні та уніполярні двигуни різняться способом подачі напруги на обмотки збудження та створення на статорі північних та південних магнітних

полюсів. Перш ніж приступати до розробки системи керування кроковим двигуном, потрібно не тільки знати його тип, але й способи його живлення.

Біполярні крокові двигуни мають лише дві фази. Зміна полярності магнітних полів досягається шляхом зміни напрямку струму. Оскільки полярність двох електромагнітів потрібно змінити, то потрібні дві мостові схеми з компонентами живлення [3, 4].

На відміну від уніполярної конструкції, струм в обмотках біполярних крокових двигунів протікає по всій котушці. Це також зменшує кількість з'єднань до чотирьох провідників. Оскільки полярність котушок тепер потрібно змінювати, то на один вивід котушки (фази) потрібно два транзистори. Це тягне за собою ускладнення схеми та системи керування. Але перевагою цієї конструкції є збільшений крутний та утримуючий моменти. Біполярний двигун досягає приблизно на 30% більшого крутного моменту, ніж уніполярний [3].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. В даний час для управління КД в якості електронних перемикачів застосовують транзистори, а сигнали на перемикачів генеруються цифровими інтегральними схемами або мікроконтролером. На рис.2 показано структурну схему керування кроковим двигуном.

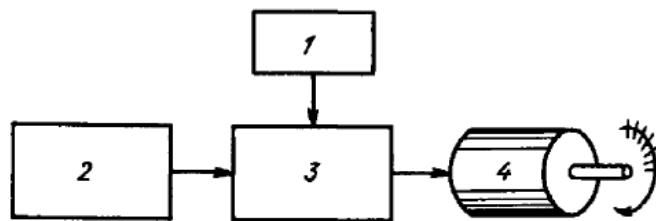


Рис.2. Структурна схема керування кроковим двигуном:

1 – джерело постійної напруги; 2 – мікроконтролер; 3 – інвертор (драйвер); 4 – кроковий двигун.

Пристрій керування живленням біполярного гібридного крокового двигуна повинен забезпечувати проходження електричного струму через обмотки збудження як в прямому, так і в зворотному напрямках. Найпростіший спосіб реалізації цієї задачі полягає у використанні мостової схеми керування, яка будується на базі чотирьох перемикачів, виконаних на МОН-транзисторах, стан яких в строго заданих комбінаціях забезпечує подачу на двигун напруги живлення з різними полярностями. Живлення двофазного біполярного крокового двигуна забезпечується чотирма виводами А-В та С-Д.

Керування подачею напруг (сигналів) на обмотки характеризується наявністю чотирьох МОН-транзисторів, побудованих на Н-містках (рис.3). Комутація електричного струму, що проходить через обмотки фази (А-В), здійснюється подачею напруги на затвори МОН-транзисторів. Висока напруга на затворах VT1 і VT4 при низькій напрузі на затворах VT2 і VT3 забезпечує протікання струму в напрямку від А до В. Тим самим вивід А стає північним полюсом, а В – південним полюсом статора. При подачі високої напруги на затвори VT2 і VT3, а низької напруги – на затвори VT1 і VT4, струм протікає від В до А, що робить В північним полюсом, а А – південним. Якщо ж низьку напругу подати на затвори VT2 і VT3, то струм взагалі не буде протікати через обмотки (ротор нерухомий). У біполярних гібридних крокових двигунах напрямок змінюється шляхом зміни полюсів виводів обмоток. Керування ключами в тому та іншому випадку має здійснюватися логічною схемою, що реалізуватиме потрібний алгоритм роботи. Надалі вважатимемо, що джерело живлення схем має номінальну для обмоток двигуна напругу.

