

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

на тему: Система керування електроприводом біонічного протеза на основі п'єзодвигунів

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи РБ-41 спеціальності 163 Біомедична інженерія

	(шифр і назва спеціальності)	
	(підпис)	Малишевська М.О. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Дозорський В.Г. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Хвостівський М.О. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Яворська Є.Б. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Дедів І.Ю. (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Біотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Яворська Є.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 23 » січня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 163 Біомедична інженерія

(шифр і назва спеціальності)

студенту Малишевська Марія Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система керування електроприводом біонічного протеза на основі
п'єзодвигунів

Керівник роботи Дозорський Василь Григорович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 23 » січня 2025 року № 4/7-43 .

2. Термін подання студентом завершеної роботи 25.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Система керування електроприводом біонічного протеза

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

ВИСНОВКИ; СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ; ДОДАТКИ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання 23.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Малишевська М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дозорський В.Г.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Система керування електроприводом біонічного протеза на основі п'єзодвигунів». Кваліфікаційна робота бакалавра // Малишевська Марія Олександрівна// Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РБ-41 // Тернопіль, 2025 р // стор. – 79, рис. – 33, табл. – 1, бібліог. – 25, додат. – 1.

Ключові слова: П'ЄЗОДВИГУН, ДРАЙВЕР, БІОНІЧНИЙ ПРОТЕЗ

У цій кваліфікаційній роботі проведено проектування системи керування електроприводом біонічного протеза на основі п'єзодвигунів. Проаналізовано типи приводів для біонічних протезів, трансмісії, та особливості їх функціонування. Запропоновано використати мініатюрні п'єзодвигуни. Розроблено структуру системи керування групи п'єзодвигунів. За основу використано драйвер DRV8662EVM, який має достатній функціонал для ефективного використання в біонічних протезах. Розроблено структуру системи керування електроприводом біонічного протеза, яка працює від сигналів ЕМГ. Керування біонічним протезом має бути простим та працювати в масштабі реального часу. Для цього використано спосіб прямого керування.

ABSTRACT

The subject of the qualification work: “Electric drive control system for a bionic prosthesis based on piezo motors” Bachelor’s qualification work //Malyshevskaya Maria Alexandrovna// Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Group RB-41 // Ternopil, 2025 // pp. – 79, fig. – 33, tab. - 1, bibliog. - 25, add. – 1.

Keywords: PIEZO MOTOR, DRIVER, BIONIC PROSTHESIS

In this qualification work, the design of a control system for the electric drive of a bionic prosthesis based on piezomotors was carried out. The types of drives for bionic prostheses, transmissions, and the features of their functioning were analyzed. It was proposed to use miniature piezomotors. The structure of the control system for a group of piezomotors was developed. The DRV8662EVM driver was used as the basis, which has sufficient functionality for effective use in bionic prostheses. The structure of the control system for the electric drive of a bionic prosthesis, which operates on EMG signals, was developed. Controlling the bionic prosthesis should be simple and work in real time. For this, a direct control method was used.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ПРИВОДИ БІОНІЧНИХ ПРОТЕЗІВ.....	10
1.1 Типи приводів біомехатронних систем.....	10
1.2 Актуальність поставленого завдання.....	19
1.3 П'єзоелектричні приводи.....	20
1.4 Висновки до розділу 1.....	33
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ОСНОВІ П'ЄЗОДВИГУНІВ.....	35
2.1 Можливість застосування п'єзоелектричних двигунів в біонічних протезах.....	35
2.2 Задача проектування драйверів п'єзоелектричних двигунів.....	35
2.3 Вибір драйвера керування п'єзоелектричним двигуном.....	40
2.4 Система керування п'єзоелектричних двигунів.....	56
2.5 Висновки до розділу 2.....	60
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ СПЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ВИКОНАННІ РОБОТИ.....	62
3.1 Середовище SolidWorks.....	62
3.2 Моделювання п'єзодвигуна в структурі біонічного протеза.....	65
3.3 Висновки до розділу 3.....	67
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	68
4.1 Планування заходів з охорони праці. Види планування та контролю стану охорони праці. Виявлення, оцінка та зменшення ризиків небезпечних подій.....	68
4.2 Здійснення заходів щодо зниження дії радіоактивних випромінювань.....	70
4.3 Висновки до розділу 4.....	73

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ			
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Система керування електроприводом біонічного протеза на основі п'єзодвигунів Пояснювальна записка	Літ	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Малишевська М.					у	6	79
Перевір.	Дозорський В.Г.							
Н. контр.	Хвостівський М.							
Зат. каф.	Яворська Є.Б.							
Рецензент	Дедів І.Ю.					ТНТУ, каф. БТ РБ-41		

ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ	

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
						7
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

ВСТУП

В сьогоднішній важкий для України час особливо гостро стоїть питання в доступності біонічних протезів для окремих категорій людей, зокрема постраждалих внаслідок війни. При цьому важливим є питання розроблення біонічних протезів із розширеними функціональними можливостями. При цьому все ще залишається проблемою забезпечення плавності та швидкості виконання рухів протезом, регулювання сили захвату в процесі роботи. Це пов'язано із використанням ротаційних електродвигунів, які потребують використання додаткових засобів збільшення крутного моменту, зокрема трансмісій. При цьому власне зростає уповільнення виконання рухів та з'являється складність контролю сили захвату.

З іншої сторони такі електродвигони є досить шумними і також споживають багато електроенергії, що обмежує час їхньої роботи від акумуляторних батарей.

Тому актуальним є застосування в біонічних протезах альтернативних електродвигонів, які були б позбавлені згаданих недоліків. Одним із таких перспективних електродвигонів є використання п'єзоелектричних двигунів. Однак, на відміну від ротаційних електродвигунів, що являють собою індуктивне навантаження для системи керування, п'єзодвигуни являють собою ємнісний тип навантаження. При цьому необхідним є використання складних систем керування таким електродвигonom. Власне в кваліфікаційній роботі проводиться проектування системи керування електродвигonom біонічного протеза на основі п'єзодвигунів із можливістю регулювання швидкості та сили виконання захвату.

Метою є проектування системи керування електродвигonom біонічного протеза на основі п'єзодвигунів.

Завдання:

– огляд відомих конструкцій електродвигонів біонічних протезамів;

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
						8
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

- виділення недоліків відомих систем електроприводу;
- огляд відомих способів керування електроприводом на основі п'єзодвигунів;
- розробка системи керування електроприводом на основі п'єзодвигунів.

Результати виконання є важливими з практичної сторони, оскільки важливі для розроблення сучасних типів біонічних протезів.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
						9
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 1

ПРИВОДИ БІОНІЧНИХ ПРОТЕЗІВ

1.1 Типи приводів біомехатронних систем

Розглянемо основні типи приводів, які використовуються в біомехатронних пристроях та можуть бути застосовані в біонічних протезах.

Електромагнітні приводи використовують закон сили Лоренца, згідно якого якщо коли провідник зі струмом переміщується в магнітному полі, виникає сила в напрямку, перпендикулярному до напрямків струму та магнітного поля(МП). МП може індукуватися постійними магнітами або іншою котушкою під напругою.

Існує багато типів електромагнітних приводів, хоча деякі використовуються в біомехатронних приводах частіше, ніж інші. Соленоїди та реле — це прості пристрої з нерухомим залізним сердечником і котушкою (рис. 1.1, а), а також рухомим сердечником, прикріпленим до нерухомого сердечника через пружину. Вони рідко використовуються для біомехатронних приводів, оскільки вони не можуть створювати великі сили або високі частоти.

Електродвигуни мають нерухомий корпус, який називається статором, і частину, яка обертається, що називається ротором. На відміну від соленоїдів і реле, електродвигуни можуть обертатися безперервно.

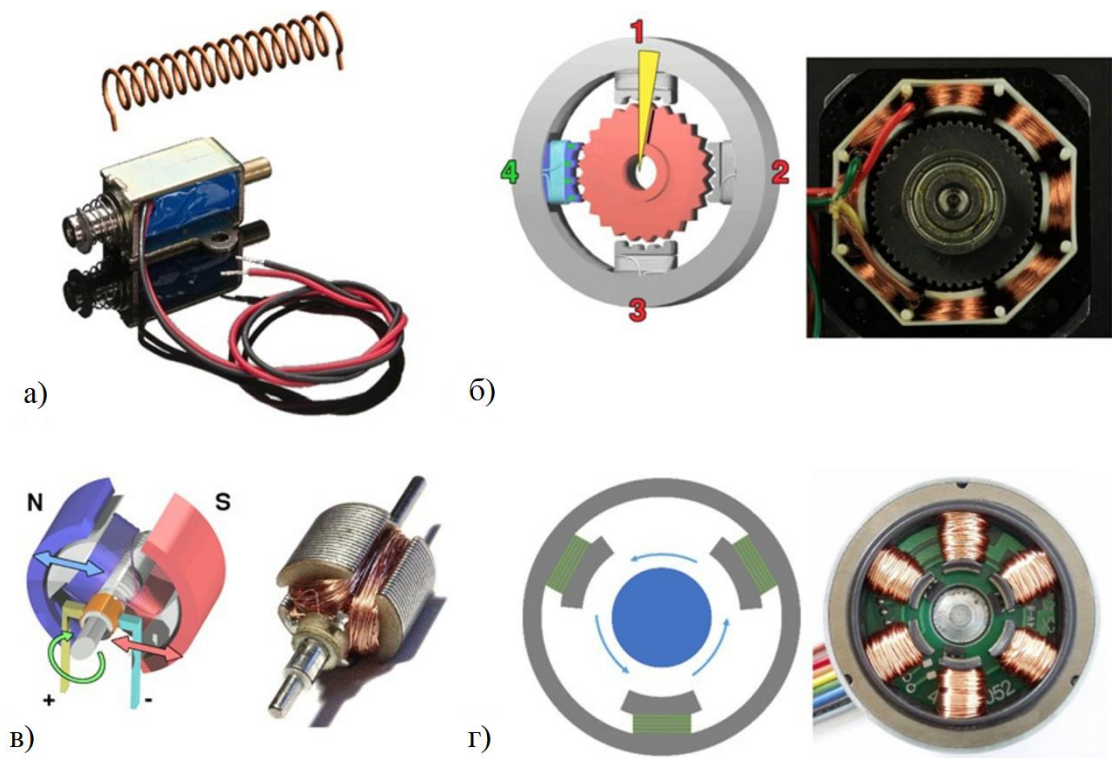


Рисунок 1.1 – Електромагнітні приводи: а – ілюстрація котушки соленоїда та фотографія соленоїда в корпусі; б – ілюстрація крокового двигуна з чотирма електромагнітами та фотографія крокового двигуна; в – ілюстрація будови двигуна постійного струму (ДПС) та фотографія ротора; і г – ілюстрація та фотографія безщіткового ДПС.

Крокові двигуни — це тип ДПС з сталим магнітом, який може обертатися в обох напрямках, рухатися з точним кутовим кроком, підтримувати утримуючий крутний момент на нульовій швидкості та керуватися за допомогою цифрових схем. Однак вони зазвичай не можуть створювати високі крутні моменти, високі швидкості або високі частоти.

Щіткові двигуни використовують електричні щітки для перемикання напрямку струму в котушках. Котушки розташовані на роторі, а постійні магніти - на статорі. У порівнянні з багатьма іншими двигунами, ці двигуни мають високе співвідношення крутного моменту до ваги, оскільки напруженість поля постійних магнітів дуже висока. Струм, який можна доставити до котушок, обмежується іскрінням на щітках; це, у свою чергу,

обмежує крутний момент, який можуть створювати двигуни. Деякі щіткові двигуни мають порожнисті ротори (без залізного сердечника), які називаються двигунами без сердечника. Ці двигуни мають знижену інерцію (забезпечуючи більше прискорення), але також можуть створювати менший крутний момент.

Навпаки, безщіточні двигуни використовують такі датчики, як датчики Холла, щоб визначити, коли змінити полярність струму через котушку. Ці приводи вимагають більш складної схеми, яка проводить комутацію фаз, але може створювати більший крутний момент. З цієї причини їм все частіше надають перевагу над щітковими двигунами в біомехатронних застосунках. Є два варіанти — з внутрішнім (які є більш поширеними) та зовнішнім ротором (які є поширеними в таких пристроях, як квадрокоптери з дистанційним керуванням), і все частіше використовуються в біомехатронних системах за їхні чудові можливості генерування крутного моменту.

Рідинні та пневматичні приводи.

Пневматичні штучні м'язи перетворюють пневматичну енергію на механічний рух і силу. Найпоширеніші пневматичні штучні м'язи називаються м'язами Мак-Кіббена, які складаються з трубок, оточених переплетеними нитками (рис. 1.2). При накачуванні повітря під тиском трубки радіально розширюються та звужуються в аксіальному напрямку, створюючи сили розтягування. М'язи Мак-Кіббена спочатку були розроблені для імітації природної функції м'язів для протезів.

Основною перевагою м'язів Мак-Кіббена є те, що вони мають змінне видовження залежно від тиску газу. Вони легкі та на них не впливають магнітні поля.

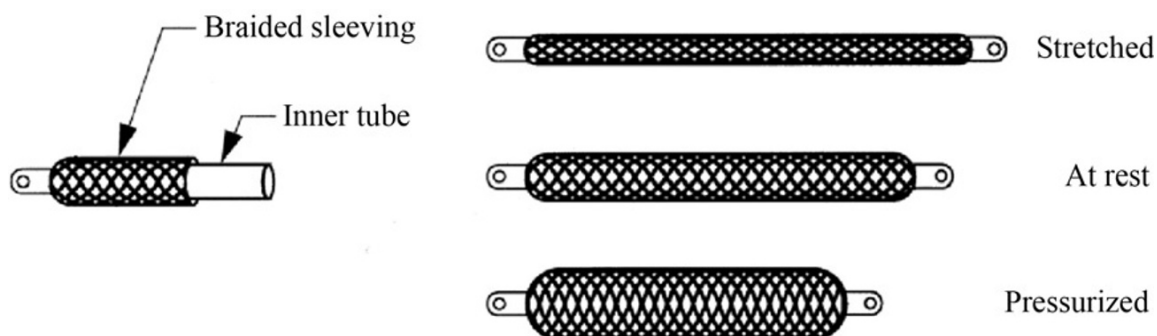


Рисунок 1.2 – М'язи Мак-Кіббена

Електроактивні полімери.

ЕАР — ще одна категорія розумних матеріалів, які називаються «штучними м'язами». З усіх сучасних технологій приводів ЕАР найбільш функціонально подібні до природних м'язів. ЕАР — це полімерні матеріали, які конвертують електроенергію в механічну (і навпаки). Вони мають високе співвідношення потужності до ваги, але також мають переваги нижчої вартості, внутрішньої відповідності та значно більших можливостей деформації.

Є дві категорії ЕАР: іонні, які реагують на потік іонів, і електронні, які реагують на електростатичні сили. Іонні ЕАР вимагають вологого середовища; тому електронні ЕАР, як правило, більше підходять для біомехатронних застосувань. З електронних ЕАР дуже перспективним є діелектричний еластомер.

Діелектричний еластомер складається з двох електродів, які розташовані в ізоляційній полімерній плівці. При подачі напруги на електроди електростатичні сили стискають діелектричну плівку, спричиняючи зменшення товщини та збільшення площі (рис. 1.3). Така діелектрична поведінка забезпечує можливості, які наближаються до властивостей природних м'язів: деформації 10–100 % і рівні напруження 0,1–9 МПа. Переваг діелектричних еластомерів багато: вони легкі, недорогі, тихі та мають високу щільність потужності.

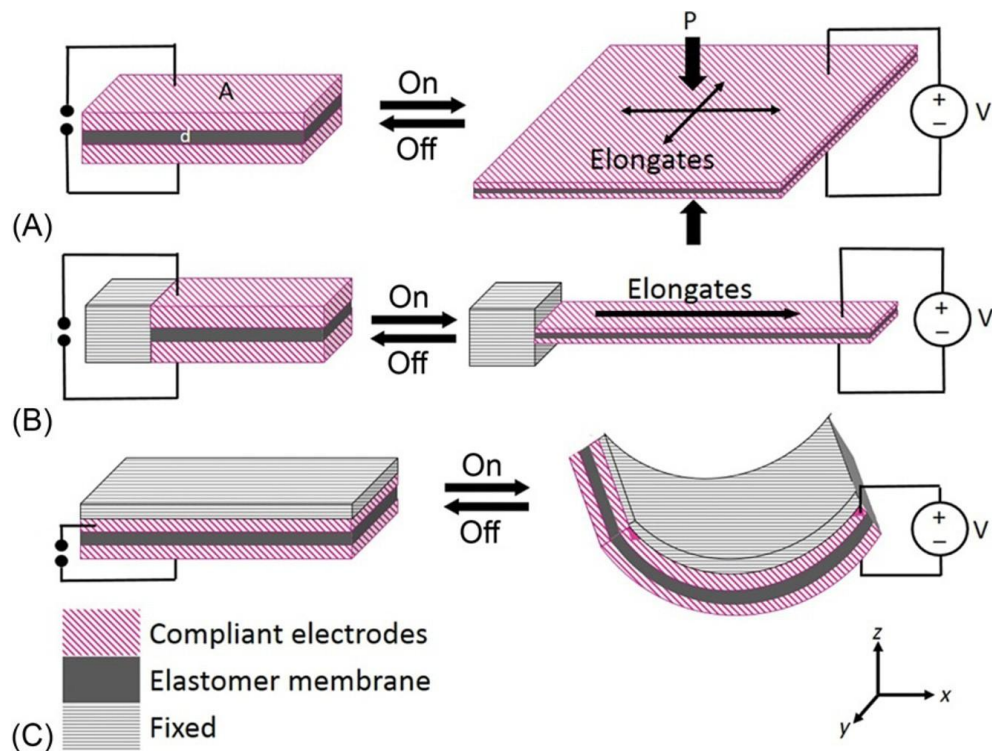


Рисунок 1.3 – Ілюстрації конфігурацій діелектричного еластомеру: (А) планарне спрацьовування з двома ступенями свободи, (В) планарне спрацьовування з одним ступенем свободи та (С) згинання.

Трансмісії. Двигун передає механічну енергію в систему за допомогою певної муфти або трансмісії. Трансмісія часто розрахована на певну динамічну поведінку, що покращує загальну безпеку або продуктивність системи.

Лінійні передачі перетворюють обертання двигуна на лінійний вихід. Цей лінійний вихід може бути використаний для створення лінійного руху або обертального руху. Лінійні трансмісії зазвичай мають нижчу вихідну інерцію, ніж роторні аналоги з подібними характеристиками, і часто можуть витримувати більші навантаження. Однак вони часто займають значний простір і, як правило, вносять м'які нелінійності в передавальне відношення в діапазоні руху. У багатьох біомехатронних конструкціях використовуються лінійні передачі, особливо в протезах і ортезах з електроприводом.

Найпростішою формою лінійної передачі є ходовий гвинт, який складається з стержня з різьбою і гайки (рис. 1.4, а). Вхід трансмісії (з'єднаної з двигуном) - різьбовий стержень. Вихід трансмісії - гайка. Гайка перешкоджає обертанню напрямними стержнями або іншими структурними компонентами, так що, коли різьбовий стержень обертається, гайка рухається вздовж нього. Порівняно зі стандартним гвинтом, профіль зубів ходового гвинта розроблений так, щоб бути більш ефективним і витримувати більші навантаження. Кулькові гвинти концептуально подібні до ходових гвинтів, але різьбовий стержень має канавки, а гайка містить кульки, які обертаються в канавках гвинта (рис. 1.4, б). Таким чином, кулькові гвинти котяться, а не ковзають, і, відповідно, мають значно кращу ефективність, ніж ходові гвинти. Ця ефективність, однак, пов'язана із більш складною конструкцією, більшою вартістю і часто з більшим шумом і люфтом. Крім того, контакт між кульками та стержем з канавками є точковим, а не лінійним контактом ходових гвинтів, що значно зменшує зусилля, які система може витримати.

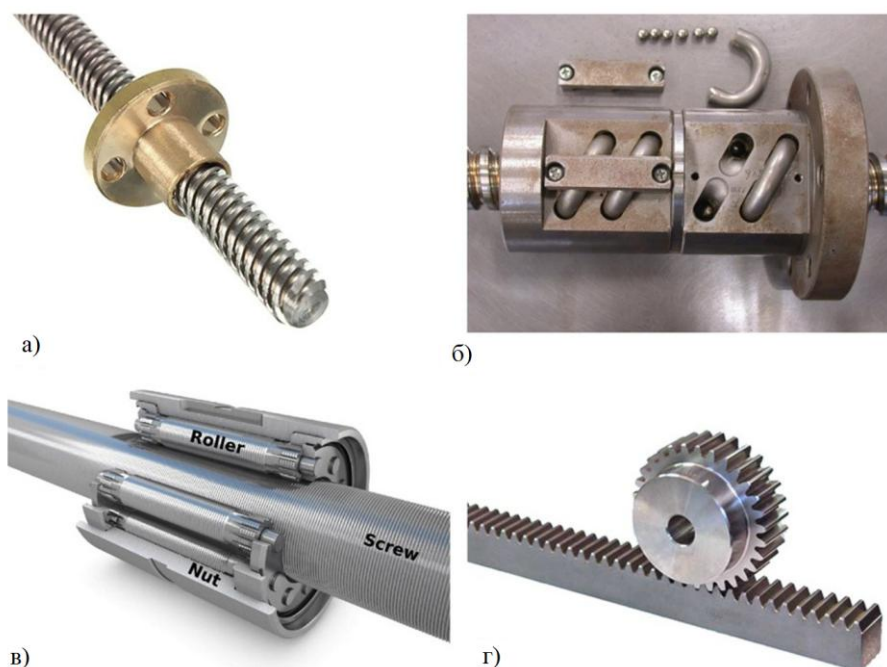
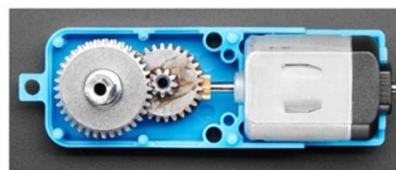


Рисунок 1.4 – Лінійні передачі: а – ходовий гвинт, б – кульковий гвинт, в – роликовий гвинт і г – зубчаста рейка

Диференціальні роликові гвинти поєднують у собі найкращі властивості ходових гвинтів і кулькових гвинтів, оскільки вони можуть витримувати високі навантаження та водночас мають високу ефективність (рис. 1.4, в). Однак їх виготовлення вимагає високої точності і відповідно є дорогим.

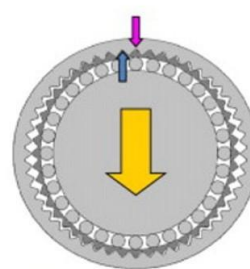
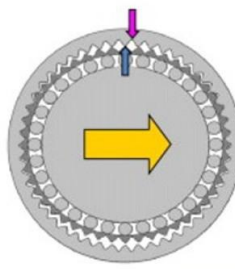
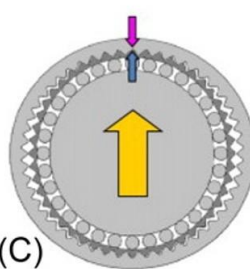
Час від часу зустрічаються конструкції з рейковою передачею (рис. 1.4, г).



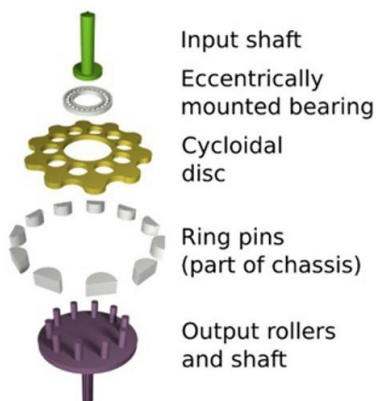
(A)



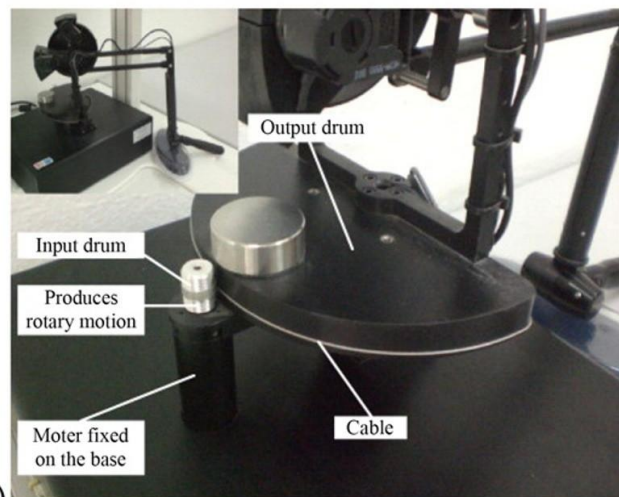
(B)



(C)



(D)



(E)

Рисунок 1.5 – Ротаційні передачі: а – прямозуба передача, що приводиться в рух двигуном постійного струму, б – планетарна передача, в – схема, що показує основну роботу гармонічних приводів, г – циклоїдний привід і д – Кабестанний привід на пристрої Phantom.

Ротаційні трансмісії зазвичай концентричні з двигуном, хоча в деяких конструкціях це не так. Ротаційні передачі, як правило, більш компактні, ніж лінійні, але часто мають більшу інерцію.

Найпростіша форма ротаційної передачі — це просто система циліндричних шестерень, з'єднаних одна з одною (рис. 1.5, а). Косозубі шестерні схожі, але не мають зубів, паралельних осі обертання, що дозволяє їм працювати плавніше та тихіше, але за рахунок збільшення тяги та зниження ефективності. Конічні та черв'ячні передачі іноді використовуються в біомехатронних додатках.

Планетарні шестерні подібні до циліндричних шестерень, але використовують набір із трьох або більше планетарних шестерень (рис. 1.5, б). Вони також контактують з нерухомим кільцем. Порівняно з прямозубими зубчастими колесами, планетарні зубчасті колеса мають більш високе співвідношення міцності до ваги, і в одному кільці можна розміщувати кілька ступенів. Фрикційні планетарні передачі мають великий потенціал, оскільки вони не мають статичного тертя чи люфту, але потребують попереднього натягу, що зменшує термін служби компонентів. Багато біомехатронних приводів з великим моментом використовують гармонічні приводи, в яких еліптичний вхідний кулачок деформує гнучкий генератор хвиль, який контактує з жорстким кільцем (рис. 1.5, в). Генератор хвиль має на два зуби менше, ніж жорстке кільце, так що для кожного циклу обертання входу генератор хвиль зміщує два зуби відносно кільця. Таким чином, дуже високі передавальні числа можуть бути досягнуті в компактному розмірі. Ці передачі вони не мають люфту. Однак вони мають значну інерцію, оскільки для них потрібен великий, важкий, еліптичний кулачок на вхідній стороні передавального числа (що потім відображається квадратом великого передавального числа). Вони також створюють пульсації крутного моменту через еліптичну природу вхідного кулачка.

Циклоїдні приводи топологічно еквівалентні гармонічним приводам, але використовують зсувний вхід, а не еліптичний (рис. 1.5, г). Вони менш поширені в біомехатронних додатках, хоча їх легше виготовити. Циклоїдні приводи мають меншу інерцію, ніж гармонічні приводи, і кращу ефективність (оскільки вони можуть працювати на коченні, а не на ковзаючому контакті). Однак вони мають люфт, а їх передавальне число коливається залежно від положення вхідного вала

Однією з цілей біомехатронних систем є заміна відсутньої функції або компонента тіла. На ці системи покладаються великі очікування, оскільки непошкоджені виконавчі механізми тіла — м'язи — міцні, легкі, гнучкі та тісно інтегровані з нейронною системою контролю. Ще немає жодного штучного приводу, який наближався б до можливостей природних м'язів. Крім того, відсутні природні системи зв'язку тіла, і розпізнавання рухових намірів користувача залишається величезною проблемою.

Історично склалося так, що приводи, які використовуються для приводу протезів, приводилися в рух тілом, тобто користувач виступав у ролі двигуна та передавав енергію на трансмісію. Для людей з ампутованими кінцівками протези, що працюють від тіла, як правило, оснащені тросом Боудена. Для людей з ампутованими кінцівками пасивні пружинні протези забезпечують накопичення та повернення енергії, тоді як протези на основі зчеплення, такі як поліцентричні коліна та багатоосьові стопи, забезпечують стабільність на нерівній місцевості. Перевага приводів, що приводяться в рух тілом, полягає в тому, що, оскільки користувач діє як двигун і передає силу через механічну передачу, вони отримують прямий сенсорний зворотний зв'язок — явище, яке називається розширеною фізіологічною пропріоцепцією. Через цей прямий сенсорний зворотний зв'язок, низьку вартість і високу довговічність протези, що працюють від тіла, залишаються широко поширеними.

Для механічних протезів верхніх кінцівок розмір і вага особливо важливі для комфорту користувача. Більшість комерційно доступних протезів

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		18

рук приводяться в дію двигунами постійного струму з редукторними передачами, такими як черв'ячні шестерні та ходові гвинти. Щоб ще більше зменшити вагу та розмір, дослідники розробляють нестандартні двигуни із зовнішнім ротором, гармонічні приводи та циклоїдні приводи.

Основна перевага протезів нижніх кінцівок з електроприводом полягає в тому, що чиста позитивна потужність забезпечує більше функціональних можливостей, таких як переміщення сидячи в стоячи та підйом по сходах. Приводи протезів нижніх кінцівок повинні витримувати навантаження від ваги тіла і зазвичай мають звичайні електродвигуни з зубчастою передачею.

Ще одна мета біомехатронних систем – певним чином розширити можливості людського тіла. Метою може бути відновлення функцій, ослаблених руховими розладами (наприклад, інсультом чи черепно-мозковою травмою), або пісилення типових людських функцій для людей у складних умовах.

Ортези (або екзоскелетами) можуть використовуватися як стаціонарні або носимі пристрої. Стаціонарні пристрої, такі як Локомат, орієнтовані на реабілітацію. Зазвичай вони дуже великі та стабільні, із традиційними електродвигунами як приводами. Носимі ортези використовуються для різноманітних цілей, починаючи від допомоги людям із порушеннями рухової активності та закінчуючи підтримкою солдатів, які подорожують на великі відстані з великими вантажами.

1.2 Актуальність поставленого завдання

Практично в усіх сучасних іонічних протезах кисті руки як електропривід використовуються ротаційні електродвигуни, зокрема безщіткові та трансмісії у вигляді або клино-пасових передач абонаборів шестерень. При цьому такі протези є інерційними і повільними. Потрібен певний час, щоб палець протеза зігнувся чи виконався захват. Це пов'язано із

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		19

тим, що в трансмісіях за рахунок зменшення швидкості обертання збільшується крутний момент і досягається необхідна сила захвату. Також складним є регулювання швидкостей виконання рухів. Це потребує складних систем керування такими приводами. Також складно забезпечити виконання великої кількості рухів та захватів протезом, оскільки для цього потрібно виділяти із поверхневих ЕМГ сигналів більшу кількість інформативних ознак про виконання бажаних рухів.

З іншої сторони такі електродприводи є досить шумкимиі також споживають багато електроенергії, що обмежує час їхньої роботи від акумуляторних батарей.

Тому актуальним є застосування в біонічних протезах альтернативних електроприводів, які були б позбавлені згаданих недоліків. Одним із таких перспективних електроприводів є використання п'єзоелектричних двигунів.

1.3 П'єзоелектричні приводи

Для більшості інженерів-електриків простий термін «двигун» означає одне: електромагнітний обертовий руховий агрегат. Інженери, яким потрібен лінійний, а не обертовий рух, розглядають можливість введення механічного зв'язку певного типу або застосування лінійно-індукційного електромагнітного двигуна. Однак звичайний електромагнітний двигун — обертовий чи лінійний, великий чи малий — часто не є найкращим вибором для точного лінійного руху через проблеми з керуванням, механічними допусками, люфтом та іншими електричними та механічними проблемами. Однак існує альтернатива: п'єзоелектричний двигун, який широко використовується в значному спектрі застосувань, що потребують точного керування невеликими діапазонами лінійного руху.

Огляд п'єзоелектричного двигуна.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		20

Цей двигун базується на добре відомому та широко використовуваному п'єзоелектричному ефекті, який є симетричним електромеханічним взаємозв'язком. Під дією цього ефекту, коли кристалічний матеріал піддається механічному напруженню (стисканню), він генерує напругу; коли до того ж кристала прикладається напруга, матеріал розширюється на дуже незначну величину.

У п'єзоелектричному двигуні електричне поле прикладається до кристалічного матеріалу (через напругу на матеріалі), і матеріал дуже незначно видовжується, порядку 0,01-0,1 відсотка для типових прикладених напруг. Ці двигуни невеликі (одна з їхніх численних переваг), причому розміри типового пристрою становлять близько 10 мм у кожному вимірі (також використовуються більші), а результуючий рух — порядку мікронів, але з силою Ньютона. Більших видовжень з більшою силою можна досягти, об'єднавши та керуючи кількома п'єзоелектричними кристалами як єдиним цілим.

Це фізичне видовження можна використовувати двома способами. В одній з конфігурацій п'єзоелементи можуть по черзі утримуватися, а потім відпускатися за допомогою набору крихітних п'єзоелементів, що дозволяє кристалу повільно рухатися вперед, як показано на рис. 1.6.

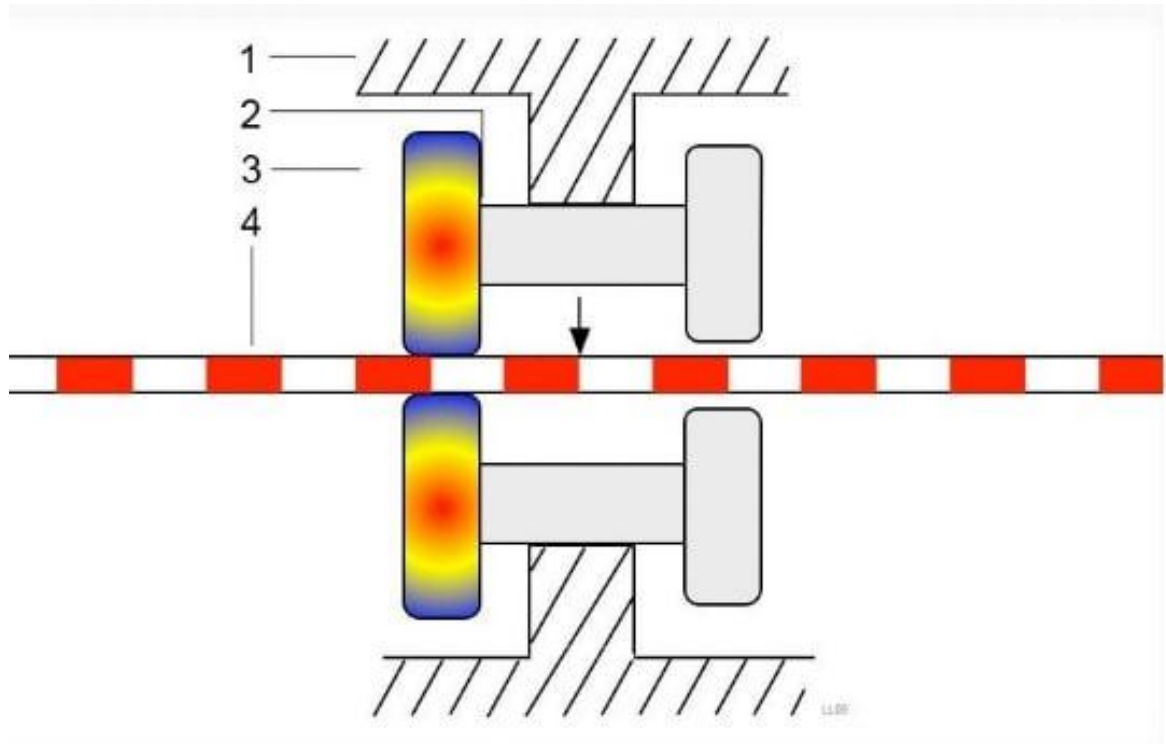


Рисунок 1.6 – За умови відповідного часу затискання та розтискання відносно спрацьовування п'єзодвигуна, двигун може рухатися вперед з крихітними кроками (1 - корпус, 2 - рухомий кристал, 3 - фіксуючий кристал, 4 - обертова частина)

Альтернативно, один кінець кристала може бути затиснутий на місці, дозволяючи іншому кінцю рухатися вперед і назад під час подачі та зняття напруги, що призводить до руху поршня або ковзаючого стержня (Рис. 1.7). Масив з кількох п'єзодвигунів також може бути розташований по колу для забезпечення обертального руху, хоча їхнє основне використання - лінійний рух.

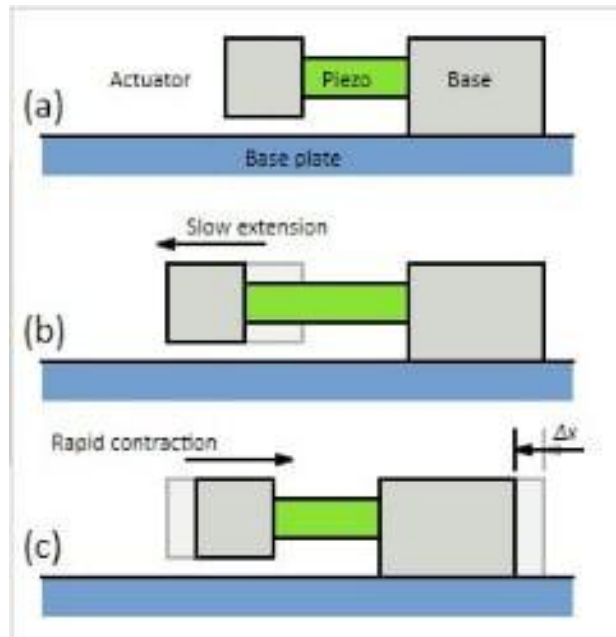


Рисунок 1.7 – З одним кінцем, закріпленим на місці, п'єзодвигун перетворюється на точний, високочергований поршень.

Рух на основі п'єзоелементів використовується в інфузійних насосах, столиках мікроскопів, оптичному позиціонуванні, інструментах, струменевих соплах тощо; недорогі, низькоякісні п'єзопристрої використовуються для звукових сигналів, сигналізації та навіть невеликих гучномовців, але ці способи використання мають послаблені вимоги до продуктивності. П'єзодвигуни можуть бути швидкими, можуть досягати діапазону кількох кГц, що неможливо з електромагнітними двигунами, а також є точними, повторюваними та керованими. Крім того, вони чисті, не потребують змащення підшипників, що може спричинити забруднення, а їх неметалева природа також є перевагою в багатьох ситуаціях.

Тепер розглянемо конкретні приклади п'єзодвигунів.

Крокові п'єзодвигуни

Принцип роботи та особливості п'єзоелектричних двигунів серії NEXLINE. П'єзоприводи NEXLINE мають такі технічні особливості:

Висока роздільна здатність, яка обмежується використовуваною електронікою для керування п'єзодвигуном. У режимі роботи без зворотного

зв'язку величина мінімального кроку досягає значень <1 нм, висока жорсткість, штовхаюче зусилля до 600 Н, утримуюче зусилля досягає 800 Н

У нерухомому стані п'єзопривід зберігає поточне положення з точністю в кілька нанометрів, у тому числі при вимкненому живленні.

П'єзоприводи не створюють магнітні поля і не схильні до їх впливу.

Можливість роботи в умовах жорсткого УФ-випромінювання

Стійкість до перевантажень у декілька g

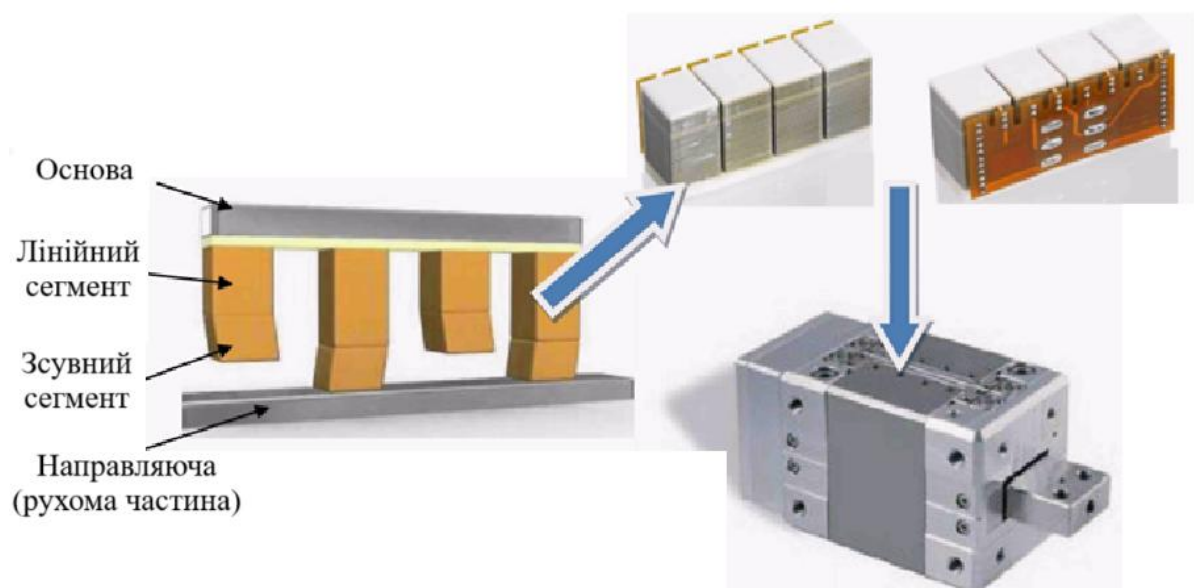


Рисунок 1.8 – Принципова схема п'єзоелектричного двигуна серії NEXLINE (ліворуч), зібраний активний модуль п'єзодвигуна (праворуч), лінійний п'єзоактуатор (праворуч внизу)

В активному модулі використовуються два типи п'єзоелементів: лінійний та зсувний (рис. 1.8). Лінійні п'єзоелементи закріплюються на основі, на яку діє сила переднавантаження. Зсувні п'єзоелементи контактують з рухомою частиною, переміщуючи їх у двох напрямках. Таким чином п'єзодвигуни NEXLINE дозволяють здійснювати переміщення на великі відстані з високою точністю. Схема переміщення зображена на рис.1.9.

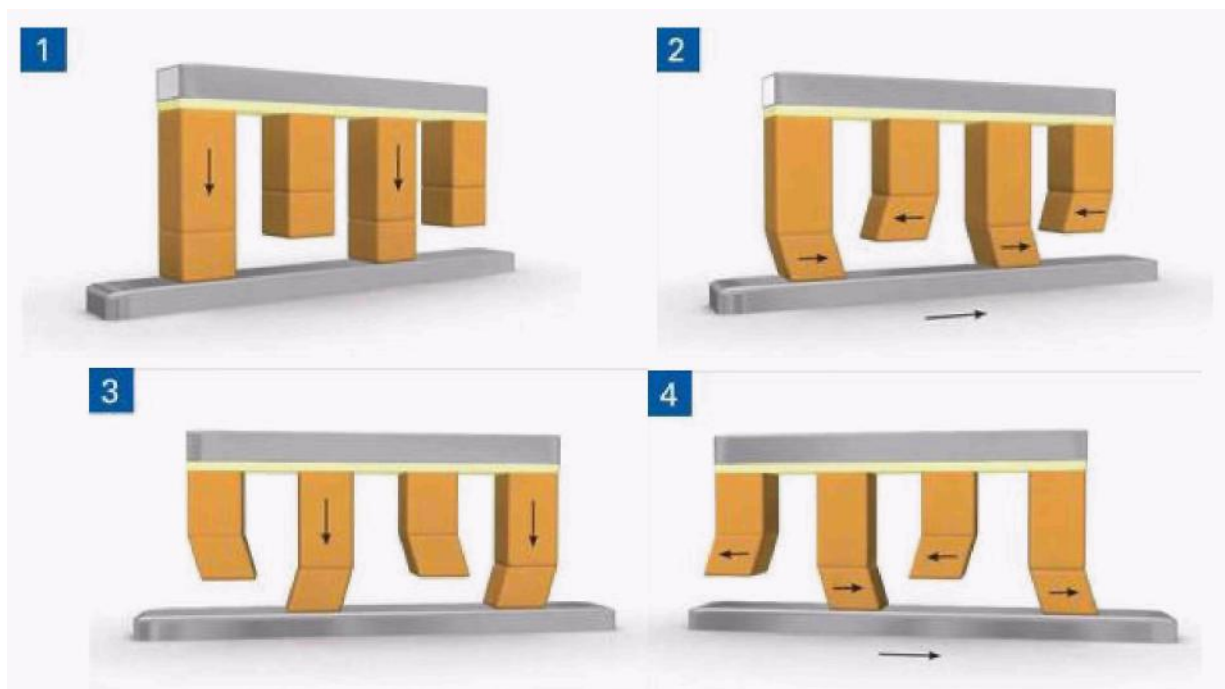


Рисунок 1.9 – Схема переміщення п'єзодвигуна NEXLINE. Стрілками показано напрямки деформації кожного з сегментів активного модуля

Величина кроку п'єзодвигуна залежить від величини навантаження, а також напрямку руху. Ефект гістерезису, що полягає в неоднозначності зміни розмірів п'єзокерамічних елементів від напрямку зміни електричного поля, не дозволяє приводу переміщатися з рівними кроками. Для компенсації нелінійності та досягнення високої повторюваності переміщення потрібен датчик положення.

Розглянемо детальніше режими роботи п'єзодвигуна NEXLINE.

Режим повного кроку

У режимі повного кроку існує часовий зсув між притисною та зсувною фазами, що веде до нерівномірності руху. На графіці нижче показана залежність прикладеної напруги (для лінійного та зсувного переміщення) від часу і відповідна зміна координати напрямної за один цикл роботи.