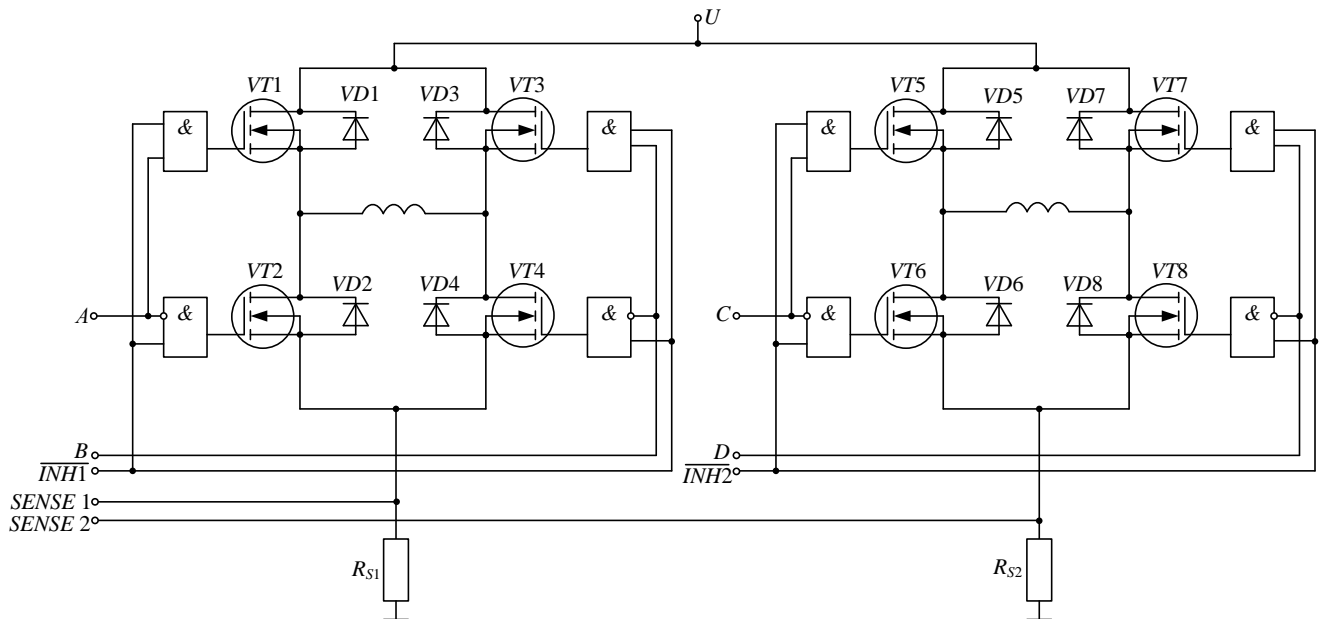


Рис.3. Керування струмом однієї фази біполярного двигуна за допомогою Н-містка (схема драйвера на мікросхемі L297).

На рис.3 вихідні сигнали мікроконтролера подаються на входи силового інвертора (комутатора), який керує ввімкненням обмоток крокового двигуна. Обмотку крокового двигуна представляють на схемі заміщення послідовним з'єднанням індуктивності і резистора. Як відомо, при обертанні ротора в обмотках двигуна виникає ЕРС.

При аналізі роботи двигуна та інвертора слід розглянути несприятливі умови експлуатації двигуна і силових транзисторів для різних значень напруги живлення. Так як гібридні крокові двигуни проектують з отриманням максимальної вихідної потужності з мінімальним використанням активних і конструктивних матеріалів, то в деяких режимах роботи значення температури може досягати близько 100 °С, що викликає за собою підвищення опору обмотки на 15-20%. При закритті (вимкненні) транзистора із-за наявності індуктивності L , похідна струму (di/dt) зростає і виникає ЕРС самоіндукції, яка може привести до виходу з ладу транзистора.