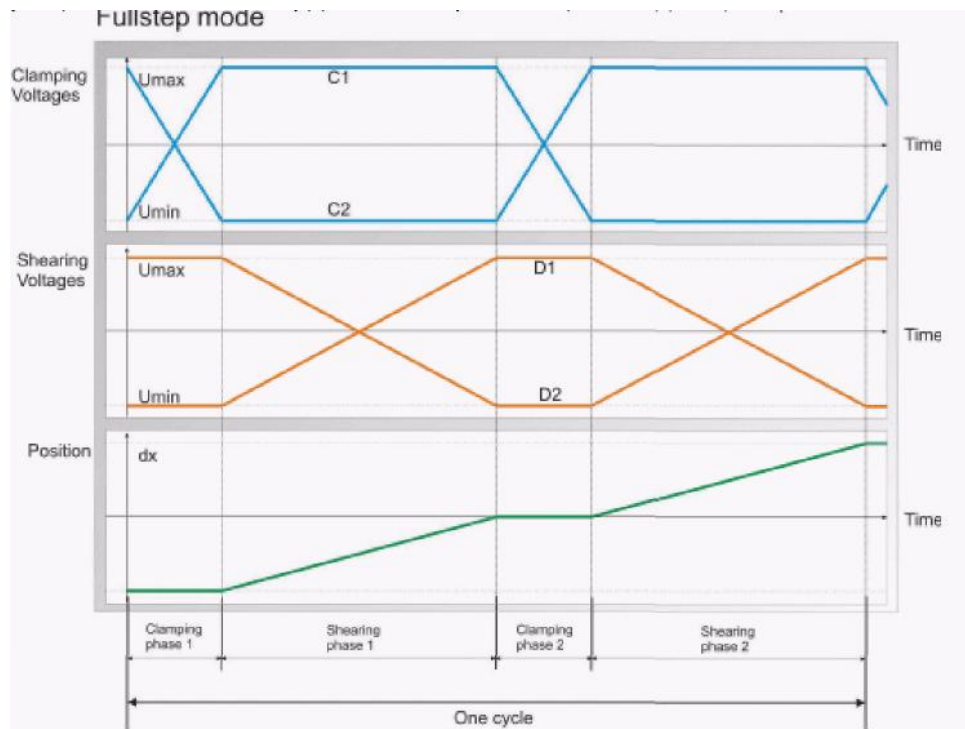


Рисунок 1.10 – Зміна координати рухомої частини п'єзоприводу в залежності від компонентів напруги керування в режимі повного кроку

Відповідно до рис. 1.10 видно, що привід не переміщається протягом періоду, коли п'єзоактуатор здійснює лінійний рух до напрямної. Рух "ніг" двигуна здійснюється попарно. Хід зсувного п'єзоактуатора визначає крок позиціонування. Варто відзначити, що напруга, що подається на лінійний сегмент, завжди є максимальна в режимі повного кроку, внаслідок чого зусилля п'єзодвигуна, що розвивається, в даному режимі теж максимальне. У режимі без зворотного зв'язку користувач може задавати величину кроку і його частоту (час одного циклу), що впливає на зусилля, що розвивається, і швидкість переміщення приводу. Максимальна частота кроку, що рекомендується, - 100 Гц для тривалого використання. Можливе підвищення частоти, проте на короткі часові проміжки. Величина кроку може змінюватись від кількох нанометрів до кількох мікрон. У режимі зі зворотним зв'язком користувач задає швидкість переміщення заданої координати (рекомендована швидкість -250 мкм/сек), після чого автоматично контролером визначається

оптимізація величини кроку. Після досягнення зазначеної координати п'єзодвигун переходить в режим очікування, тобто всі величини компонентів напруги досягають нуля, ноги п'єзодвигуна знаходяться в контакті з напрямною. Залежно від параметрів, зовнішніх умов та конкретної програми при переході в режим очікування можливе відхилення 10 нм від досягнутої координати. Час переходу в режим очікування не перевищує 2 сек.

Нанокроковий режим.

У нанокроковому режимі всі п'єзоелементи рухаються одночасно і знаходяться в контакті з рухомою частиною. Актуатор рухається поступово. Зважаючи на те, що діапазон переміщення зсувних п'єзоактуаторів не досягає максимальних значень, величина кроку і штовхаючого зусилля стає менше, ніж у режимі повного кроку.

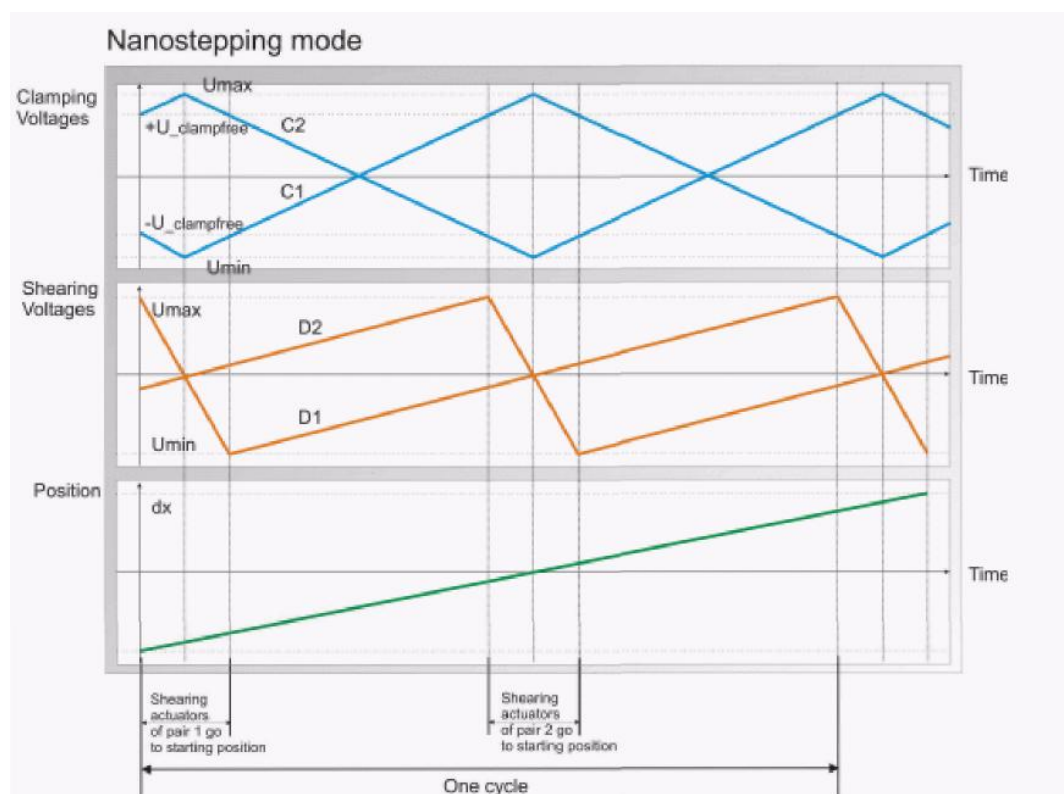


Рисунок 1.11 – Зміна координати рухомої частини п'єзоприводу в залежності від компонентів напруги керування в нанокроковому режимі

Аналоговий режим.

В аналоговому режимі всі ноги п'єзодвигуна знаходяться в контакті з направляючою, при цьому деформуються зсувні п'єзоактуатори. Діапазон їх віддалення визначає величину кроку. Максимальне значення величини кроку у цьому режимі становить кілька мікрон. Мінімальний крок обмежений лише шумом підсилювача. Перехід до аналогового режиму здійснюється через стадію, коли п'єзодвигун перебуває у режимі очікування.

П'єзодвигуни NEXLINE чутливі до перегріву. Тривале позиціонування на граничних швидкостях може призвести до нагрівання активного модуля та зниження терміну служби.

Принцип роботи та особливості п'єзоелектричних двигунів серії NEXAST.

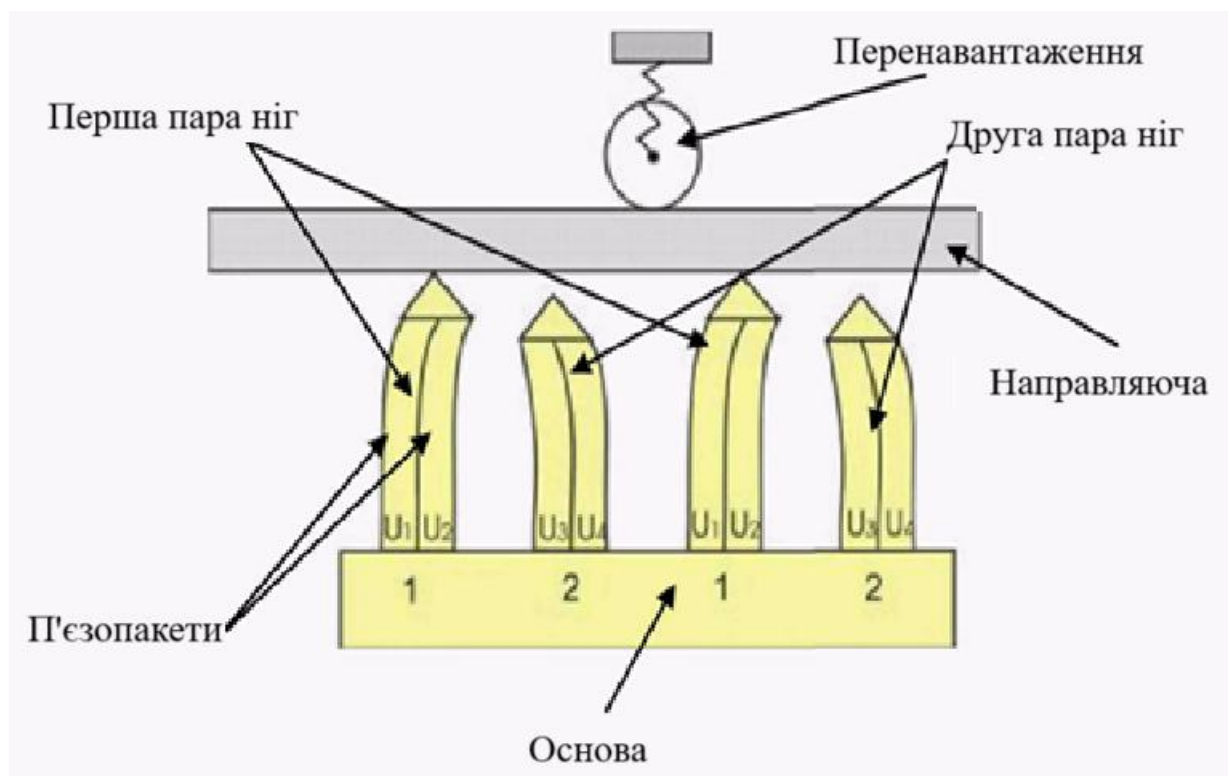


Рисунок 1.12 – Схема роботи модуля п'єзодвигуна серії NEXACT®

Окремий модуль п'єзодвигуна серії NEXACT® складається з основи, двох пар елементів, що згинаються («ніг») і рухомої частини («напрямної»), на яку діє сила переднавантаження. Кожна пара ніг працює синхронно і складається з двох п'єзопакетів. Внаслідок зворотного п'єзоефекту п'єзопакети подовжуються/скорочуються та згинаються, що дозволяє переміщувати напрямну (рис.1.12).

Існує два режими роботи п'єзодвигуна NEXACT®: безперервний (рис.1.13) та кроковий (рис.1.14). У безперервному режимі всі ноги п'єзодвигуна притиснуті до напрямної. У цій конфігурації напрямна переміщається з високою швидкістю, проте діапазон переміщення становить кілька мікрон, що пов'язано з обмеженням величини згину п'єзопакету. У кроковому режимі перша та друга пари ніг п'єзодвигуна працюють поперемінно. Діапазон переміщення обмежений лише довжиною напрямної.

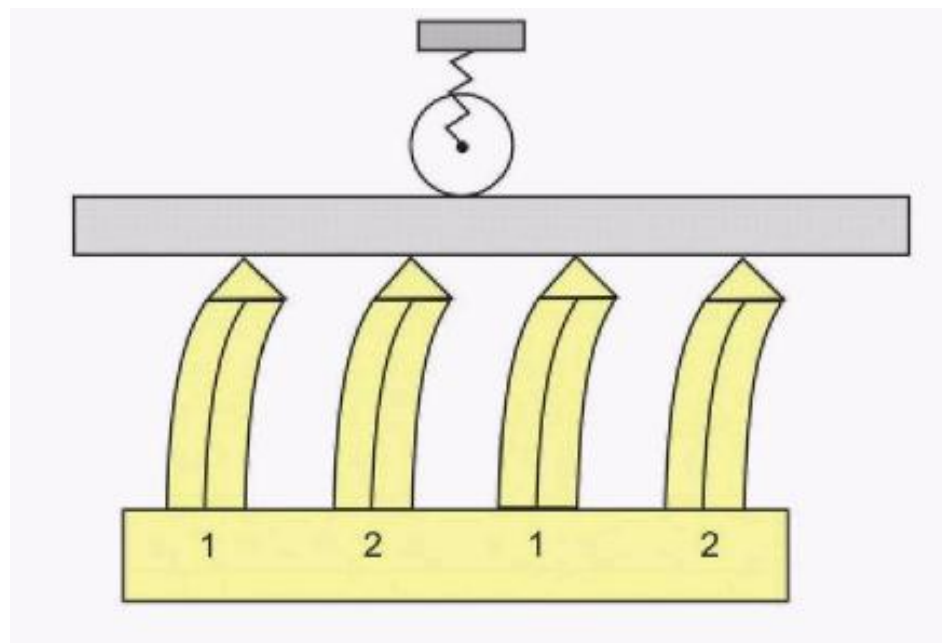


Рисунок 1.13 – Схема роботи п'єзодвигуна NEXACT® у безперервному режимі

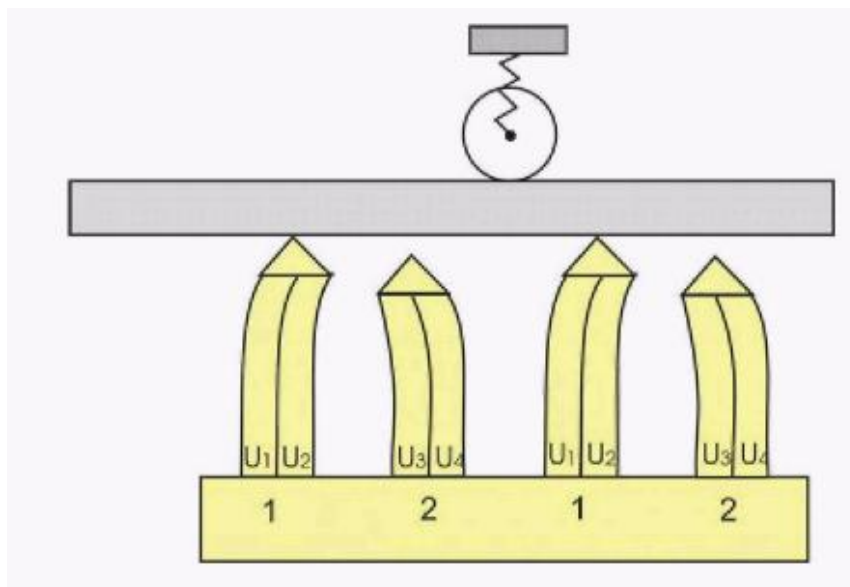


Рисунок 1.14 – Схема роботи п'єзодвигуна NEXACT® у кроковому режимі

Виходячи з особливостей конструкції приводів серії NEXACT® збільшення швидкості руху веде до зниження штовхаючого зусилля в напрямку переміщення.

Ультразвукові п'єзоелектричні двигуни Принцип роботи та особливості п'єзоелектричних двигунів серії PLine.

П'єзоприводи PLine мають такі технічні особливості:

Висока швидкість переміщення – до 500 мм/сек.

Компактність.

Самоблокування при відключенні живлення, відсутність виділення тепла в режимі очікування.

Відсутність передавальних механізмів та необхідності в обслуговуванні.

Немагнітний та вакуумно-сумісний принцип роботи.

Відсутність принципового обмеження діапазону переміщення.

Утримуюче зусилля до 15 Н, момент до 0.3 Н*м.

Мінімальний крок у режимі без зворотного зв'язку до 50 нм.

Принципова схема п'єзодвигунів лінійного та кутового типу показана на рис. 1.15.

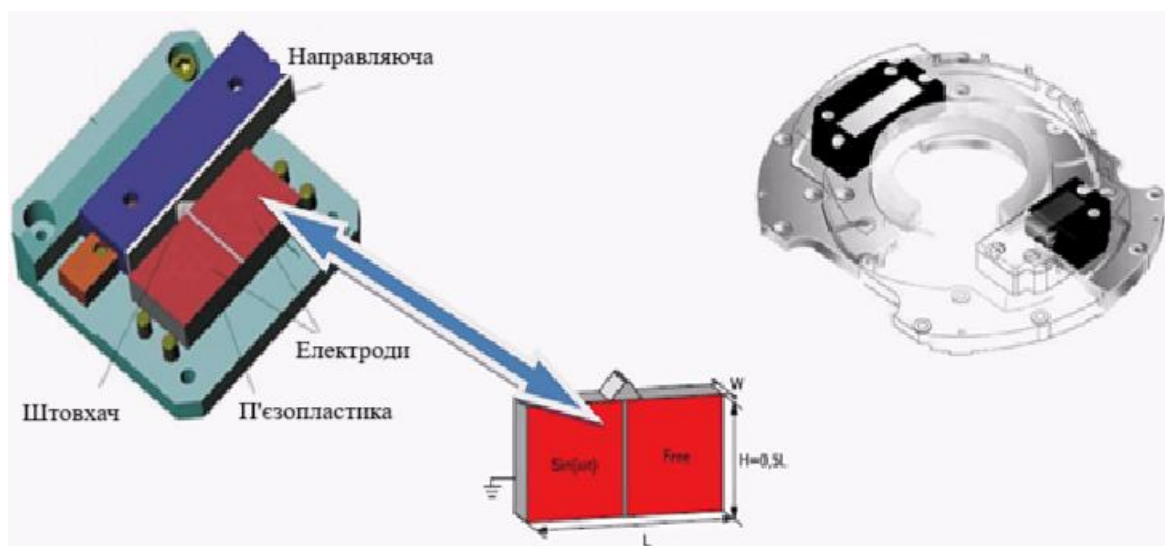


Рисунок 1.15 – Принципова схема лінійного (ліворуч) та кутового (праворуч) п'єзодвигунів серії PIShift.

П'єзоелектричні інерційні двигуни серії PIShift.

Принцип роботи та особливості п'єзодвигунів серії PIShift.

Приводи PiShift мають наступний ряд особливостей:

Відсутність принципового обмеження діапазону переміщення.

Самоблокування при відключенні живлення, відсутність виділення тепла в режимі очікування.

Мінімум шуму під час переміщення.

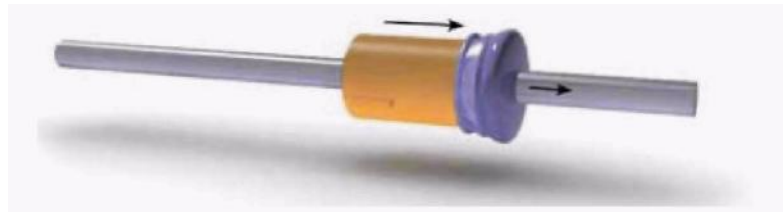
Утримуюче зусилля до 10 Н, максимальна швидкість понад 5 мм/сек.

Простота системи керування.

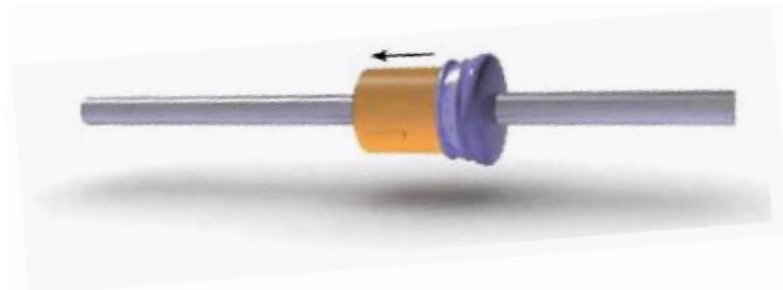
Низька вартість.

П'єзодвигуни серії PIShift засновані на ефект переривчастого руху (stick-slip effect). Основа приводу - п'єзоактуатор, до одного боку якого прикріплений переднавантажений фрикційний елемент. На п'єзоактуатор подається пилоподібний сигнал з контролера. У процесі наростання напруги імпульсу п'єзоелемент повільно розтягується і переміщає напрямну, оскільки штовхаюче зусилля не перевищує статичної сили тертя між напрямною та

фрикційним елементом. При різкому спаді напруги відбувається швидке «вкорочування» п'єзоактуатора, при цьому напрямна залишається в своєму місці, оскільки зусилля, яке розвивається п'єзоелементом, перевищує кінетичне тертя, що призводить до прослизання (рис.1.16).



При повільному розтягуванні направляюча переміщається разом з кільцевим п'єзоактуатором.



Швидке скорочення п'єзоактуатора, при цьому напрямна залишається на місці



Повільне розтягування, напрямна переміщається разом з кільцевим п'єзоактуатором.

Рисунок 1.16 – Схема руху інерційного п'єзодвигуна серії PIShift.

Таким чином електропривід на базі п'єзодвигунів є малогабаритним, легким, пратично безінерційним та енергоекономним. Також такі двигуни є безшумними і не потребують використання додаткових трансійсій. Ще однією перевагою п'єзодвигунів є те, що їхні конструкції створюють в основному лінійні переміщення, які є основними для приведення в рух біонічних протезів. Якщо у випадку ротаційних електродвигунів необхідним є використання перетворювачів кутового переміщення в лінійне, то п'єзоелектричні двигуни цього не потребують. Це значно спрощує

конструкцію протеза та підвищує його надійність. Однак, враховуючи ємнісний а не індуктивний (як для класичних електродвигунів) тип навантаження, необхідним є викоистання складних систем керування таким електроприводом. Тому в роботі власне і проєктується система керування групою таких п'єзодвигунів для біонічного протеза.

1.4 Висновки до розділу 1

Проаналізовано основні типи приводів, які використовуються в біомехатронних пристроях та можуть бути застосовані в біонічних протезах.

Зокрема розглянуто електромагнітні приводи, такі як соленоїди, електродвигуни постійного струму, крокові двигуни, безщіткові двигуни. Також розглянуто основні типи трансмісій для біомехатронних систем та можливості їх використання в біонічних протезах.

Практично в усіх сучасних біонічних протезах кисті руки як електропривід використовуються ротаційні електродвигуни, зокрема безщіткові та трансмісії у вигляді або клино-пасових передач абонаборів шестерень. При цьому такі протези є інерційними і повільними. Потрібен певний час, щоб палець протеза зігнувся чи виконався захват. Це пов'язано із тим, що в трансмісіях за рахунок зменшення швидкості обертання збільшується крутний момент і досягається необхідна сила захвату. Також складним є регулювання швидкостей виконання рухів. Це потребує складних систем керування такими приводами. Також складно забезпечити виконання великої кількості рухів та захватів протезом, оскільки для цього потрібно виділяти із поверхневих ЕМГ сигналів більшу кількість інформативних ознак про виконання бажаних рухів.

З іншої сторони такі елетроприводи є досить шумкими і також споживають багато електроенергії, що обмежує час їхньої роботи від акумуляторних батарей.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		33

Тому актуальним є застосування в біонічних протезах альтернативних електроприводів, які були б позбавлені згаданих недоліків. Одним із таких перспективних електроприводів є використання п'єзоелектричних двигунів.

Встановлено, що електропривід на базі п'єзодвигунів є малогабаритним, легким, пратично безінерційним та енергоекономним. Також такі двигуни є безшумними і не потребують використання додаткових трансій. Ще однією перевагою п'єзодвигунів є те, що їхні конструкції створюють в основному лінійні переміщення, які є основними для приведення в рух біонічних протезів. Якщо у випадку ротаційних електродвигунів необхідним є використання перетворювачів кутового переміщення в лінійне, то п'єзоелектричні двигуни цього не потребують. Це значно спрощує конструкцію протеза та підвищує його надійність. Однак, враховуючи ємнісний а не індуктивний (як для класичних електродвигунів) тип навантаження, необхідним є викоистання складних систем керування таким електроприводом. Тому в роботі власне і проєктується система керування групою таких п'єзодвигунів для біонічного протеза.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ОСНОВІ П'ЄЗОДВИГУНІВ

2.1 Можливість застосування п'єзоелектричних двигунів в біонічних протезах

Як зазначалось в попередньому розділі, застосування п'єзоелектричних двигунів є особливо перспективним при розробленні швидких, потужних та економічних біонічних протезів. Використання цього типу двигунів із лінійним переміщенням не потребує додаткових трансмісій, механічних перетворювачів напрямку руху чи нарощування продукovanого зусилля. Також при малих розмірах такі двигуни створюють величезні як для свого розміру зусилля.

Однак керування цими двигунами є відмінним від керування електродвигунів, які сьогодні використовуються в більшості біонічних протезів. Тому в основі проєктованої системи керування таким електроприводом мають лежати схеми драйверів п'єзоелектричних двигунів, які забезпечували б можливість як виконання окремих рухів протезами, так і регулювання швидкості виконання руху так і зміни сили виконання захватів.

2.2 Задача проектування драйверів п'єзоелектричних двигунів

Як і для електромагнітних двигунів, повний вузол п'єзодвигуна складається з трьох частин: електронного приводу, самого електромеханічного перетворювача (двигуна) та вихідного з'єднання.

Для електромагнітних двигунів функція приводу вимагає подачі та введення струму в електромагнітні котушки, що зазвичай здійснюється за допомогою силових напівпровідників (MOSFET або IGBT). Ці силові пристрої

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
						35
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

керуються драйверами, які вмикають та вимикають їх у потрібний час, з відповідними швидкостями зміни напруги. Напруга, що подається на вихідний каскад MOSFET або IGBT, необхідна для примусової подачі струму в котушки, але саме струм забезпечує електромагнітну силу для катушок двигуна.

Для п'єзодвигунів ситуація зовсім інша. Замість керуючого струму драйвер повинен подавати відносно високу напругу для створення електричного поля, а струм є вторинним фактором, що супроводжує цю прикладену напругу. Таким чином, сценарій п'єзоприводу є доповненням до електромагнітного приводу, де потрібен струмовий привід, а напруга є наслідком; тут потрібна напруга, а струм є наслідком. П'єзоелектричний драйвер повинен подавати необхідну напругу (не струм) на ємнісне (не індуктивне) навантаження, а також контролювати та модулювати цю напругу, щоб забезпечити бажане видовження кристала. Іншими словами, струм є незалежним параметром, а напруга – залежним параметром для звичайних двигунів, але для п'єзоелектричних двигунів ситуація протилежна.

Необхідні рівні напруги (а отже, і струму) для п'єзоелектричного двигуна залежать від розміру п'єзоелектричного елемента, передбачуваного видовження та швидкості руху. На нижньому рівні величини напруг і струмів можуть становити 20–30 В та 10–30 мА відповідно, але більшість високопродуктивних п'єзоелектричних пристроїв потребують щонайменше 100 В та від 10 до кількох сотень міліампер.

Саме ця потреба в забезпеченні високої напруги при помірних струмах є проблемою електричного проектування. Крім того, п'єзоелектричний драйвер повинен залишатися стабільним, незважаючи на високоємнісний характер навантаження, яке може сягати ємності в 1000 пФ (1 нФ) і більше. Також, оскільки п'єзоелектричний пристрій є плаваючим диференціальним пристроєм, більшість застосувань потребують диференціального біполярного виходу драйвера.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		36

Одне важливе застереження: оскільки ці двигуни працюють на вищих напругах, існують проблеми безпеки користувача, фізичної ізоляції та захисту від напруг. Тому будь-яка схема керування п'єзодвигуном повинна враховувати ці умови компонування та розміщення.

Розробка та забезпечення відносно високих напруг, необхідних для п'єзопристроїв, у багатьох випадках є складним завданням, оскільки більшість мікросхем підсилювачів є низьковольтними пристроями, тоді як високовольтні MOSFET/IGBT зазвичай оптимізовані для керування струмом, а не для керування напругою. Існують деякі спеціалізовані операційні підсилювачі (ОП), призначені для п'єзоелектричного керування при вищих струмах і напругах з використанням високовольтних ІМС-процесів або гібридних пристроїв, які поєднують операційні підсилювачі нижчої напруги з транзисторами, що підвищують напругу на своєму виході.

В принципі, можна побудувати базовий високовольтний драйвер, використовуючи лише один транзистор з відповідною номінальною напругою.

Однак, існують мікросхеми, спеціально розроблені для керування п'єзоелементами, додаючи необхідні функції, включаючи керування наростанням сигналу високої напруги. Ці мікросхеми також мають захисти від температури, перевантаження та короткого замикання, що є обов'язковим у практичних конструкціях.

Наприклад, Analog Devices пропонує ADA4700-1, високовольтний прецизійний підсилювач із широким діапазоном робочої напруги (від ± 5 до ± 50 В). Хоча цей восьмививідний SOIC-пристрій виглядає як стандартний операційний підсилювач, він оптимізований для забезпечення високої швидкості наростання сигналу в ємнісні навантаження.

ADA4700-1 стабільний з мінімальним перерегулюванням при керуванні ємнісними навантаженнями, але додаткова компенсація може покращити відгук при керуванні більшими ємностями. Це вимагає малої демпферної ланки, Рис. 2.1; для застосувань з одиничним коефіцієнтом пісилення та

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		37

ємнісних навантажень до 1 нФ (1000 пФ) достатньо комбінації резистора 150 Ом та конденсатора 10 нФ. Для більших навантажень до 10 нФ та вищих коефіцієнтів підсилення, наприклад, десятикратного, резистор зменшується до 22, а ємність конденсатора збільшується до 100 нФ. Нарешті, рівень струму керування можна підвищити, додавши зовнішню пару комплементарних транзисторів (PNP/NPN) (Рис 2.2).

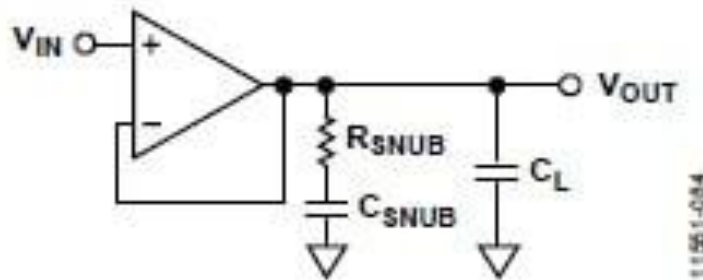


Рисунок 2.1 – Керування високоємнісними навантаженнями до ADA4700-1
додано просту зовнішню RC-схему з демпфером

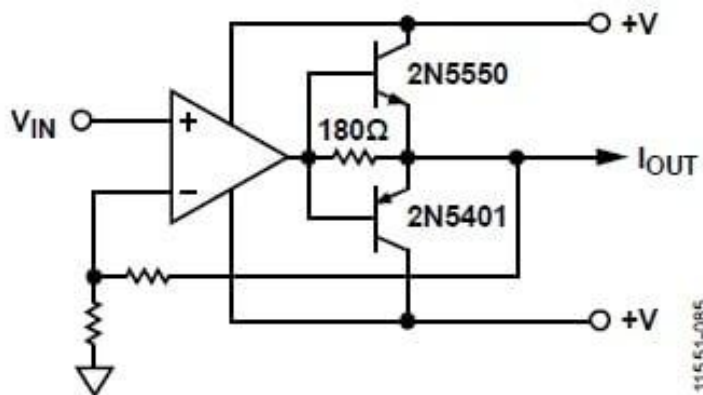


Рисунок 2.2 – Якщо потрібен додатковий вихідний струм, до виходу
ADA4700-1 додається пара транзисторів PNP/NPN.

Texas Instruments також пропонує пристрої, які добре підходять для п'єзоелектричних навантажень. Їхній п'єзоелектричний тактовий драйвер DRV8662 з інтегрованим підвищувальним перетворювачем має високий ступінь функціональності, включаючи підвищувальний перемикач 105 В

(рис. 2.3), проте йому потрібне лише джерело живлення від 3,0 до 5,5 В. Підвищувальна напруга встановлюється за допомогою двох зовнішніх резисторів, тоді як коефіцієнт підсилення пристрою можна встановити один з 4 можливих за допомогою двох ліній вводу/виводу.

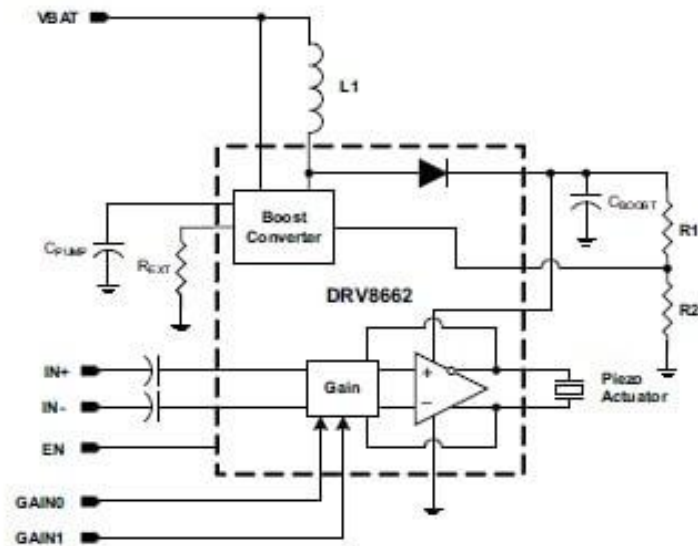


Рисунок 2.3 – DRV8662 – це п'єзоелектричний драйвер, призначений для точних застосувань, який забезпечує понад 100 В від одного джерела живлення

Він має широкий спектр можливостей керування. Наприклад, при роботі з частотою 300 Гц він призначений для керування ємністю 100 нФ при 200 В розряду, 150 нФ при 150 В розряду, 330 нФ при 100 В розряду та 680 нФ при 50 В розряду. Незважаючи на внутрішню складність, цей двадцятививідний QFN 4 × 4 мм простий у використанні, що видно з його схеми з'єднання.

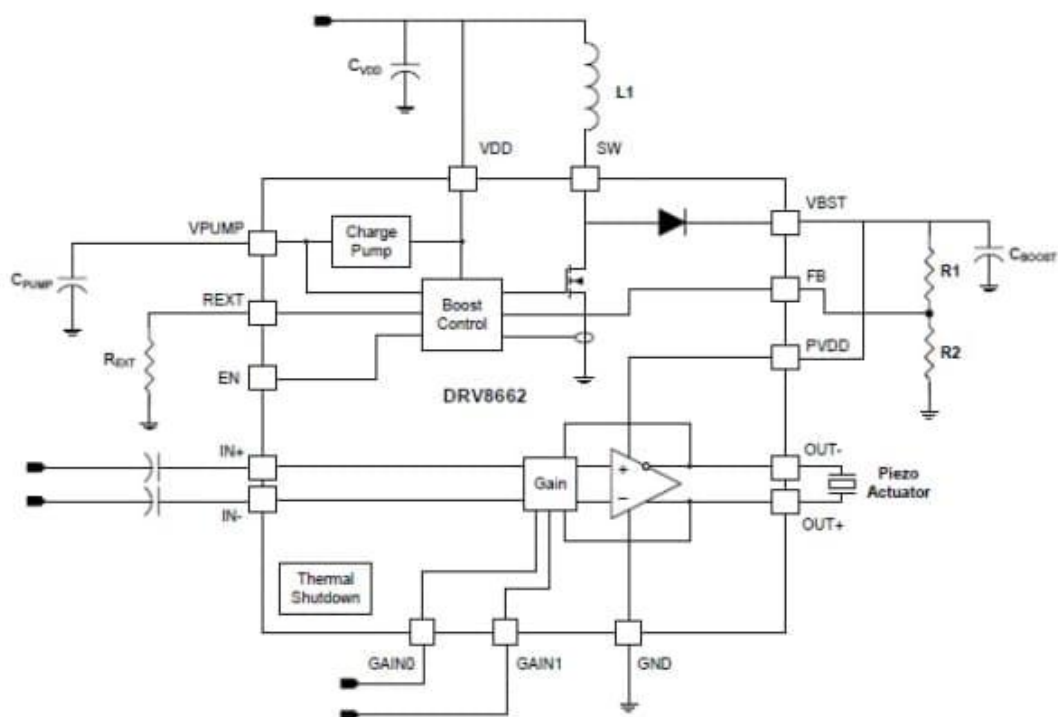


Рисунок 2.4 – Незважаючи на внутрішню складність, використання DRV8662 у схемі вимагає лише кількох зовнішніх компонентів для встановлення основних робочих параметрів.

Деякі постачальники п'єзоелектричних мікросхем вийшли за рамки простого надання мікросхем та їхньої основної допоміжної документації, такої як технічні характеристики, і натомість пропонують детальні довідкові проекти.

2.3 Вибір драйвера керування п'єзоелектричним двигуном

2.3.1. NSD-2101

У поєднанні зі SQUIGGLE® RV або UTAF, NSD-2101 забезпечує найменше рішення для керування п'єзоелектричним двигуном із прямим живленням від батареї; схема підвищення напруги не потрібна.

NSD-2101 — це спеціалізована мікросхема драйвера п'єзоелектричного двигуна ASIC, здатна керувати двигуном SQUIGGLE® RV серії зі зниженою напругою або двигуном UTAF від одного джерела живлення 2,3–5,5 В постійного струму. Двигуном можна керувати за допомогою стандартного інтерфейсу ПК.

NSD-2101 використовує запатентовану технологію керування для динамічного регулювання частоти двигуна для підтримки оптимальної продуктивності двигуна та мінімального споживання енергії в широких діапазонах температур та робочих умовах.

NSD-2101 ідеально підходить для драйверів п'єзоелектричного двигуна SQL-RV-1.8 SQUIGGLE® RV та драйверів п'єзоелектричного двигуна UTAF.

На рис.2.5 показано основні структурні блоки системи:

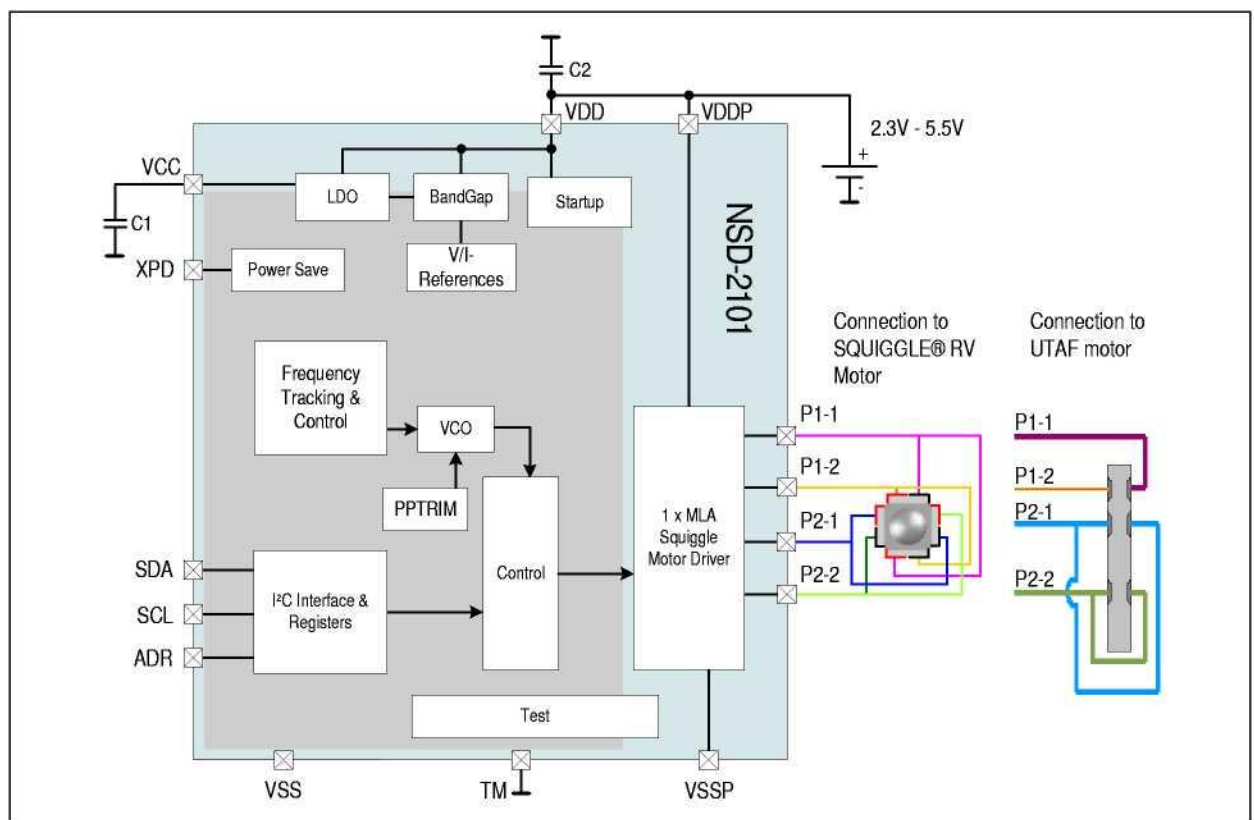


Рисунок 2.5 – Основні структурні блоки системи: вхід живлення; LDO та байпасні конденсатори ; інтерфейс ПК; регістри; генератор; відстеження частоти; драйвер повного мосту

Вхідна напруга подається безпосередньо на драйвер повного мосту. При повному мостовому управлінні кожен п'єзоелемент отримує вдвічі більшу вхідну напругу ($2 \times VDD$). Однак середня вхідна напруга на п'єзоелемент може регулюватися ASIC між VDD та $2 \times VDD$. Ця середня напруга, яку можна встановити через ПК разом із шпаруватістю (або шириною імпульсу) сигналу керування, визначає швидкість двигуна. В результаті на нижчих швидкостях двигун споживає менше енергії.

Регістри I2C також визначають початкову частоту перемикання двигуна, яку можна регулювати від 50 кГц до 200 кГц залежно від типу двигуна. Інші регістри керують напрямком руху двигуна та кількістю імпульсів, протягом яких двигун активний (що корелює з пройденою відстанню). Вхід XPD забезпечує режим очікування.

Вихідні драйвери здатні керувати ємнісним навантаженням до 60 нФ. Концепція базується на двох повних мостах на двигун. Двигун зі зниженою напругою Squiggle складається з 2 пластин на фазу та 2 фаз. У режимі вимкнення живлення вихідні драйвери підключаються до землі. Те саме стосується і вимкненого двигуна.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
						42
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

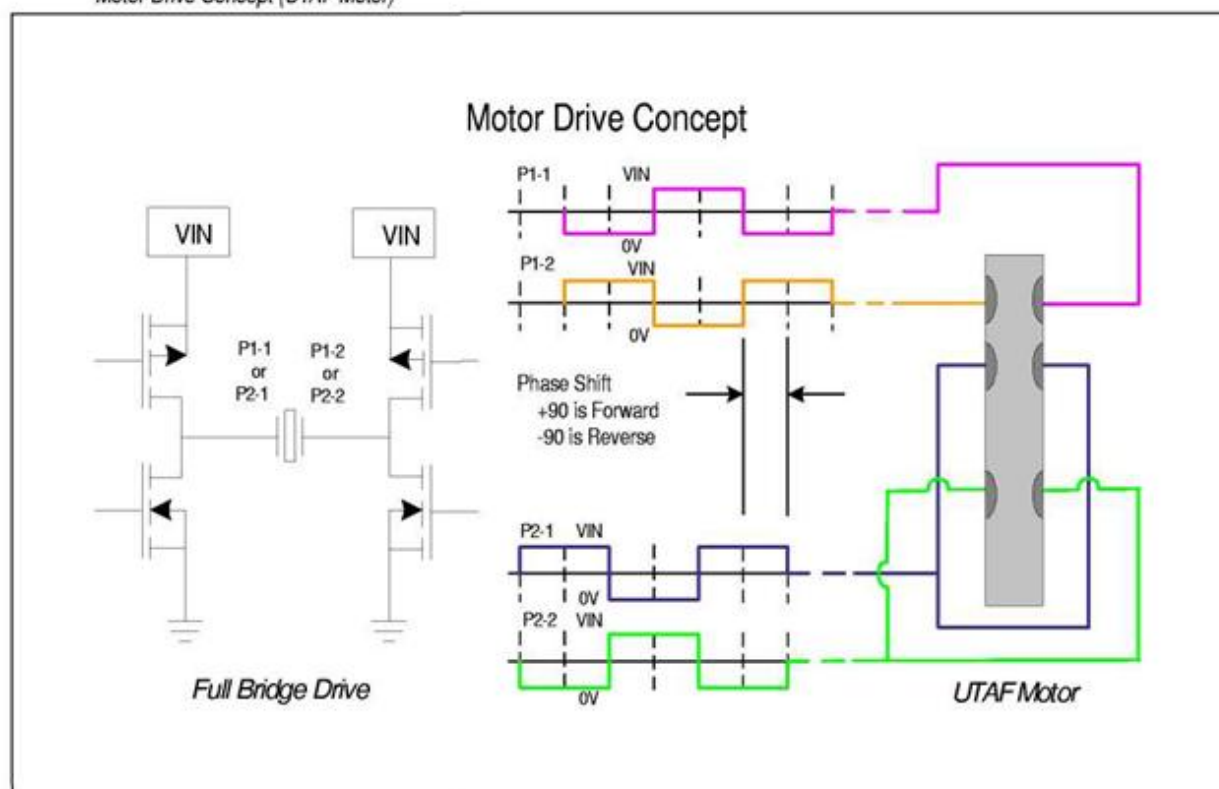
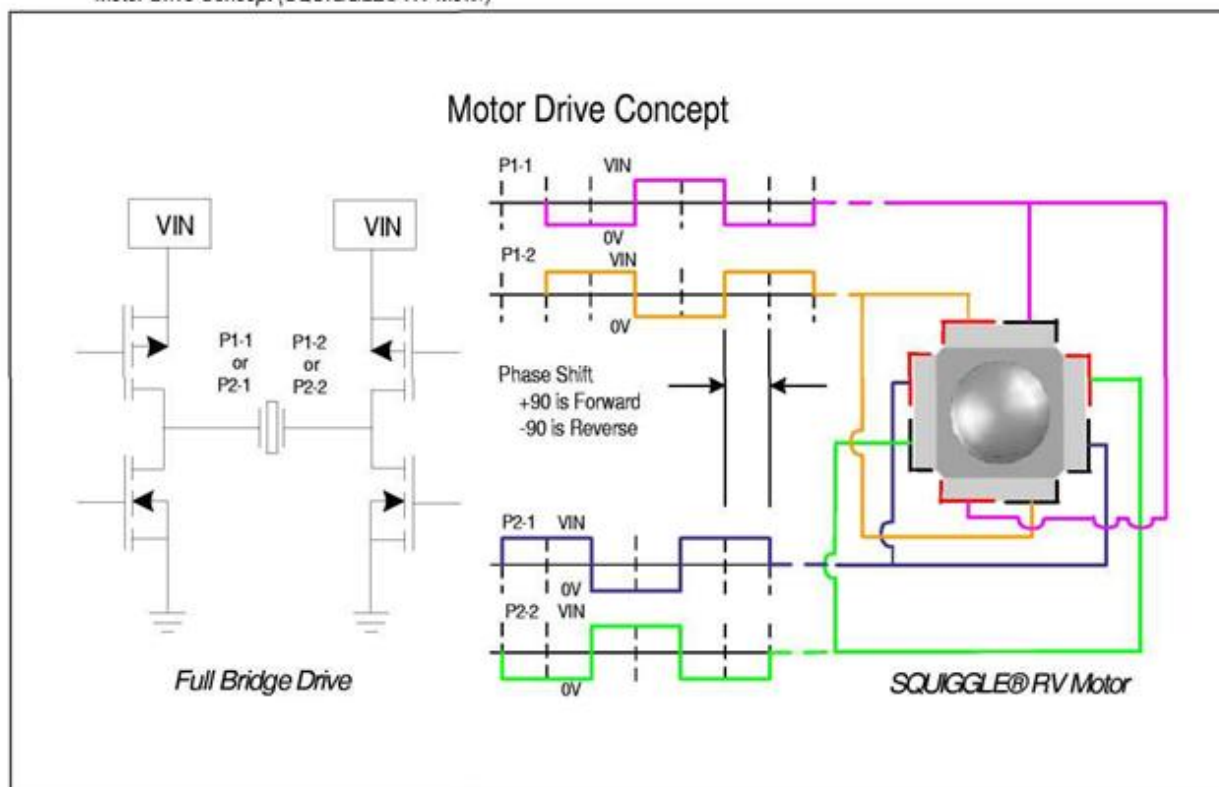


Рисунок 2.6 – Мостове керування п'єзодвигунами

Визначення часу наростання та спаду показано на рис. 2.7. Вимірюється час між перетином 10% та 90% порогу мінімального VDD, від 10% до 90% для часу наростання та від 90% до 10% для часу спаду. Повний цикл перемикання мосту триватиме довше.