На практиці найпоширенішим способом захисту транзисторів є застосування діодів. Якщо паралельно з обмоткою чи транзистором ввімкнений діод, як це показано на рис.3, то після вимкнення транзистора струм обмотки замикається через нього. У цій схемі при вимкненні транзистора струми обмоток гасяться і потенціал колектора дорівнює напрузі живлення U . Цей спосіб захисту простий, однак струм в обмотці протікає протягом деякого часу після замикання транзистора, що призводить до появи гальмівного моменту. Якщо VT1 ввімкнений, то VT2 вимкнений, і навпаки. Але існує можливість того, що транзистор буде ввімкнений в той час, коли інший все ще проводить струм. Тому для запобігання ввімкнення в один і той же час двох транзисторів необхідно додати коло затримки. Тут можуть бути використані резистори зі змінним опором [3].

Крокові двигуни підтримують кілька режимів роботи. Від режиму роботи залежать крутний момент, кутова роздільна здатність і його потужність. Основних режимів є три.

- а) повний крок, в якому керуючий сигнал збуджує обмотки відразу двох фаз;
- б) півкроку, в якому керуючий сигнал перемінно збуджує обмотки однієї або обох фаз;
- в) мікрокрок. Контролер подає на обмотки збудження синусоїдний або ШІМ-сигнал.

Найрозповсюдженішим є перший режим. Головна перевага даного режиму роботи в порівнянні з іншими полягає в збільшеному обертальному моменті, чому сприяє постійне збудження більшої кількості обмоток. В середньому крутний момент двигуна в двофазному повнокроковому режимі роботи є більшим на 30-40%, ніж в інших режимах.

У повнокроковому режимі роботи, в якому одночасно живляться обмотки двох фаз, ротор також повертається на кут роздільної здатності, але при цьому його зубці фіксуються між обмотками статора. Послідовність керуючих імпульсів, що подаються на обмотки збудження і забезпечують роботу двигуна в двофазному повнокроковому режимі роботи, показана на рис.4.

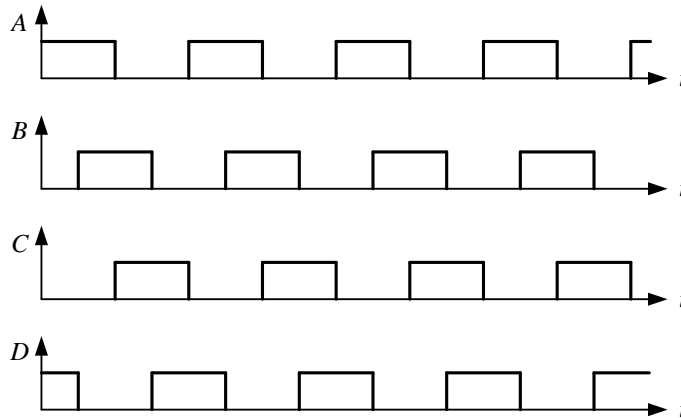


Рис.4. Послідовність подачі сигналів на обмотки при повнокроковому режимі.

Якщо для живлення звичайного двигуна постійного струму потрібно лише джерело регульованої постійної напруги, а необхідні комутації струмів у обмотках реалізуються колектором, то в крокових двигунах всі комутації повинен виконувати зовнішній мікроконтролер. У найпростішому випадку для управління кроковим двигуном в повнокроковому режимі потрібні всього два сигнали, зсунуті за фазою на 90 градусів. Напрямок обертання залежатиме від того, яка фаза випереджає, а швидкість визначатиметься частотою проходження імпульсів.

Всі сигнали керування кроковим двигуном можна сформувати програмно, однак це як правило викликає велике завантаження мікроконтролера. Тому частіше застосовують спеціальні мікросхеми драйверів крокового двигуна, які зменшують кількість необхідних від процесора динамічних сигналів. Поширеним є випадок, коли необхідні послідовності сигналів керування фазами формуються за допомогою однієї мікросхеми, а необхідні струми фаз забезпечує інша мікросхема. Хоча останнім часом з'являється все більше драйверів, що реалізують всі функції в одній мікросхемі.

Схема драйвера повинна виконувати три основних задачі, а саме здатність вмикати і вимикати струми в обмотках, а також змінювати їх напрям, підтримувати задане значення струму та забезпечувати більш швидке зростання і спадання струму для швидкісних характеристик.