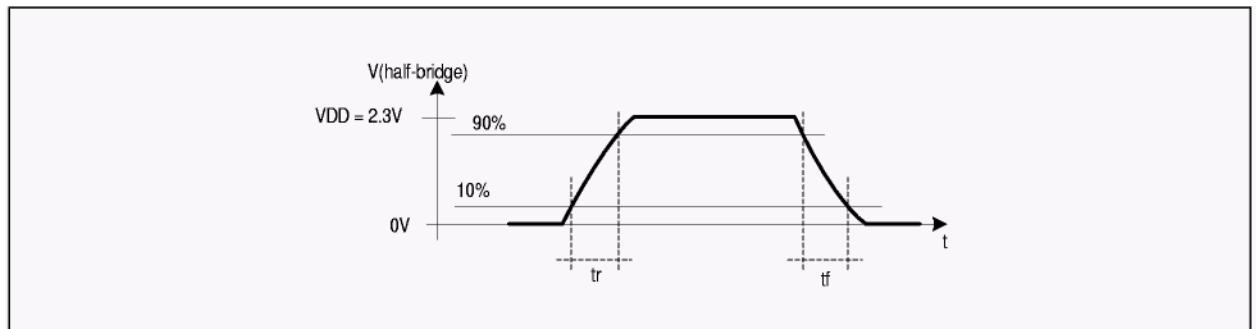


Рисунок 2.7 – Визначення часу наростання/спаду

На рис. 2.8 показано вплив обмеження струму у вихідних драйверах. Кожен вихід напівмоста може видавати 1000 мА.

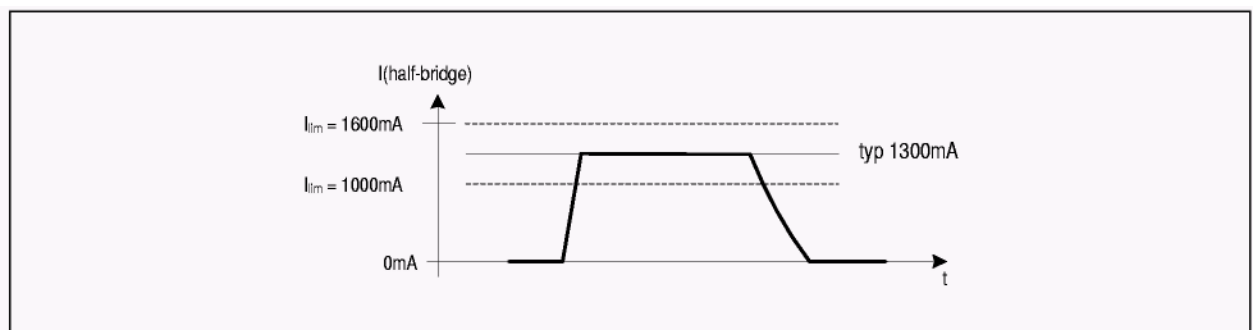


Рисунок 2.8 – Обмеження струму вихідного драйвера

Залежно від типу двигуна, початковий період сигналу керування має бути записаний у NSD-2101. Період визначається в одиницях 0,04 мкс (на основі номінальної внутрішньої частоти ГКН 25 МГц). У випадку двигуна SQL-RV-1.8 період може становити 148 для генерації частоти керування - 168,9 кГц.

NSD-2101 здатний оптимізувати частоту керування за командою перемикаючись по діапазону частот, зосереджених на заданому періоді, та встановлюючись на частоті, на якій було виявлено найкращу продуктивність двигуна. Як варіант, NSD-2101 може бути наказано поступово збільшувати частоту в напрямку збільшення продуктивності двигуна (змінюючи напрямок кроку, коли продуктивність падає).

В будь-якому випадку NSD-2101 регулює частоту, регулюючи підлаштування ГКН, а не кількість періодів. Це забезпечує набагато вищу роздільну здатність, ніж це можливо шляхом зміни кількості періодів.

Інтерфейс ПК використовується для керування NSD-2101 та встановлення значення кількох регістрів. Ці регістри визначають напрямок і тривалість вихідних сигналів драйвера, шпаруватість, фазовий зсув і середню напругу на двигуні.

Умова запуску/зупинки. Перехід з високого на низький рівень на лінії SDA, коли SCL має високий рівень, є умовою запуску шини. Перехід з низького на високий рівень на лінії SDA, коли SCL має високий рівень, є умовою зупинки.

2.3.2. DRV8662

DRV8662 – високовольтний п'єзоелектричний драйвер

Забезпечує ємність до 100 нФ при 200 В та 300 Гц

Забезпечує ємність до 150 нФ при 150 В та 300 Гц

Забезпечує ємність до 330 нФ при 100 В та 300 Гц

Забезпечує ємність до 680 нФ при 50 В та 300 Гц

DRV8662 — це однокристальний п'єзо драйвер з інтегрованим підвищувальним перетворювачем на 105 В, інтегрованим силовим діодом та інтегрованим повністю диференціальним підсилювачем. Цей універсальний пристрій здатний керувати як високовольтними, так і низьковольтними п'єзоактуаторами. Вхідний сигнал може бути як диференціальним, так і

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		45

несиметричним. DRV8662 підтримує чотири коефіцієнти підсилення, керовані GPIO: 28,8 дБ, 34,8 дБ, 38,4 дБ та 40,7 дБ.

Підвищувальна напруга встановлюється за допомогою двох зовнішніх резисторів, а обмеження струму підсилення програмується за допомогою резистора R_{EXT} . Архітектура підвищувального перетворювача не дозволить споживанню струму живлення перевищити обмеження, встановлене резистором R_{EXT} ; тому DRV8662 добре підходить для портативних застосувань. Ця функція також дозволяє користувачеві оптимізувати схему DRV8662 для заданого індуктора на основі бажаних вимог до продуктивності.

Типовий час запуску 1,5 мс робить DRV8662 ідеальним п'єзоелектричним драйвером для швидкої реакції. Захист від теплового перевантаження запобігає пошкодженню пристрою.

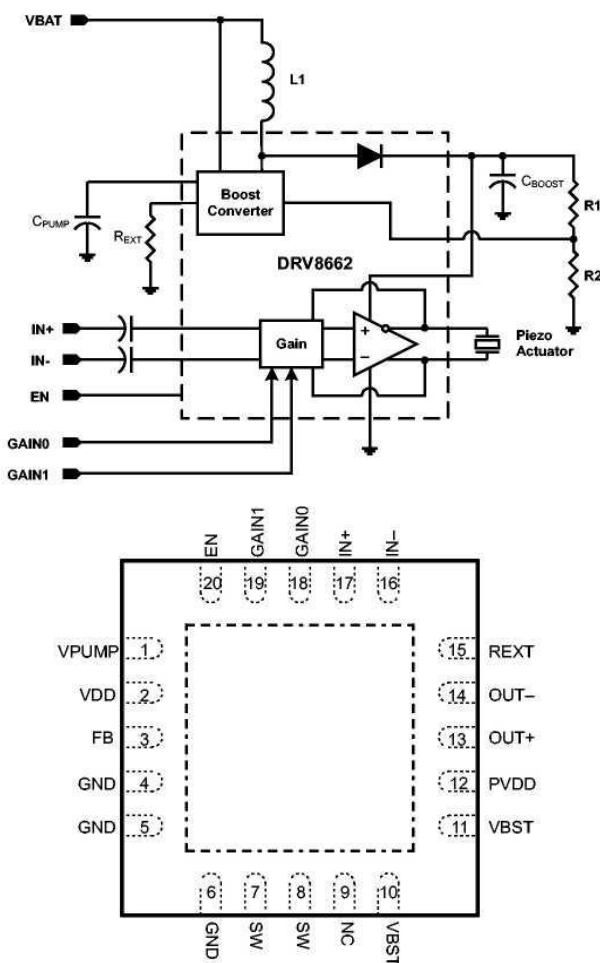


Рисунок 2.9 – Включення драйвера DRV8662

DRV8662 має швидкий час запуску, що є важливим для досягнення низької затримки. Коли контакт EN переходить з низького на високий рівень, вмикається підсилювальне живлення, вхідний конденсатор попередньо заряджається, і підсилювач вмикається за типовий загальний час запуску 1,5 мс. У системному застосуванні загальна затримка системи повинна бути меншою за 30 мс, щоб бути непомітною для кінцевого користувача. При 1,5 мс DRV8662 становитиме невеликий відсоток від загальної затримки системи.

Коефіцієнт підсилення від IN+/IN- до OUT+/OUT- наведено в таблиці нижче.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт підсилення від IN+/IN- до OUT+/OUT-

GAIN1	GAIN0	Gain (dB)
0	0	28.8
0	1	34.8
1	0	38.4
1	1	40.7

Коефіцієнти підсилення оптимізовані для досягнення приблизно 50 В на одиницю напруги (ppm), 100 В на одиницю напруги (ppm), 150 В на одиницю напруги (ppm) або 200 В на одиницю напруги (ppm) на виході без обмеження напруги від джерела пікового одностороннього вхідного сигналу 1,8 В.

Вихідну напругу інтегрованого підвищувального перетворювача можна регулювати резистивним дільником зворотного зв'язку між вихідною напругою підвищення (VBST) та виводом зворотного зв'язку (FB). Напругу підвищення слід запрограмувати на значення, що перевищує максимальну пікову напругу сигналу, яку користувач очікує створити за допомогою підсилювача DRV8662. Нижчі напруги підвищення забезпечать кращу ефективність системи при застосуванні сигналів з меншою амплітудою, тому

користувач повинен бути обережним і не використовувати вищу напругу підвищення, ніж необхідно. Максимально допустима напруга підвищення становить 105 В.

Обмеження струму підвищуючого перемикача можна регулювати за допомогою резистора, підключеного до землі, розміщеного на виводі REXT. Запрограмоване обмеження струму має бути меншим за номінальну межу насичення двигуна, вибраного користувачем, щоб уникнути пошкодження як двигуна, так і DRV8662. Якщо комбінація запрограмованого обмеження та насичення двигуна недостатньо висока, то вихідний струм підвищувального перетворювача буде недостатньо високим для регулювання вихідної напруги підвищення в умовах високого навантаження. Це, у свою чергу, призведе до провисання підвищувальної шини, що може спричинити спотворення вихідної форми сигналу.

DRV8662 має вбудований насос заряду для забезпечення належного керування затвором для внутрішніх вузлів. Вихід цього насоса заряду розміщено на виводі VPUMP. На цьому виводі необхідно розмістити накопичувальний конденсатор X5R або X7R ємністю 0,1 мкФ з номінальною напругою 10 В або більше.

DRV8662 містить внутрішній датчик температури, який вимикає як підвищувальний перетворювач, так і підсилювач, коли перевищено поріг температури. Коли температура кристала падає нижче порогового значення, пристрій автоматично перезапускає роботу, поки на виводі EN високий рівень. Безперервна робота DRV8662 не рекомендується. Більшість моделей, що використовують мікросхему, використовують DRV8662 лише короткими періодами. Функція теплового вимкнення захистить DRV8662 від пошкодження при перевантаженні, але завжди слід уникати моделей, які призводять до теплового вимкнення DRV8662.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		48

Для підтримки плавної роботи слід використовувати просту послідовність запуску. Якщо послідовність не дотримуватися, можуть виникнути небажані події або звуки.

Найнижче налаштування коефіцієнта підсилення оптимізовано для 50 В на піксельну напругу з підвищувальною напругою 30 В. Деяким програмам може не знадобитися 50 В на піксельну напругу, тому користувач може запрограмувати підвищувальний перетворювач до 15 В для підвищення ефективності. Під час використання підвищувальної напруги нижче 30 В слід враховувати деякі особливі міркування. По-перше, щоб зменшити пульсації підсилення до прийнятного рівня, рекомендується використовувати підвищувальний конденсатор ємністю 0,22 мкФ з номінальною напругою 50 В. По-друге, може знадобитися налаштування повного вхідного діапазону, щоб уникнути обмеження напруги. Зазвичай, односторонній ШІМ-сигнал 1,8 В дасть 50 В на піку напруги при найнижчому коефіцієнті підсилення. Наприклад, якщо підвищувальна напруга встановлена на 25 В для повного вихідного сигналу 40 В на піку напруги, повний вхідний діапазон падає до 1,44 В для односторонніх ШІМ-входів. У цьому випадку може знадобитися дільник вхідної напруги, якщо як джерело ШІМ використовується вхід/вихід 1,8 В.

Вихідна підвищувальна напруга (VBST) програмується за допомогою двох зовнішніх резисторів, як показано на рис. 2.10.

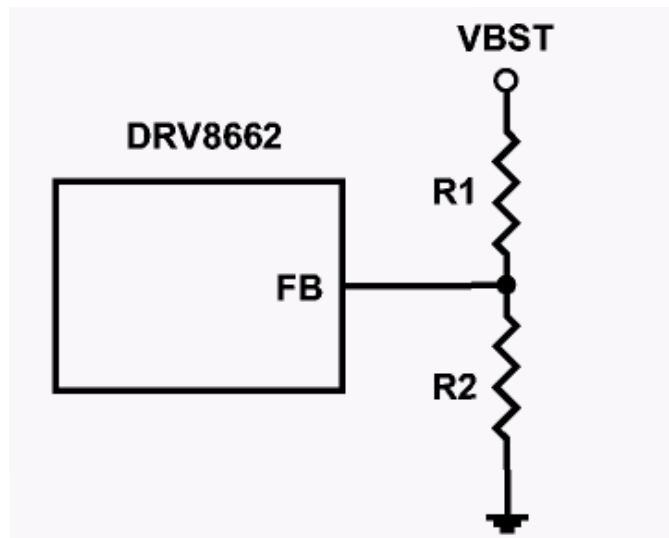


Рисунок 2.10 – Програмування підвищеної напруги

Вихідна підвищена напруга визначається рівнянням 2.1:

$$V_{\text{BOOST}} = V_{\text{FB}} \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \right] \quad (2.1)$$

де $V_{\text{FB}} = 1,32 \text{ В}$.

VBST слід запрограмувати на значення на 5,0 В більше, ніж найбільша пікова напруга, що очікується в системі, щоб забезпечити достатній запас потужності підсилювача. Оскільки діапазон програмування для напруги підвищення поширюється до 105 В, струм витоку через резисторний дільник може стати значним. Рекомендується, щоб сума опорів R1 та R2 була більше 500 кОм. При використанні номіналів резисторів більше 1 МОм, забруднення друкованої плати може призвести до неточності напруги підвищення.

Піковий струм, що споживається з джерела живлення через індуктор, встановлюється виключно резистором R_{exT} . Це обмеження пікового струму не залежить від обраного значення індуктивності, але індуктор повинен бути здатним обробляти це запрограмоване обмеження. Зв'язок R_{EXj} з I_{UM} апроксимується рівнянням 2.2.

$$R_{EXT} = \left[K \frac{V_{REF}}{I_{LIM}} \right] - R_{INT} \quad (2.2)$$

де $K = 10500$, $V_{REF} = 1,35 \text{ В}$, $R_{INT} = 60 \text{ Ом}$, а I_{Um} – бажана межа пікового струму через індуктор.

DRV8662 зазвичай використовується в системах, які потребують зворотного зв'язку з використанням високовольтних п'єзоелектричних актуаторів. Ці системи зазвичай містять прикладний процесор або мікроконтролер, який генерує потрібну форму хвилі.

Схема системи DRV8662 з входом ЦАП

На наступній схемі DRV8662 налаштовано з диференціальним входом ЦАП та загальним п'єзоелектричним актуатором. Це корисно для систем, які мають доступний ЦАП або генератор аналогових сигналів.

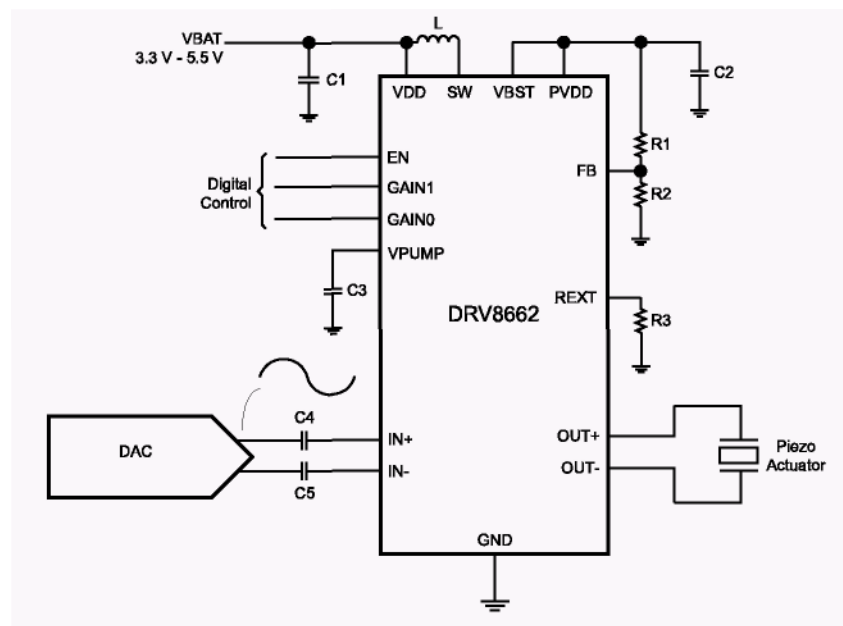


Рисунок 2.11 – Схема системи DRV8662 з входом ЦАП

Вибір індуктора відіграє вирішальну роль у продуктивності DRV8662. Діапазон рекомендованих індуктивностей становить від 3,3 мкГн до 22 мкГн.

Загалом, вищі індуктивності в межах серії індуктивностей даного виробника мають нижчі межі струму насичення, і навпаки. Коли вибрано більшу індуктивність, підвищувальний перетворювач DRV8662 автоматично працюватиме на нижчій частоті перемикання та матиме менші втрати на перемикання; однак, більші значення індуктивності можуть мати вищий еквівалентний послідовний опір (ESR), що збільшить паразитні втрати індуктивності. Оскільки нижчі значення індуктивності зазвичай мають вищі струми насичення, вони є кращим вибором, коли намагаються максимізувати вихідний струм підвищувального перетворювача.

Вибір п'єзоелектричного актуатора.

Існує кілька ключових характеристик, що впливають на вибір п'єзоелектричного актуатора, таких як розміри, сила блокування та зміщення. Однак, ключовими електричними характеристиками з точки зору драйвера є номінальна напруга та ємність. При максимальній частоті 500 Гц DRV8662 оптимізований для керування до 50 нФ при 200 В напрузі розмаху, що є найвищою здатністю до коливань напруги. Він буде керувати більшими ємностями, якщо запрограмовану напругу підвищення знизити та/або користувач обмежить діапазон вхідної частоти нижчими частотами (наприклад, 300 Гц).

Вихідну підвищену напругу можна запрограмувати до 105 В. Оскільки керамічні конденсатори зазвичай мають номінальну напругу 100 В або 250 В, для 105 В рекомендується конденсатор типу X5R або X7R ємністю 100 нФ з номіналом 250 В. Вибраний конденсатор повинен мати мінімальну робочу ємність щонайменше 50 нФ.

Розрахунок споживання струму

Корисно розуміти, як напруга, що подається на п'єзоелектричний актуатор, пов'язана зі споживанням струму від джерела живлення. Моделювання п'єзоелемента як чистого конденсатора є досить точним.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		52

Рівняння для струму через конденсатор для застосованої синусоїди задається рівнянням 2.3:

$$I_{Capacitor(Peak)} = 2\pi \times f \times C \times V_P \quad (2.3)$$

де f – частота синусоїди в Гц, C – ємність п'єзоелектричного навантаження у фарадах, а V_P – пікова напруга. У джерелі живлення (зазвичай від батареї) струм виконавчого механізму множиться на коефіцієнт підвищення та ділиться на коефіцієнт корисної дії підвищувального перетворювача, як показано в рівнянні 2.4.

$$I_{BAT(Peak)} = 2\pi \times f \times C \times V_P \times \frac{V_{Boost}}{V_{BAT} \times \eta_{Boost}} \quad (2.4)$$

Підставляючи типові значення для змінних цього рівняння, отримуємо типовий піковий струм, який видається акумулятором із синусоїдальним входом, як у рівнянні 2.5.

$$I_{BAT(Peak)} = 2\pi \times 300 \text{ Hz} \times 50 \text{ nF} \times 100 \times \frac{105}{3.6 \times 0.7} = 392 \text{ mA} \quad (2.5)$$

Залежно від якості вихідного сигналу, що подається на DRV8662, може знадобитися вхідний фільтр. Деякі ключові фактори, це те, чи генерується джерело з ЦАП чи з ШІМ, а також згенерований позасмуговий склад. Якщо використовується ШІМ, потрібен принаймні RC-фільтр 1-го порядку. Частота дискретизації ШІМ повинна бути більше 30 кГц, щоб запобігти потраплянню пульсацій ШІМ на п'єзоелемент та розсіюванню непотрібної потужності. RC-фільтр 2-го порядку може бути бажаним для подальшого усунення позасмугового складу сигналу, щоб ще більше зменшити розсіювання потужності та усунути шум.

Схема системи DRV8662 з фільтрованим одностороннім ШІМ-входом

DRV8662 можна використовувати з вхідним ШІМ-сигналом для систем, які не мають доступного ЦАП або аналогового виходу. Більшість систем п'єзоприводів потребують вхідного ШІМ-фільтра для видалення будь-якого небажаного шуму.

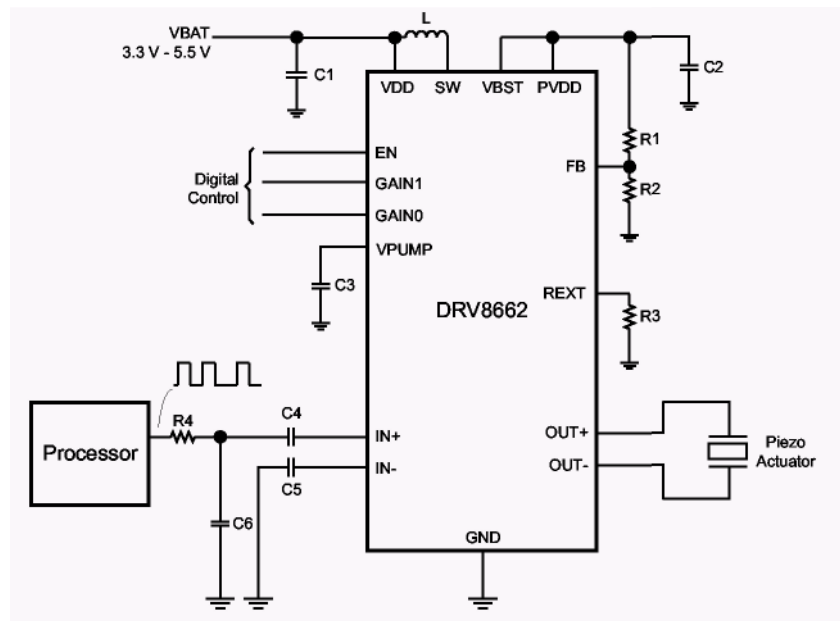


Рисунок 2.12 – Схема системи DRV8662 з фільтрованим одностороннім ШІМ-входом

Проектування вхідного фільтра.