Структурна схема системи «мікроконтролер-драйвер-кроковий двигун» показана на рис.5. Для реалізації задачі використаємо економічний 8-розрядний мікроконтролер ATmega16, заснований на посиленій AVR RISC архітектурі, драйвер L297, кроковий двигун M15LS-1N та програматор з USB-входом. Щоб отримати тактову частоту 16 МГц, використовується так званий кварцовий генератор [1, 5].

До складу МК ATmega16 входять наступні основні периферійні пристрої: порти вводу-виводу для обміну даними з різними пристроями, наприклад, індикаторами, реле, транзисторами та ін.; аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), що призначений для перетворення вхідного аналогового сигналу в дискретний код або цифровий сигнал; таймери, лічильники, генератори частоти; послідовні інтерфейси передачі даних SPI (Serial Peripheral Interface), USART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), що дають змогу МК здійснювати обмін інформацією, шляхом послідовної її передачі на інші цифрові пристрої, наприклад, мікросхеми. Пристрій випускається за розробленою Atmel технологією незалежної пам'яті високої ємності. Вбудована ISP флеш-пам'ять може внутрішньосхемно перепрограмуватись через послідовний інтерфейс SPI звичайним програматором [5].

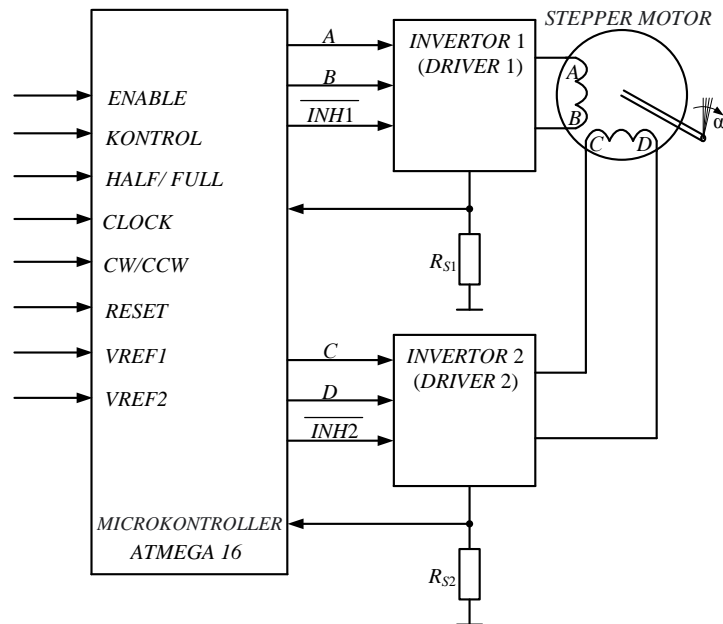


Рис.5. Структурна схема системи «мікроконтролер-драйвер-кроковий двигун».

Електрична принципова схема системи керування «мікроконтролер-драйвер-кроковий двигун» показана на рис.6.

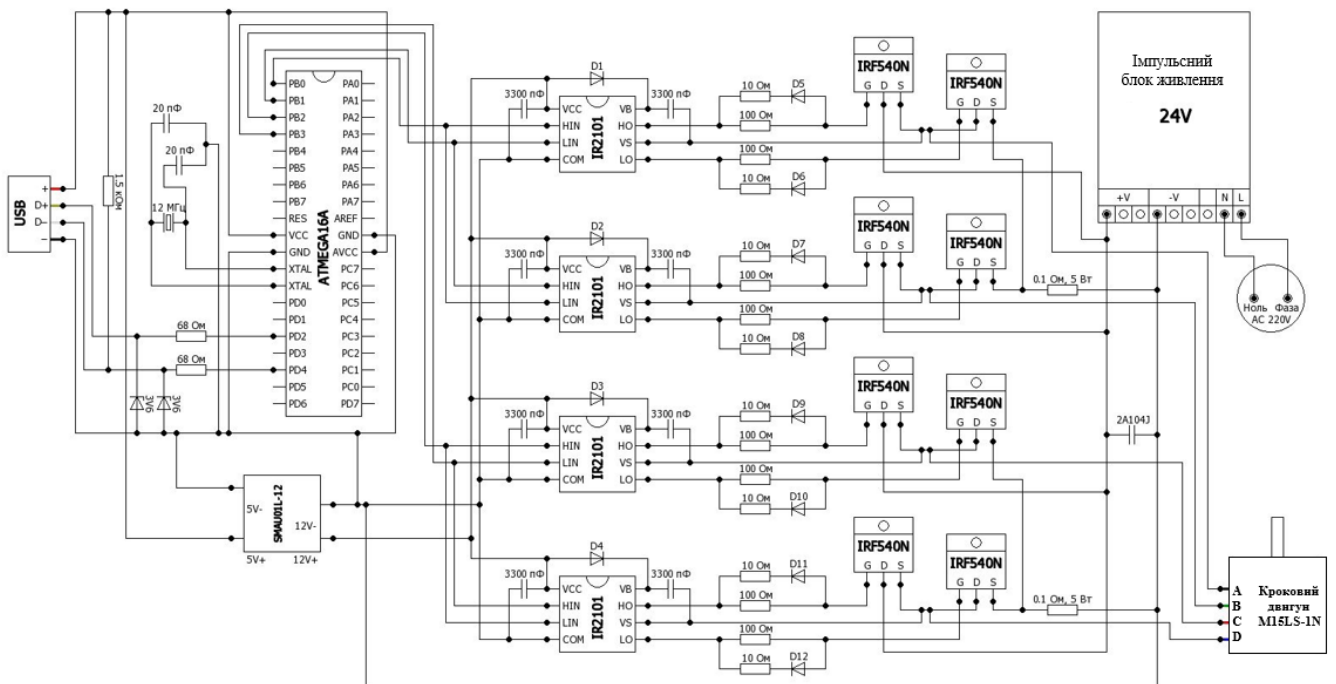


Рис.6. Електрична принципова схема системи «мікроконтролер-драйвер-кроковий двигун».

Мікросхеми IR2101 виконані для чотирьох каналів керування та подачі імпульсів струму на обмотки КД і разом з двома Н-мостами та захисними резисторно-діодними ланками утворюють інвертор (драйвер). Для цього використано мікросхему L297. Її призначення підсилювати та узгоджувати сигнали, що поступають від мікроконтролера і подавати ці сигнали за певним законом (алгоритмом) на обмотки КД.

Різні технологічні процеси вимагають програмування контролера, тобто формування певної послідовності його вихідних сигналів, що подаються на обмотки КД. Зрозуміло, що швидкість, кут повороту ротора КД, пауза та реверс для різних задач можуть суттєво відрізнитися і під кожен задачу мікроконтролер перепрограмується, наприклад мовою C++ [5].

На рис.7 показано перехідний процес при роботі гібридного крокового двигуна серії M15LS-1N в повнокроковому режимі з напругою живлення $U = 5$ В, номінальним струмом $I = 0,375$ А. Звідси видно,

що в момент подачі імпульсів напруги проходить поворот ротора КД, тобто наростання струму. Частота перемикань встановлюється мікроконтролером і становить в даному випадку 1 кГц.