Під час використання ШІМ-входу потрібен низькочастотний фільтр. Основними параметрами для визначення вхідного фільтра є вхідна частота ШІМ та частота дискретизації. Оскільки хвилі зазвичай мають частоту менше 500 Гц, вхідний фільтр повинен послаблювати частоти вище 500 Гц. Для частот дискретизації вище 20 кГц рекомендується використовувати простий RC-фільтр першого порядку; однак для значно нижчих частот дискретизації (наприклад, 8 кГц) фільтр першого порядку може бути недостатньо послаблюючим високочастотний склад. Таким чином, для нижчих частот дискретизації може знадобитися RC-фільтр другого порядку. У конфігурації

DRV8662EVM за замовчуванням використовується диференціальний фільтр другого порядку, але його можна замінити на односторонній або диференціальний фільтр першого порядку.

Критерії для вибору вхідного фільтра:

RC-фільтри першого порядку, як односторонні, так і диференціальні, рекомендуються для частоти дискретизації даних 20 кГц і вище. Фільтри першого порядку мають достатній час встановлення та найменшу кількість компонентів.

Фільтри другого порядку рекомендуються для безшумної роботи при використанні нижчої частоти дискретизації даних.

Рекомендований діапазон напруги живлення для DRV8662 становить від 3,3 В до 5,5 В. Для належної роботи розмістіть конденсатор байпасу живлення типу X5R або X7R з низьким еквівалентним послідовним опором (ESR) ємністю 0,1 мкФ поблизу виводу VDD з напругою щонайменше 10 В.

Для внутрішнього насоса заряду між виводом VPUMP та GND потрібно розмістити конденсатор типу X5R або X7R ємністю 0,1 мкФ з напругою 10 В або більше. Не використовуйте зарядний насос як джерело напруги для будь-яких інших пристроїв.

2.3.3 Вибір конкретного типу драйвера

Відповідно до проведеного аналізу в основі роботи проєктованої системи керування запропоновано використати драйвер DRV8662EVM, який має достатній функціонал для ефективного використання в біонічних протезах. Використовуючи метод ШІМ, на основі параметрів ЕМГ сигналів мають формуватись пачки імпульсів, ширина яких визначатиме швидкість виконуваних протезом рухів. Також важливою є можливість встановлення різних значень вихідних напруг драйвера, завдяки чому можливим буде регулювання сили виконання захватів, оскільки продукowane таким двигуном зусилля буде залежати від величини прикладеної до нього напруги. Таким

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		55

чином можна регулювати чи змінювати в досить простий спосіб і швидкість і силу виконання захватів. В існуючих протезах такі функції є або відсутніми або обмеженими.

2.4 Система керування п'єзоелектричних двигунів

Сьогодні поширення набули мікропроцесорні системи управління (МПС) зокрема і п'єзоелектричними виконавчими пристроями. У них здійснюється програмно-апаратне управління за допомогою програмованих мікроконтролерів, що робить можливим організацію гнучкого управління п'єзодвигуном і дозволяє реалізувати складні закони управління шляхом відповідного програмування МПС з компенсацією зовнішніх збурювальних впливів і нелінійностей, властивих пристроям даного типу. Велика номенклатура мікроконтролерів, від найпростіших РІС - контролерів до порівняно складних однокристальних мікро-ЕОМ, дозволяє реалізовувати цифрове управління як одноконтурних приводів, так і складніших багатоконтурних і багатопривідних систем і комплексів. Через специфіку управління п'єзоелектричними пристроями не завжди вдається обійтися без аналогових пристроїв, а застосування цифрових засобів у поєднанні з аналоговими пристроями старого покоління посилює їх недоліки через складність узгодження підсилювальних пристроїв п'єзоприводу з мікропроцесорними пристроями. Для широкого впровадження цифрового п'єзоприводу в технічних системах необхідним є підвищення енергетичної ефективності високовольтних електронних пристроїв управління, забезпечення їх стійкості та спрощення зв'язку з мікропроцесорними пристроями. Усі поставлені завдання вирішуються застосуванням сучасних лінійних підсилювачів та пристроїв управління з вихідними каскадами на високовольтних транзисторах, які працюють у ключовому режимі, тобто використанням імпульсних пристроїв та спеціалізованих драйверів для

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		56

п'єзоелектричних виконавчих пристроїв. Всі перелічені пристрої прості, економічні, надійні, стійкі до самозбудження, мають кращі масогабаритні показники в порівнянні з лінійними підсилювачами старих моделей, забезпечують найбільш оптимальні режими роботи та зручності узгодження з мікропроцесорними пристроями.

На малюнку 3 показана узагальнена функціональна схема цифрового п'єзоелектричного приводу, що є одноконтурною системою регулювання по положенню. У ній можна виділити дві частини: цифрову та аналогову. У цифрову входять мікроконтролер (МК), пристрої зв'язку з мікроконтролером: АЦП та ЦАП та обчислювальна машина верхнього рівня (ЕОМ ВР). Аналогова частина включає в себе силовий перетворювач (СП), п'єзодвигун (ПД) і датчик положення (ДП).

ЕОМ ВР - служить для формування сигналу керування і програмування МК. Зв'язок між ЕОМ ВР та МК організується за стандартною лінією зв'язку (USB, RS-232, RS-485 та ін.).

МК - формує сигнал управління за заданим алгоритмом, приймає та обробляє інформацію від ДП та ЕОМ ВР. У сучасних прецизійних електромеханічних системах використовують одноплатні та однокристальні мікроконтролери, зокрема, контролери сімейства МК-51, ADuC831 і 841 фірми Analog devices і мікроЕОМ і8XC196MC, що мають розвинену периферію. ADuC831 і ADuC841 призначені для використання в тих додатках, де потрібні великі обсяги пам'яті та підвищені швидкості роботи ядра. Чіпи ADuC831 і ADuC841 відрізняє те, що ядро першого має максимальну тактову частоту 16 МГц, в той час як ADuC841-ядро здатне працювати на частоті до 16 МГц при напрузі 3 В і на частоті до 25 МГц при напрузі 5 В. Крім того, вони мають вбудовані 12-розрядні ЦАП та АЦП. АЦП і ЦАП - здійснюють аналого-цифрове перетворення і дискретизацію за часом з періодом Т, вони можуть представляти самостійні пристрої або бути вбудованими, як у випадку з ADuC831 і ADuC841, що значно підвищує завадостійкість і надійність

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		57

роботи всього пристрою. Вибір періоду квантування залежить від вимог до динамічних властивостей приводу в цілому та швидкодії цифрової частини зокрема. Зазвичай в електромеханічних системах період T становить від десятих часток до одиниць мілісекунд (0,1-5 мс), що висуває досить високі вимоги до продуктивності МК.

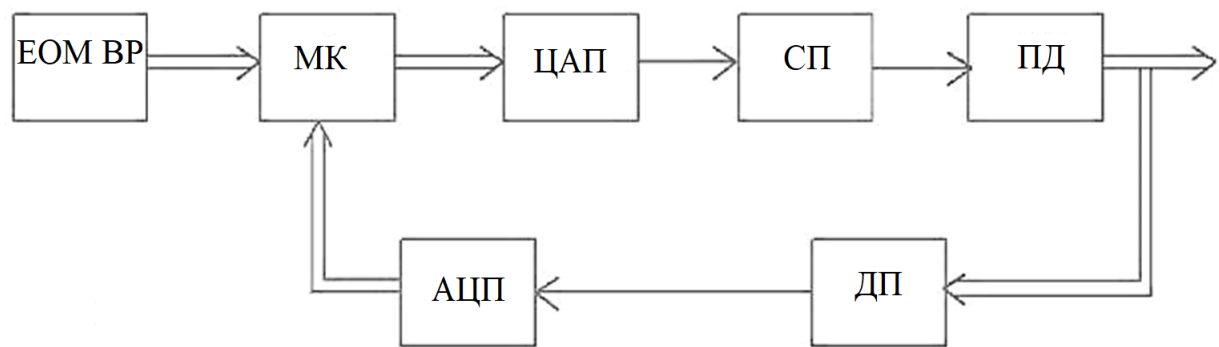


Рисунок 2.13 – Функціональна схема цифрового п'єзоелектричного приводу

СП - перетворює сигнал управління за формою та величиною, до необхідних для п'єзодвигуна. Як СП можуть бути використані лінійні підсилювачі, спеціалізовані драйвери, каскади високовольтних транзисторів, що працюють у ключовому режимі.

ДП - формує сигнал зворотного зв'язку за положенням. У сучасних системах для цих цілей використовуються ємнісні, індуктивні та оптоелектронні перетворювачі.

ПД - як виконавчий пристрій переміщає певний об'єкт на задану величину.

В роботі розроблено структуру системи керування електроприводом біонічного протеза, яка має вигляд структурної схеми, що наведена на рис. 2.14.

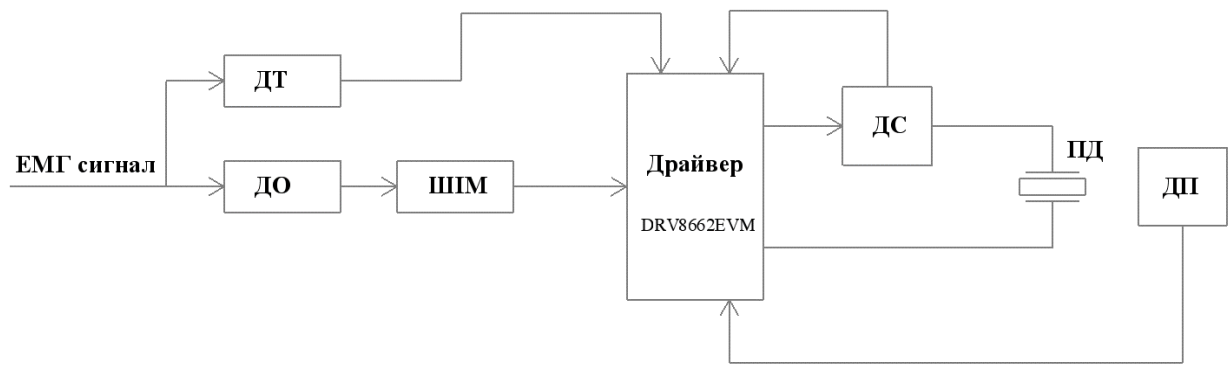


Рисунок 2.14 – Структура проєктованої системи керування

Відповідно до рис. 1.1, система працює від сигналів ЕМГ. Керування біонічним протезом має бути простим та працювати в масштабі реального часу. Для цього використано спосіб прямого керування. Якщо прийняти за основу концепцію використання ЕМГ сигналів та формування із них патернів керування, то на рис. 1.1 блоками ДТ та ДО власне реалізується процес обробки ЕМГ сигналів і виділення тривалостей патернів та їх огибаючих. Відповідно ДТ – це детектор тривалості патерна ЕМГ сигналу, а ДО – детектор огибаючої. Як центральний елемент системи використано драйвер DRV8662EVM. ПД – це власне п’єзодвигун. Оскільки цей драйвер може працювати від сигналу ШІМ і таким чином можна регулювати швидкість переміщення елементів протеза п’єзодвигуном при виконанні рухів, то блок ШІМ власне із сигналу огибаючої ЕМГ формує складний ШІМ, який і керує п’єзодвигуном.

Враховуючи те, що використаний драйвер має можливість дискретної зміни напруги живлення п’єзодвигуна, цю особливість використано для керування силою виконуваного захвату протезом. Так, паралельно із формуванням ШІМ, сигнал із детектора тривалості патернів надходитиме на драйвер та задаватиме значення вихідної напруги живлення п’єзодвигуна. Оскільки більша сила захвату потрібна при тривалих рухах (наприклад утримування певних об’єктів протезом), то відповідно на основі визначення

тривалості патернів ЕМГ можна регулювати силу захвату міняючи вихідну напругу драйвера.

Блок ДС – це датчик струму, а блок ДП – це датчик положення. На основі сигналів з цих датчиків можливим стає контроль режимів роботи п'єзодвигуна та позиціонування його в просторі.

Пропонована система буде ефективною при керуванні електроприводом біонічного протеза, а враховуючи використану структуру прямого керування та розміри драйверів, технічна реалізація її буде малогабаритною та енергоефективною і її можна буде вільно розмістити всередині біонічного протеза.

2.5 Висновки до розділу 2

Проаналізовано способи реалізації систем керування п'єзодвигунами та проаналізовано два типи драйверів: NSD-2101 та DRV8662.

В основі роботи проєктованої системи керування запропоновано використати драйвер DRV8662EVM, який має достатній функціонал для ефективного використання в біонічних протезах. Використовуючи метод ШІМ, на основі параметрів ЕМГ сигналів мають формуватись пакки імпульсів, ширина яких визначатиме швидкість виконуваних протезом рухів. Також важливою є можливість встановлення різних значень вихідних напруг драйвера, завдяки чому можливим буде регулювання сили виконання захватів, оскільки продуковане таким двигуном зусилля буде залежати від величини прикладеної до нього напруги. Таким чином можна регулювати чи змінювати в досить простий спосіб і швидкість і силу виконання захватів. В існуючих протезах такі функції є або відсутніми або обмеженими.

Розроблено структуру системи керування електроприводом біонічного протеза, яка працює від сигналів ЕМГ. Керування біонічним протезом має

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		60

бути простим та працювати в масштабі реального часу. Для цього використано спосіб прямого керування.

Враховуючи те, що використаний драйвер має можливість дискретної зміни напруги живлення п'єзодвигуна, цю особливість використано для керування силою виконуваного захвату протезом. Так, паралельно із формуванням ШІМ, сигнал із детектора тривалості патернів надходитиме на драйвер та задаватиме значення вихідної напруги живлення п'єзодвигуна. Оскільки більша сила захвату потрібна при тривалих рухах (наприклад утримування певних об'єктів протезом), то відповідно на основі визначення тривалості патернів ЕМГ можна регулювати силу захвату міняючи вихідну напругу драйвера.

Пропонована система буде ефективною при керуванні електроприводом біонічного протеза, а враховуючи використану структуру прямого керування та розміри драйверів, технічна реалізація її буде малогабаритною та енергоефективною і її можна буде вільно розмістити всередині біонічного протеза.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		61

РОЗДІЛ 3

ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ВИКОНАННІ РОБОТИ

3.1 Середовище SolidWorks

Програмний продукт SolidWorks є найпоширенішим інструментом для автоматизованого проектування і 3D моделювання. Пакет дозволяє створити деталі для майбутнього 3D друку.

SolidWorks у процесі роботи використовує звичний для багатьох користувачів інтерфейс Windows.

Найпоширеніші особливості SolidWorks:

1. Спеціальна бібліотека з різноманітними стандартними компонентами та виробами, що містить деталі з різним призначенням та параметрами. В ній можна швидко знайти будь-який об'єкт або скористатися стандартним компонентом як деталю для модифікації.

2. Прив'язки. Це найцікавіша і найактуальніша особливість програми, що дозволяє виконувати прив'язки прямо в моделі. При цьому робочі елементи предмета, що проектується, зв'язуються між собою для запобігання спотворенню побудованого об'єкта при внесенні необхідних змін до самої моделі.

3. Робота з різними рівняннями. У програмі є можливість зв'язування всієї моделі за допомогою рівнянь, винесених до окремого створеного документа текстового формату. При цьому при зміні одного елемента в об'єкті відбудеться синхронна зміна усієї моделі.

4. Автоматична побудова креслення безпосередньо з моделі. Така особливість практично незамінна для проектування різноманітних технічних

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		62

виробів. Отримати креслення з моделі можна лише за кілька кліків комп'ютерною мишею.

5. Наявність можливості зшивання поверхонь. Це дозволяє отримати твердотільну модель, яка стане придатною для відтворення на 3D принтері.

Компанія SolidWorks Corp. з'явилася в 1993 році, а першу створену версію програмного забезпечення SolidWorks вона представила в 1995 році. З цього часу програма опинилася під пильною увагою багатьох відомих аналітиків, що спеціалізуються у сфері САПР.

Для реалізації функціоналу було обрано та використано Microsoft Windows, тоді як раніше такі здійснювані розробки підлягали реалізації виключно на операційній системі Unix, на якій працювали протягом кількох десятиліть.

У далекому 1997 корпорація SolidWorks Corp. вступила до складу найбільшого ІТ холдингу Dassault Systemes, причому таке стратегічне рішення визнано компетентними джерелами найвдалішим. Тому сьогодні програма SolidWorks вважається популярним та широко застосовуваним пакетом 3D моделювання.

Можливості програми SolidWorks

Базові функції цієї програми доступні користувачам без застосування спеціальних розширень, але створені додаткові модулі збільшують її функції.

Деякі можливості цієї програми:

- 3D-моделювання різних твердих тіл;
- розробка необхідних зварних конструкцій;
- проведення розрахунків на міцність та точний прорахунок гідро- та аеродинаміки;
- створення різноманітних креслень;
- виконання проектування з врахуванням матеріалу, що використовується для створення виробу;
- візуалізація та проведення прорахунку на можливий вигин;

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		63

- використання даних після виконаного 3D-сканування;
- проектування різноманітної продукції, для виготовлення якої використовується листовий метал;
- читання електросхем;
- експорт отриманих даних та їх переведення у різні формати.

Основою проектування кожного складного промислового виробу є 3D моделювання. У SolidWorks доступні такі функції:

1. Твердотельне моделювання з розробкою виробів, які мають властивості реальних фізичних об'єктів. Це практично ідеальний варіант, що дозволяє візуально уявити виріб.
2. Поверхневе моделювання, що реалізується у цій програмі через проведення дій із кривими чи сплайнами. В результаті виходять гладкі вироби з нормальними плавними згинами.
3. Каркасне моделювання, що дозволяє уявити форму об'єкта.

Процес 3D моделювання виконується за допомогою ескізів. На наявній основній базовій площині створюється найпростіша форма за допомогою різних операцій, якими стають обертання, видавлювання, проведення вирізу по перерізу або траєкторії. Також об'єкт можна заокруглити, дзеркально відобразити, створити необхідні тонкостінні елементи, відповідне різьблення та виконати інші операції.

Також програма дозволяє вирішувати такі завдання:

1. Конструкторська підготовка виробництва для виконання важливих завдань.
 - 3D проектування різноманітних виробів, промислових деталей та складання незалежно від складності;
 - створення різноманітної конструкторської документації, що використовується на сучасному виробництві;
 - промисловий дизайн та найважливіший реверсивний інжиніринг;

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		64

- проектування різноманітних комунікацій, наприклад, ліній трубопроводів;

- виконання інженерного аналізу та інші функції.

2. Технологічна підготовка виробництва.

- проектування різноманітних засобів найважливішого технологічного оснащення;

- матеріальне і трудове нормування;

- процес механообробки з виробництва;

- проведення аналізу конструкційної частини виробу та інші функції.

3. Процес управління інформаційними даними.

- виконання роботи з єдиною цифровою моделлю спроектованого виробу;

- різноманітні технології здійснення спеціальної колективної розробки;

- проектне управління;

Робочі функції розташовуються на панелі інструментів у верхній частині, тому користувачем здійснюється зручне управління 3D моделлю. Також цей інструмент дозволяє створити тривимірні види ескізів, причому робота віддалено нагадує процес 3D моделювання в решті графічних редакторів. І тут забезпечується розширений підхід до процесу розробки різноманітних моделей.

3.2 Моделювання п'єзодвигуна в структурі біонічного протеза

В роботі проведено моделювання власне корпуса п'єзодвигуна а також встановлення його в частині ендоскелета протеза, що являє собою збірку одного пальця.

На рис. 3.1 наведено власне вигляд штока п'єзодвигуна, на рис. 3.2 – корпус двигуна, а на рис. 3.3 – встановлений двигун в конструкції елемента протеза.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		65



Рисунок 3.1 – Вигляд штока п'єзодвигуна

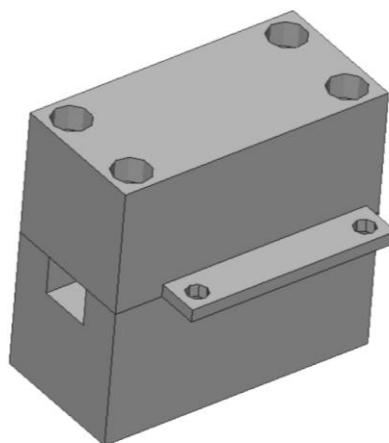


Рисунок 3.2 – Корпус двигуна

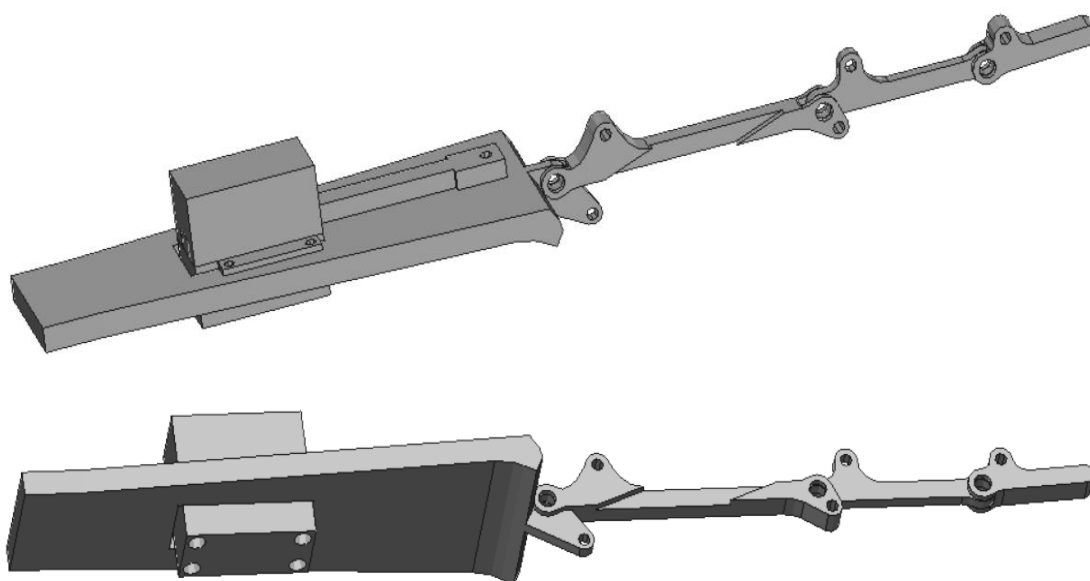


Рисунок 3.3 – Встановлений двигун в конструкції елемента протеза

Відповідно з останнього рисунка видно, що сам п'єзодвигун є досить габаритним. Але тут треба враховувати той факт, що всередині корпусу ще встановлений власний драйвер. Тому, якщо реалізувати проектовану в цій роботі систему керування в протезі можна буде використовувати двигуни без

власних драйверів і відповідно ці двигуни займатимуть набагато менше місця.
Тому задача проєктування окремої системи керування є актуальною

3.3 Висновки до розділу 3

Проаналізовано можливості програми Solid Works та застосовано її для проєктування елементів окремого п'єзодвигуна і встановлення його в ендоскелеті протеза.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
						67
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

4.1 Планування заходів з охорони праці. Види планування та контролю стану охорони праці. Виявлення, оцінка та зменшення ризиків небезпечних подій

Метою планування заходів з охорони праці є визначення необхідних вкладень у заходи з охорони праці для ефективного впливу на стан охорони праці.

Система планів з охорони праці окремого підприємства може включати:

- перспективне планування (на період, більший одного року) ;
- поточне планування (на рік) ;
- оперативне планування (детальні плани, спрямовані на вирішення конкретних питань працезахоронної діяльності на підприємстві в короткостроковому, до одного року, періоді).