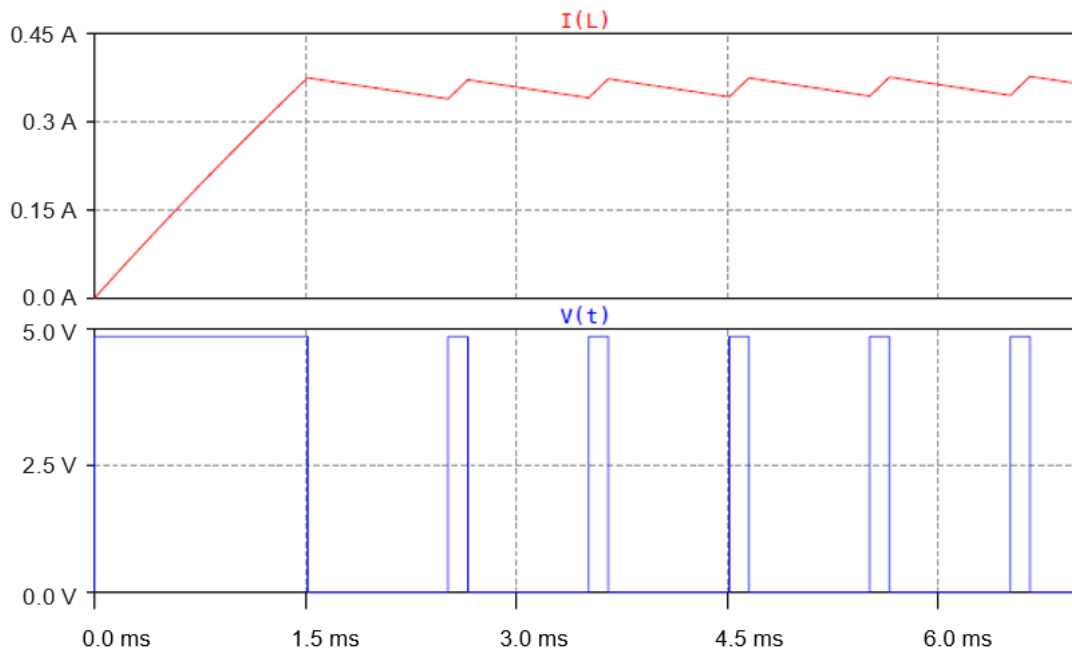


Рис.7. Форма струму і напруги крокового двигуна в повнокроковому режимі роботи.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У роботі проведено аналіз способів і методів керування гібридними кроковими двигунами за допомогою мікроконтролера. Обґрунтовано фізичні основи керування обмотками крокових двигунів. Для реалізації задачі вибрано економічний 8-розрядний мікроконтролер сімейства AVR ATmega16, драйвер L297, кроковий двигун M15LS-1N та програматор з USB-входом. Запропонована система керування біполярним гібридним кроковим двигуном забезпечує широкий вибір режимів його роботи. У статті мікроконтролер реалізує повнокроковий режим. В подальших дослідженнях його можна адаптувати і на півкроковий та мікрокроковий режими функціонування крокового двигуна.

Список бібліографічного опису

1. Воробйова О. М., Іванченко В. Д. Основи схемотехніки: підручник / О. М. Воробйова, В. Д. Іванченко. – Одеса: Фенікс, 2009. – 388 с.
2. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. / Т. Кенио. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 200 с.
3. Скарпино М. Двигатели для моделеров: руководство по шаговым двигателям, сервоприводам и другим типам электродвигателей: Пер. с англ. / М. Скарпино. – Москва – Санкт-Петербург – Киев, ООО "Альфа-книга", 2018. - 432 с.
4. Ридико Л. Управление шаговыми двигателями / Л. Ридико // "Основаи схемотехніки". №6-7/2001.
5. <https://microchipinf.com/ua/articles/55/723>.

References

1. Vorobyova O.M., Ivanchenko V.D. Fundamentals of circuitry: a textbook / O.M. Vorobyova, V.D. Ivanchenko. – Odessa: Phoenix, 2009. – 388 p.
2. Kenio T. Stepper motors and their microprocessor control systems: Transl. from English / T. Kenio. - M.: Energoatompubl., 1987. - 200 pp.
3. Scarpino M. Motors for modelers: a guide to stepper motors, servos and other types of electric motors: Transl. from English / M. Scarpino. - Moscow - St. Petersburg - Kiev, LLC "Alpha Book", 2018. - 432 pp.
4. Ridiko L. Control of stepper motors / L. Ridiko // "Fundamentals of circuitry". №6-7 / 2001.
5. <https://microchipinf.com/ua/articles/55/723>.