Планування в охороні праці може включати:

- визначення цілей діяльності з охорони праці на підприємстві та засобів їх досягнення;
- вибір методів і базових показників, за допомогою яких може здійснюватися оцінка необхідних вкладень в охорону праці;
- розрахунок суми вкладень у заходи з охорони праці та раціональний розподіл цієї суми за напрямками діяльності;
- забезпечення організації контролю виконання плану (при необхідності здійснення коригування запланованих показників) ;
- здійснення постійного контролю умов і безпеки праці на підприємстві та оперативне реагування на відхилення від нормативних вимог.

Перспективне планування вміщує найбільш важливі, трудомісткі і довгострокові за терміном виконання заходи з охорони праці, виконання яких,

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
						68
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		

як правило, вимагає сумісної роботи кількох підрозділів підприємства. Можливість виконання заходів перспективного плану повинна бути підтверджена обґрунтованим розрахунком необхідного матеріально-технічного забезпечення і фінансових витрат з зазначенням джерел фінансування.

До перспективних планів належить комплексний план покращення умов праці і санітарно-оздоровчих заходів, що передбачає створення, відповідно до нормативних актів з охорони праці, умов праці, пов'язаних з перспективними змінами підприємства. Таке планування, як правило, розраховане на термін від 2 до 5 років. Реалізація цих планів забезпечується через річні плани номенклатурних заходів з охорони праці, які вносяться до угоди, що є невід'ємною частиною колективного договору.

Поточне планування здійснюється у межах календарного року через розроблення відповідних заходів у розділі «Охорона праці» колективного договору.

Поточні плани передбачають реалізацію заходів із покращення умов праці, створення кращих побутових і соціальних умов на виробництві. Ці плани обов'язково забезпечуються фінансуванням згідно з розробленими кошторисами.

Питання охорони праці можуть віддзеркалюватися в інших поточних планах, які підприємства та організації можуть складати на вимогу трудових колективів:

- план соціального розвитку колективу;
- наукової організації праці;
- механізації важких і ручних робіт;
- охорони праці жінок;
- підготовки підприємства до робіт в осінньо-зимовий період;
- підвищення культури виробництва та ін.

Оперативне планування роботи з охорони праці здійснюється за підсумками контролю стану охорони праці в структурних підрозділах і на підприємстві в цілому.

Оперативні плани складаються для швидкого виправлення виявлених в процесі державного, відомчого і громадського контролю недоліків в стані охорони праці, а також для ліквідації наслідків аварій або стихійного лиха.

Оперативні заходи щодо усунення виявлених недоліків зазначаються безпосередньо у наказі власника підприємства, який видається за підсумками контролю, або у плані заходів, як додатку до наказу.

Організаційно-методичну роботу щодо складання перспективних, поточних та оперативних планів здійснює служба (спеціаліст) охорони праці.

2.2 Здійснення заходів щодо зниження дії радіоактивних випромінювань

Оцінка уразливості лабораторного блока живлення від радіоактивного забруднення і проникаючої радіації починається з визначення максимальних очікуваних значень рівня радіації і дози проникаючої радіації. За показник стійкості об'єкта приймається допустима доза радіації, яку можуть одержати люди за час робочої зміни.

Для характеристики радіоактивного забруднення застосовують ступінь (щільність) забруднення, який характеризується поверхневою щільністю забруднення радіонуклідами і вимірюється активністю радіонукліда на одиницю площі (об'єму). Основною дозиметричною величиною, за допомогою якої оцінюється дія радіації, є доза випромінювання - кількість енергії, яка поглинута одиницею маси опроміненого середовища. Експозиційна доза визначається тільки для повітря при гама і рентгенівському випромінюванні. Поглинута доза визначається для речовин. Місцевість, що забруднюється внаслідок радіаційної аварії, за щільністю забруднення радіонуклідами умовно поділяють на зони: зону відчуження, зону

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		70

безумовного (обов'язкового) відселення, зону гарантованого (добровільного) відселення і зону підвищеного радіоекологічного контролю.

За дозами опромінення зону забруднення поділяють на наступні зони: надзвичайно-небезпечного забруднення, небезпечного забруднення, сильного забруднення, помірного забруднення, і зону радіаційної небезпеки.

Також радіоактивне забруднення буде безпосередньо впливати лабораторного блока живлення, але і на його конструкцію, оскільки, до його складу входять метічні провідники з ізоляційним покриттям, металічний корпус, пласмасові роз'єми і самі радіоелементи (резистори, транзистори, мікросхема, конденсатори, діод).

Органічні речовини вельми чутливі до радіації. Вплив радіації призводить до перетворення молекул, що супроводжується хімічними реакціями, що викликають незворотні зміни природи речовини і її механічних властивостей.

Перетворення супроводжується виділенням газів, які в поєднанні з вологою утворюють кислоти, які здійснюють шкідливий вплив на ізоляційні матеріали. Більшість пластмас отримує механічне пошкодження навіть при малих дозах радіації.

Фенолформальдегід і метилметакрилат стають крихкими і деформуються. Поліетилен і полістирол - спочатку збільшується опір розриву і твердість, а потім вони стають крихкими. Більшість пластмас темніє і знебарвлюється. Просочення і ізоляційні масла псуються, як і оргматеріали. Синтетичний каучук і кремнійорганічна гума твердіють

Зміна електричних властивостей органічних речовин (провідність, діелектрична проникність, кут втрат) має оборотний характер. Час відновлення залежить від природи матеріалу та умов опромінення.

На неорганічні речовини (матеріали) радіація впливає менше, ніж на органічні. При опроміненні нейтронами можливо об'ємне розширення. Кварц і скло втрачають прозорість при великих дозах.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		71

Вплив радіації на напівпровідниковий діод залежить від того, який ефект використаний в основі його роботи, виду матеріалу, питомого опору його, а також конструктивних особливостей діода. Оскільки в підсилювачі використані лише кремнієві діоди то розглянемо лише їхню реакцію.

Під впливом нейтронної радіації провідність точково-контактних діодів зменшується в прямому і зворотному напрямках; у площинних діодів провідність у прямому напрямку також зменшується. Пошкодження діодів обумовлюється зміною характеристик провідності в прямому напрямку. Вплив γ -опромінення викликає оборотні зміни зворотного струму.

Характеристика впливу радіоактивного забруднення на транзистор. Вплив опромінення викликає порушення кристалічної решітки матеріалу (основний ефект) і іонізацію (вторинний ефект). Внаслідок цього змінюються параметри напівпровідникових матеріалів – час життя основних носіїв, питома провідність, швидкість поверхневої рекомбінації дірок з електронами. Внаслідок зміни вищевказаних параметрів зменшується коефіцієнт підсилення по струму, збільшується зворотний струм колектора, зростають шуми транзистора.

Іонізація, створювана радіацією, інжектується надлишок носіїв у транзистор, внаслідок чого виникають значні шуми. Зміна коефіцієнта посилення є незворотнім, а зміни зворотного струму можуть бути оборотними і необоротними. Як бачимо змінюється основний із електричних параметрів підсилювача – коефіцієнт підсилення, а отже вихідна потужність.

Потрібно зазначити, що більшу радіаційну стійкість мають германієві транзистори в порівнянні з кремнієвими.

До основних методів захисту радіоелектронної апаратури відносять такі конструктивні рішення:

- правильно підбирати і розташовувати елементи;
- ширше використовувати керамічні ізолятори в частинах перемикачів, роз'ємах, гніздах і т.д.;

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		72

- застосовувати склотканина та інші неорганічні матеріали для манжет, кабельної ізоляції тощо;
- застосування елементів з неорганічних матеріалів, слюдяних і керамічних конденсаторів;
- застосовувати плівкові і металлопленочні опору;
- ретельно продумувати схему розташування, для зменшення струмів витоку і пробоя;
- екранувати найбільш чутливі елементи;
- правильно вибирати матеріали деталей конструкції;
- правильно вибирати напівпровідникові прилади (надавати перевагу германієвим).
- Для захисту від γ - променів добре екранують, захищають - свинець, вісмут, вольфрам, золото, платина, ртуть і деякі інші важкі матеріали.

2.3 Висновки до розділу 2

В розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» розглянуто планування заходів з охорони праці. Види планування та контролю стану охорони праці. Виявлення, оцінка та зменшення ризиків небезпечних подій. Також описано заходи щодо зниження дії радіоактивних випромінювань

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		73

ВИСНОВКИ

Проаналізовано основні типи приводів, які використовуються в біомехатронних пристроях та можуть бути застосовані в біонічних протезах. Зокрема розглянуто електромагнітні приводи, такі як соленоїди, електродвигуни постійного струму, крокові двигуни, безщіткові двигуни. Також розглянуто основні типи трансмісій для біомехатронних систем та можливості їх використання в біонічних протезах.

Одним із таких перспективних електроприводів є використання п'єзодвигунів.

Встановлено, що електропривід на базі п'єзодвигунів є малогабаритним, легким, пратично безінерційним та енергоекономним. Також такі двигуни є безшумними і не потребують використання додаткових трансісій. Ще однією перевагою п'єзодвигунів є те, що їхні конструкції створюють в основному лінійні переміщення, які є основними для приведення в рух біонічних протезів. Якщо у випадку ротаційних електродвигунів необхідним є використання перетворювачів кутового переміщення в лінійне, то п'єзоелектричні двигуни цього не потребують. Це значно спрощує конструкцію протеза та підвищує його надійність. Однак, враховуючи ємнісний а не індуктивний (як для класичних електродвигунів) тип навантаження, необхідним є використання складних систем керування таким електроприводом.

Проаналізовано способи реалізації систем керування п'єзодвигунами та проаналізовано два типи драйверів: NSD-2101 та DRV8662.

В основі роботи проєктованої системи керування запропоновано використати драйвер DRV8662EVM, який має достатній функціонал для ефективного використання в біонічних протезах.

Розроблено структуру системи керування електроприводом біонічного протеза, яка працює від сигналів ЕМГ. Керування біонічним протезом має

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		74

бути простим та працювати в масштабі реального часу. Для цього використано спосіб прямого керування.

Враховуючи те, що використаний драйвер має можливість дискретної зміни напруги живлення п'єзодвигуна, цю особливість використано для керування силою виконуваного захвату протезом. Так, паралельно із формуванням ШІМ, сигнал із детектора тривалості патернів надходитиме на драйвер та задаватиме значення вихідної напруги живлення п'єзодвигуна. Оскільки більша сила захвату потрібна при тривалих рухах (наприклад утримування певних об'єктів протезом), то відповідно на основі визначення тривалості патернів ЕМГ можна регулювати силу захвату міняючи вихідну напругу драйвера.

Пропонована система буде ефективною при керуванні електроприводом біонічного протеза, а враховуючи використану структуру прямого керування та розміри драйверів, технічна реалізація її буде малогабаритною та енергоефективною і її можна буде вільно розмістити всередині біонічного протеза.

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		75

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ziegler-Graham, K.; MacKenzie, E.J.; Ephraim, P.L.; Travison, T.G.; Brookmeyer, R. Estimating the Prevalence of Limb Loss in the United States: 2005 to 2050. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2008, 89, 422–429.
2. Collinger, J.L.; Wodlinger, B.; Downey, J.E.; Wang, W.; Tyler-Kabara, E.C.; Weber, D.J.; McMorland, A.J.C.; Velliste, M.; Boninger, M.L.; Schwartz, A.B. High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. Lancet 2013, 381, 557–564
3. Smith, L.H.; Kuiken, T.A.; Hargrove, L.J. Real-time simultaneous and proportional myoelectric control using intramuscular EMG. J. Neural. Eng. 2014, 11, 66013.
4. Waldert, S. Invasive vs. Non-Invasive Neuronal Signals for Brain-Machine Interfaces: Will One Prevail? Front. Neurosci. 2016, 10, 295.
5. Gomez-Gil, J.; San-Jose-Gonzalez, I.; Nicolas-Alonso, L.F.; Alonso-Garcia, S. Steering a tractor by means of an EMG-based human-machine interface. Sensors 2011, 11, 7110–7126
6. Allison, B.Z.; Brunner, C.; Kaiser, V.; Müller-Putz, G.R.; Neuper, C.; Pfurtscheller, G. Toward a hybrid brain–computer interface based on imagined movement and visual attention. J. Neural Eng. 2010, 7, 26007.
7. Milosevic, B.; Benatti, S.; Farella, E. Design challenges for wearable EMG applications. In Proceedings of the Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Lausanne, Switzerland, 27–31 March 2017; pp. 1432–1437.
8. Tucker, M.R.; Olivier, J.; Pagel, A.; Bleuler, H.; Bouri, M.; Lambercy, O.; del R Millón, J.; Riener, R.; Vallery, H.; Gassert, R. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: A review. J. Neuroeng. Rehabil. 2015, 12, 1.

9. Mesa, I.; Rubio, A.; Tubia, I.; De No, J.; Diaz, J. Channel and feature selection for a surface electromyographic pattern recognition task. *Expert Syst. Appl.* 2014, 41, 5190–5200.
10. McCool, P.; Petropoulakis, L.; Soraghan, J.J.; Chatlani, N. Improved pattern recognition classification accuracy for surface myoelectric signals using spectral enhancement. *Biomed. Signal Process. Control* 2015, 18, 61–68.
11. Phinyomark, A.; Quaine, F.; Charbonnier, S.; Serviere, C.; Tarpin-Bernard, F.; Laurillau, Y. Feature extraction of the first difference of EMG time series for EMG pattern recognition. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2014, 117, 247–256.
12. Lloyd, D.G.; Besier, T.F. An EMG-driven musculoskeletal model to estimate muscle forces and knee joint moments in vivo. *J. Biomech.* 2003, 36, 765–776.
13. Hayashi, T.; Kawamoto, H.; Sankai, Y. Control method of robot suit HAL working as operator's muscle using biological and dynamical information. In *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, AB, Canada, 2–6 August 2005; pp. 3063–3068.
14. ADORA-MED d.o.o. For Surgeons - ADORA Assistant. Website: https://adora-med.com/#section_video.
15. Paolo Visconti, Federico Gaetani, Giovanni Antonio Zappatore, Patrizio Primiceri, 2018. Technical Features and Functionalities of Myo Armband: An Overview on Related Literature and Advanced Applications of Myoelectric Armbands Mainly Focused on Arm Prostheses. *INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS*. Pp. 1-25, DOI: 10.21307/ijssis-2018-005.
16. Oksana Dozorska, Evhenia Yavorska, Vasil Dozorskyi, Vyacheslav Nykytyuk, Leonid Dediv (2020). The Method of Selection and Pre-processing of Electromyographic Signals for Bio-controlled Prosthetic of Hand. *Proc. of the 2020*

IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 23-26 September 2020, (pp.188–192). Lviv-Zbarazh, Ukraine

17. Дозорська, О. Ф., Яворська, Є. Б., Дозорський, В. Г., Дедів, Л. Є. і Деді, І. Ю. «The Method of the Main Tone Detection in the Structure of Electromyographic Signals for the Task of Broken Human Communicative Function Compensation», VISNYK NTUU KPI SERIIA-RADIOTEKHNIKA RADIOAPARATOBUDUVANNIA, (81), 2020р. с. 56-64.

18. Electrical probe-signal processing and criterion for the determination of time parameters of the teeth filling material polymerization process in dentistry Nykytyuk, V., Dozorsky, V., Kunanets, N., Pasichnyk V., Matsiuk, O., Bodnarchuk, I. 4th International Conference on Informatics and Data-Driven Medicine, IDDM 2021. Valencia 19 November 2021 до 21 November 2021 . CEUR Workshop Proceedings. Том 3038, С. 54 — 63.

19. The Method of User Identification by Speech Signal. V. Nykytyuk, V. Dozorskyi, O. Dozorska, A. Karnaukhov, L. Matiichuk. CEUR Workshop Proceedings. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022 Ternopil 22- 24 November 2022. Том 3309, с. 225-232.

20. Математичне моделювання, методи та програмне забезпечення опрацювання дихальних шумів у комп'ютерних аускультативних діагностичних системах / І.Ю. Дедів, А.С. Сверстюк, Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський, М.О. Хвостівський. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 126 с. ISBN 978-617-574-219-8

21. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу / Л.Є. Дедів, А.С. Сверстюк, І.Ю. Дедів, М.О. Хвостівський, В.Г. Дозорський, Є.Б. Яворська. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 120 с.

22. Дозорський В.Г., Дедів Л.Є Математичне моделювання електроміографічних сигналів для задачі біопротезування / Матеріали ?

					КРБ 163.21-067.001 ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дат		78

Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій “присвячена 80-ти річчю з дня народження професора ЯІ Проця – Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2019 р. – 363-364.

23. The method of selection and pre-processing of electromyographic signals for bio-controlled prosthetic of hand / Vasil Dozorskyi, Vyacheslav Nykytyuk, Oksana Dozorska, Leonid Dediv, Evhenia Yavorska // 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). – pp. 188-191.

24. Задача біокерованого протезування кисті руки / В.Г. Дозорський, Л.Є. Дедів, А.В. Кубашок // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку науки, освіти та суспільства в Україні та світі» - Полтава, 20 травня 2022 р.- с. 48-49.

25. Vyacheslav Nykytyuk, Vasyl Dozorskyi, Oksana Dozorska. Detection of biomedical signals disruption using a sliding window. Scientific jornal of the Ternopil National Technical University. 2018. Vol. 91. № 3. P. 125–133.

ДОДАТКИ

DRV8662 Piezo Haptic Driver with Integrated Boost Converter

1 Features

- High-Voltage Piezo Haptic Driver
 - Drives up to 100 nF at 200 V_{PP} and 300 Hz
 - Drives up to 150 nF at 150 V_{PP} and 300 Hz
 - Drives up to 330 nF at 100 V_{PP} and 300 Hz
 - Drives up to 680 nF at 50 V_{PP} and 300 Hz
 - Differential Output
- Integrated Boost Converter
 - Adjustable Boost Voltage
 - Adjustable Current Limit
 - Integrated Power FET and Diode
 - No Transformer Required
- Fast Start Up Time of 1.5 ms
- Wide Supply Voltage Range of 3.3 V to 5.5 V
- 1.8 V Compatible Digital Pins
- Thermal Protection
- Available in a 4 mm × 4 mm × 0.9 mm QFN package (RGP)

2 Applications

- Mobile Phones
- Tablets
- Portable Computers
- Keyboards and Mice
- Touch Enabled Devices

3 Description

The DRV8662 is a single-chip piezo haptic driver with integrated 105 V boost switch, integrated power diode, and integrated fully-differential amplifier. This versatile device is capable of driving both high-voltage and low-voltage piezo haptic actuators. The input signal can be either differential or single-ended. The DRV8662 supports four GPIO-controlled gains: 28.8 dB, 34.8 dB, 38.4 dB, and 40.7 dB.

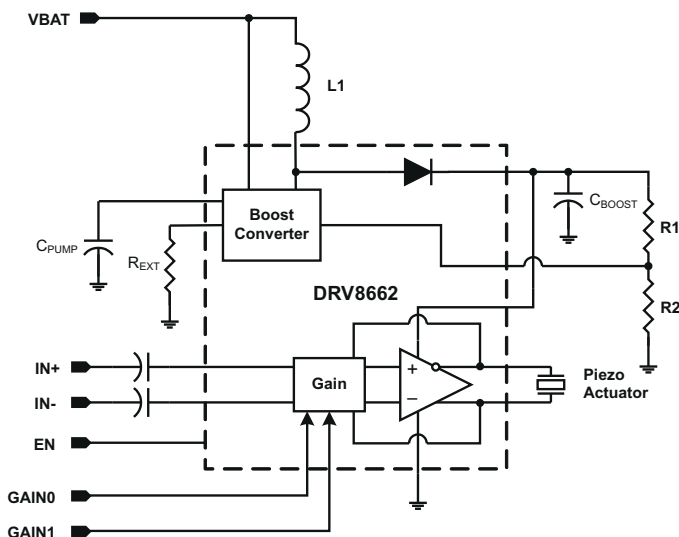
The boost voltage is set using two external resistors, and the boost current limit is programmable via the R_{EXT} resistor. The boost converter architecture will not allow the demand on the supply current to exceed the limit set by the R_{EXT} resistor; therefore, the DRV8662 is well-suited for portable applications. This feature also allows the user to optimize the DRV8662 circuit for a given inductor based on the desired performance requirements.

A typical start-up time of 1.5 ms makes the DRV8662 an ideal piezo driver for fast haptic responses. Thermal overload protection prevents the device from being damaged when over driven.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DRV8662	VQFN (20)	4.00 mm × 4.00 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.



Simplified Schematic



Table of Contents

1 Features	1	7.3 Feature Description.....	9
2 Applications	1	7.4 Device Functional Modes.....	10
3 Description	1	7.5 Programming.....	11
4 Revision History	2	8 Application and Implementation	12
5 Pin Configuration and Functions	3	8.1 Application Information.....	12
6 Specifications	4	8.2 Typical Application.....	12
6.1 Absolute Maximum Ratings.....	4	9 Power Supply Recommendations	17
6.2 ESD Ratings.....	4	10 Layout	18
6.3 Recommended Operating Conditions.....	4	10.1 Layout Guidelines.....	18
6.4 Thermal Information.....	5	10.2 Layout Example.....	18
6.5 Electrical Characteristics.....	5	11 Device and Documentation Support	19
6.6 Timing Requirements.....	5	11.1 Documentation Support.....	19
6.7 Typical Characteristics.....	6	11.2 Trademarks.....	19
7 Detailed Description	8	12 Mechanical, Packaging, and Orderable Information	19
7.1 Overview.....	8		
7.2 Functional Block Diagram.....	8		

4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

Changes from Revision B (July 2014) to Revision C (December 2022)	Page
• Changed V_{DD} MIN spec from 3.0 to 3.3.....	4

Changes from Revision A (November 2012) to Revision B (July 2014)	Page
• Added Device Information and ESD Rating tables, Feature Description section, Device Functional Modes, Application and Implementation section, Power Supply Recommendations section, Layout section, Device and Documentation Support section, and Mechanical, Packaging, and Orderable Information section.	1
• Added the Thermal Information table after the Recommend Operating Conditions table.	5

Changes from Revision * (June 2011) to Revision A (November 2012)	Page
• Added C_L , V_{IL} , V_{IH} specs to Recommended Operating Conditions table.....	4
• Added amplifier bandwidth spec (BW) to the Electrical Characteristics table for each gain setting.....	5

5 Pin Configuration and Functions

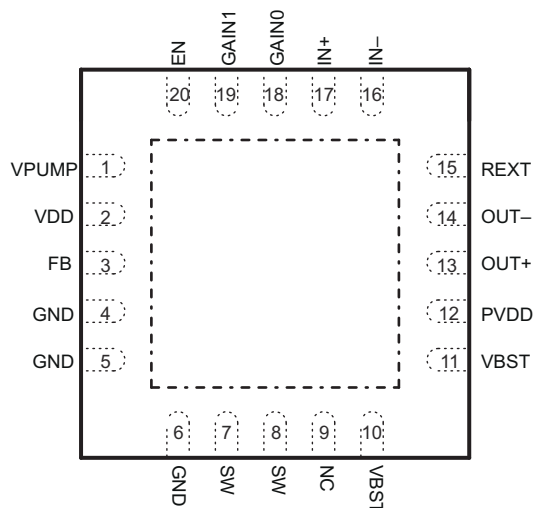


Figure 5-1. QFN (RGP) Top View

Table 5-1. Pin Functions

PIN		INPUT/ OUTPUT/ POWER (I/O/P)	DESCRIPTION
NAME	NO. (RGP)		
EN	20	I	Chip enable
FB	3	I	Boost feedback
GAIN0	18	I	Gain programming pin – LSB
GAIN1	19	I	Gain programming pin – MSB
GND	4, 5, 6	P	Ground
IN+	17	I	Non-inverting input (If unused, connect to GND through capacitor)
IN–	16	I	Inverting input (If unused, connect to GND through capacitor)
OUT+	13	O	Non-inverting output
OUT–	14	O	Inverting output
PVDD	12	P	Amplifier supply voltage
REXT	15	I	Resistor to ground, sets boost current limit
SW	7, 8	P	Internal boost switch pin
VBST	10, 11	P	Boost output voltage
VDD	2	P	Power supply (connect to battery)
VPUMP	1	P	Internal Charge-pump voltage

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted) ⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage	VDD	−0.3	6.0	V
V _I Input voltage	IN+, IN−, EN, GAIN0, GAIN1, FB	−0.3	V _{DD} + 0.3	V
Boost/Output Voltage	PVDD, SW, OUT+, OUT−		120	V
T _A Operating free-air temperature range		−40	70	°C
T _J Operating junction temperature range		−40	150	°C
Storage temperature, T _{stg}		−65	85	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

6.2 ESD Ratings

		VALUE	UNIT
V _(ESD) Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	±2500	V
	Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	±1500	

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

- (2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

			MIN	TYP	MAX	UNIT
V _{DD} Supply voltage	VDD		3.3		5.5	V
V _{BST} Boost voltage	VBST		15		105	V
V _{IN} Differential input voltage				1.8 ⁽¹⁾		V
C _L Load capacitance	VBST = 105 V, Frequency = 500 Hz, V _{O,PP} = 200 V				50	nF
	VBST = 105 V, Frequency = 300 Hz, V _{O,PP} = 200 V				100	
	VBST = 80 V, Frequency = 300 Hz, V _{O,PP} = 150 V				150	
	VBST = 55 V, Frequency = 300 Hz, V _{O,PP} = 100 V				330	
	VBST = 30 V, Frequency = 300 Hz, V _{O,PP} = 50 V				680	
	VBST = 25 V, Frequency = 300 Hz, V _{O,PP} = 40 V				1	μF
	VBST = 15 V, Frequency = 300 Hz, V _{O,PP} = 20 V				3	
V _{IL} Digital input low voltage	EN, GAIN0, GAIN1	V _{DD} = 3.6 V			0.75	V
V _{IH} Digital input high voltage	EN, GAIN0, GAIN1	V _{DD} = 3.6 V	1.4			V
R _{EXT} Current limit control resistor			6		35	kΩ
L Inductance for Boost Converter			3.3			μH

- (1) Gains are optimized for a 1.8V peak input

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		DRV8662	UNIT
		RGP (20 Pins)	
R _{θJA}	Junction-to-ambient thermal resistance	33.1	°C/W
R _{θJC(top)}	Junction-to-case (top) thermal resistance	30.9	
R _{θJB}	Junction-to-board thermal resistance	8.7	
Ψ _{JT}	Junction-to-top characterization parameter	0.4	
Ψ _{JB}	Junction-to-board characterization parameter	8.7	
R _{θJC(bot)}	Junction-to-case (bottom) thermal resistance	2.5	

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).

6.5 Electrical Characteristics

T_A = 25°C, V_{O,PP} = V_{OUT+} – V_{OUT-} = 200 V, C_L = 47 nF, A_V = 40 dB, L = 4.7 μH (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
I _{IL}	Digital input low current	EN, GAIN0, GAIN1	V _{DD} = 3.6 V, V _{IN} = 0 V			1	μA
I _{IH}	Digital input high current	EN, GAIN0, GAIN1	V _{DD} = 3.6 V, V _{IN} = V _{DD}			5	μA
I _{SD}	Shut down current	V _{DD} = 3.6 V, V _{EN} = 0 V			13		μA
I _{DDQ}	Quiescent current	V _{DD} = 3.6 V, V _{EN} = V _{DD} , VBST = 105 V, no signal			24		mA
		V _{DD} = 3.6 V, V _{EN} = V _{DD} , VBST = 80 V, no signal			13		mA
		V _{DD} = 3.6 V, V _{EN} = V _{DD} , VBST = 55 V, no signal			9		mA
		V _{DD} = 3.6 V, V _{EN} = V _{DD} , VBST = 30 V, no signal			5		mA
R _{IN}	Input impedance	All gains			100		kΩ
A _V	Amplifier gain	GAIN<1:0> = 00			28.8		dB
		GAIN<1:0> = 01			34.8		
		GAIN<1:0> = 10			38.4		
		GAIN<1:0> = 11			40.7		
BW	Amplifier Bandwidth	GAIN<1:0> = 00, V _{O,PP} = 50 V, No Load			20		kHz
		GAIN<1:0> = 01, V _{O,PP} = 100 V, No Load			10		
		GAIN<1:0> = 10, V _{O,PP} = 150 V, No Load			7.5		
		GAIN<1:0> = 11, V _{O,PP} = 200 V, No Load			5		
I _{BAT, AVG}	Average battery current during operation	V _{DD} = 3.6 V, C _L = 10 nF, f = 150 Hz, V _{O,PP} = 200 V			75		mA
		V _{DD} = 3.6 V, C _L = 10 nF, f = 300 Hz, V _{O,PP} = 200 V			115		
		V _{DD} = 3.6 V, C _L = 47 nF, f = 150 Hz, V _{O,PP} = 200 V			210		
		V _{DD} = 3.6 V, C _L = 47 nF, f = 300 Hz, V _{O,PP} = 200 V			400		
THD+N	Total harmonic distortion plus noise	f = 300 Hz, V _{O,PP} = 200 V			1%		

6.6 Timing Requirements

		MIN	TYP	MAX	UNIT
t _{SU}	Start-up time	V _{DD} = 3.6 V, time from EN high until boost and amplifier are fully enabled		1.5	ms

6.7 Typical Characteristics

$V_{DD} = 3.6\text{ V}$, $R_{EXT} = 7.5\text{ k}\Omega$, $L = 4.7\text{ }\mu\text{H}$, Differential Input

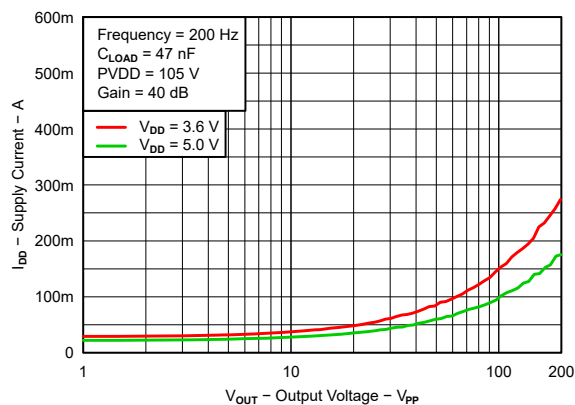


Figure 6-1. Supply Current vs Output Voltage

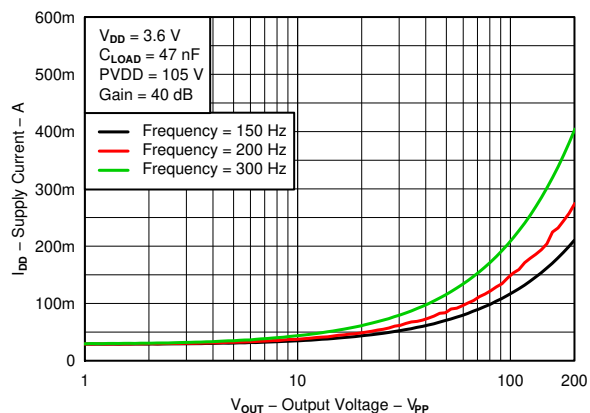


Figure 6-2. Supply Current vs Output Voltage

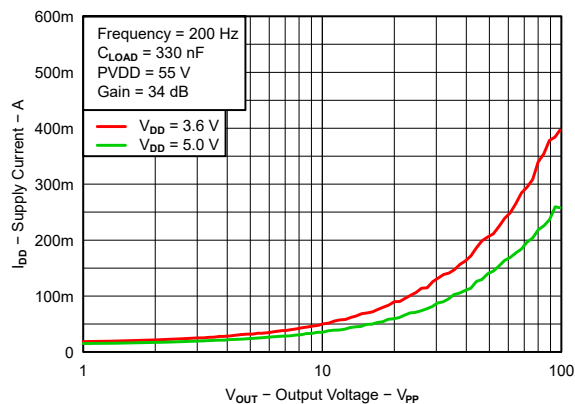


Figure 6-3. Supply Current vs Output Voltage

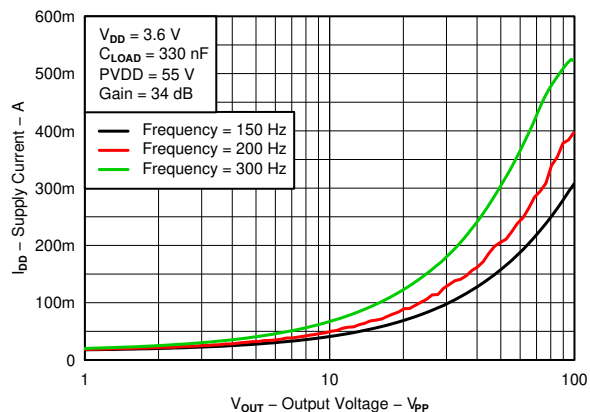


Figure 6-4. Supply Current vs Output Voltage

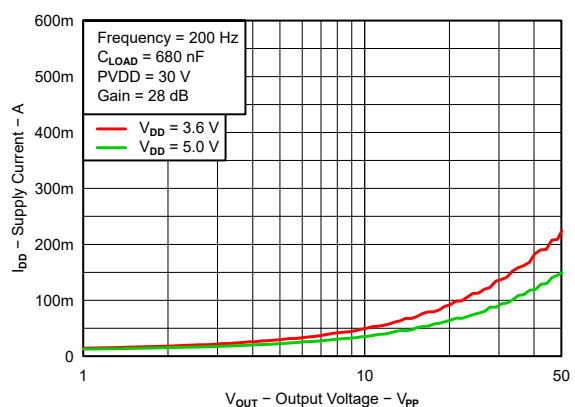


Figure 6-5. Supply Current vs Output Voltage

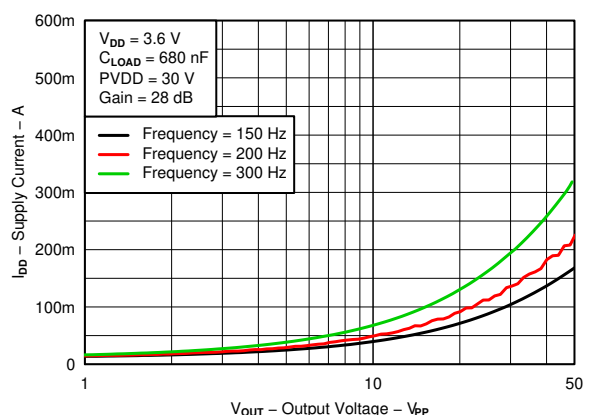


Figure 6-6. Supply Current vs Output Voltage

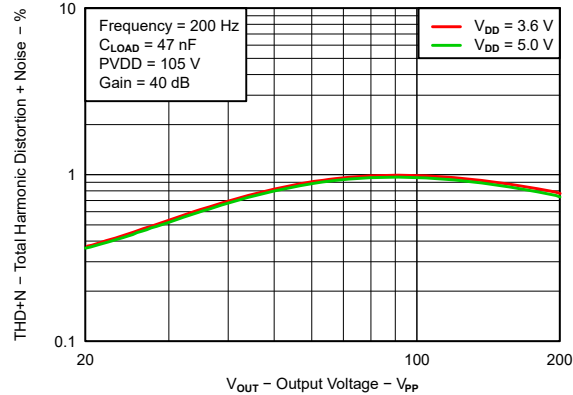


Figure 6-7. Total Harmonic Distortion + Noise vs Output Voltage

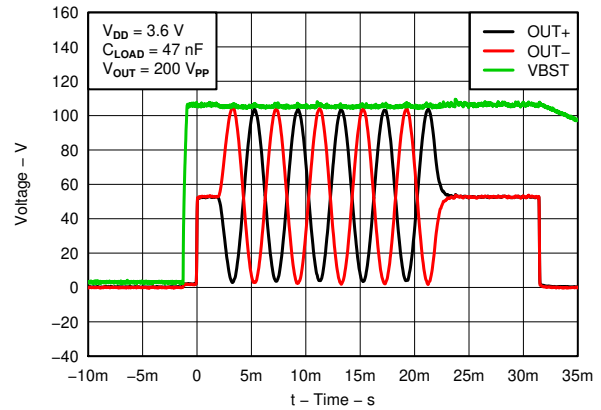


Figure 6-8. Typical Waveform

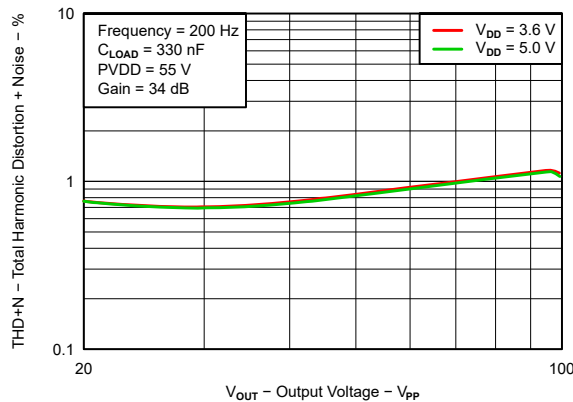


Figure 6-9. Total Harmonic Distortion + Noise vs Output Voltage

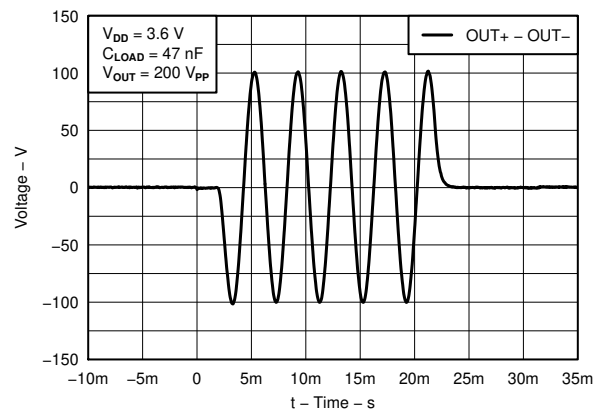


Figure 6-10. Typical Waveform - Differential

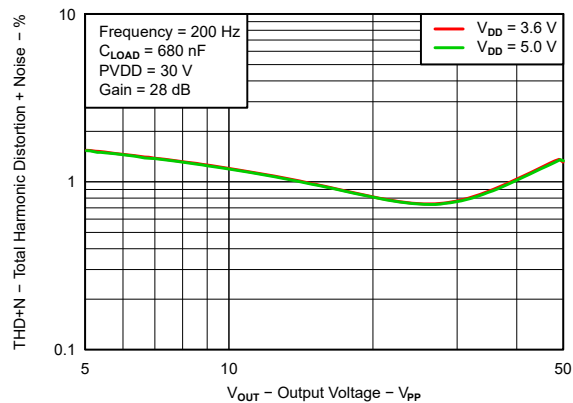


Figure 6-11. Total Harmonic Distortion + Noise vs Output Voltage

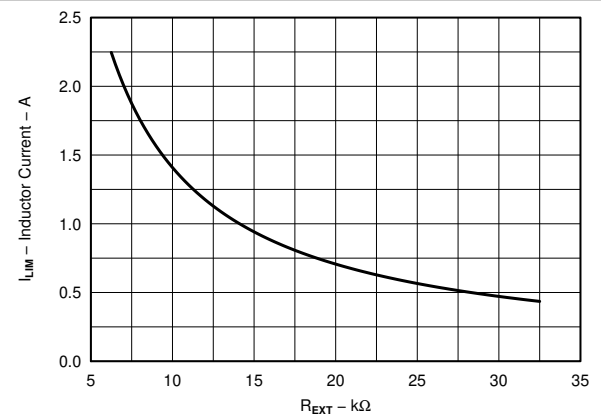


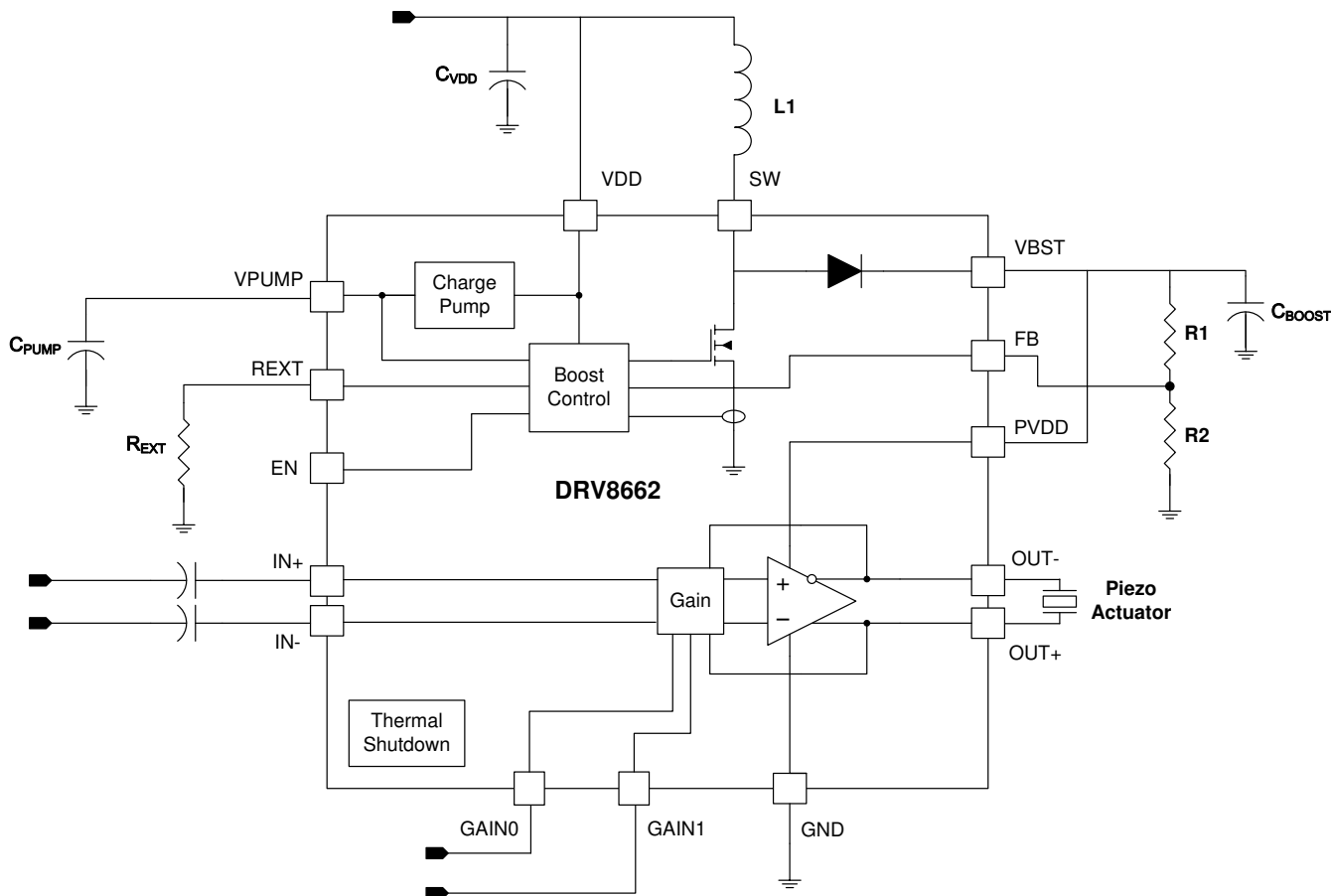
Figure 6-12. I_{LIM} vs R_{EXT}

7 Detailed Description

7.1 Overview

The DRV8662 accepts the typical battery range used in portable applications (3.3 V to 5.5 V) and creates a boosted supply rail with an integrated DC-DC converter. This boosted supply rail is fed to an internal, high-voltage, fully-differential amplifier that is capable of driving capacitive loads such as piezos with signals up to 200 V_{PP}. No transformer is required for boost operation. Only a single inductor is needed. The boost power FET and power diode are both integrated within the device.

7.2 Functional Block Diagram



7.3 Feature Description

7.3.1 Fast Start-up (Enable Pin)

The DRV8662 features a fast startup time, which is essential for achieving low latency in haptic applications. When the EN pin transitions from low to high, the boost supply is turned on, the input capacitor is pre-charged, and the amplifier is enabled in a typical 1.5 ms total startup time. In the system application, the entire system latency should be kept to less than 30 ms total to be imperceptible to the end user. At 1.5 ms, the DRV8662 will be a small percentage of the total system latency.

7.3.2 Gain Control

The gain from IN+/IN– to OUT+/OUT– is given by the table below.

GAIN1	GAIN0	Gain (dB)
0	0	28.8
0	1	34.8
1	0	38.4
1	1	40.7

The gains are optimized to achieve approximately 50 V_{PP}, 100 V_{PP}, 150 V_{PP}, or 200 V_{PP} at the output without clipping from a 1.8 V peak single-ended input signal source.

7.3.3 Adjustable Boost Voltage

The output voltage of the integrated boost converter may be adjusted by a resistive feedback divider between the boost output voltage (VBST) and the feedback pin (FB). The boost voltage should be programmed to a value greater than the maximum peak signal voltage that the user expects to create with the DRV8662 amplifier. Lower boost voltages will achieve better system efficiency when lower amplitude signals are applied, so the user should take care not to use a higher boost voltage than necessary. The maximum allowed boost voltage is 105V.

7.3.4 Adjustable Boost Current Limit

The current limit of the boost switch may be adjusted via a resistor to ground placed on the REXT pin. The programmed current limit should be less than the rated saturation limit of the inductor selected by the user to avoid damage to both the inductor and the DRV8662. If the combination of the programmed limit and inductor saturation is not high enough, then the output current of the boost converter will not be high enough to regulate the boost output voltage under heavy load conditions. This will, in turn, cause the boosted rail to sag, possibly causing distortion of the output waveform.

7.3.5 Internal Charge Pump

The DRV8662 has an integrated charge pump to provide adequate gate drive for internal nodes. The output of this charge pump is placed on the VPUMP pin. An X5R or X7R storage capacitor of 0.1 μF with a voltage rating of 10 V or greater must be placed at this pin.

7.3.6 Thermal Shutdown

The DRV8662 contains an internal temperature sensor that will shut down both the boost converter and the amplifier when the temperature threshold is exceeded. When the die temperature falls below the threshold, the device will restart operation automatically as long as the EN pin is high. Continuous operation of the DRV8662 is not recommended. Most haptic use models only operate the DRV8662 in short bursts. The thermal shutdown function will protect the DRV8662 from damage when overdriven, but usage models which drive the DRV8662 into thermal shutdown should always be avoided.

7.4 Device Functional Modes

7.4.1 Startup/shutdown Sequencing

A simple startup sequence should be employed to maintain smooth haptic operation. If the sequence is not followed, unintended haptic events or sounds may occur. Use the following steps to play back each haptic waveform.

7.4.1.1 PWM Source

1. Send 50% duty cycle from the processor to the DRV8662 input filter. This is to allow the source and input filter to settle before the DRV8662 is fully enabled. At the same time (or on the next available processor cycle), transition the DRV8662 enable pin from logic low to logic high.
2. Wait 2 ms to ensure that the DRV8662 circuitry is fully enabled and settled.
3. Begin and complete playback of the haptic waveform. The haptic waveform PWM should end with a 50% duty cycle to bring the differential output back to 0 V.
4. Transition the DRV8662 enable pin from high to low and power down the PWM source.

7.4.1.2 DAC Source

1. Set the DAC to its mid-scale code. This is to allow the source and input capacitors to settle before the DRV8662 is fully enabled. At the same time (or on the next available processor cycle), transition the DRV8662 enable pin from logic low to logic high.
2. Wait 2 ms to ensure that the DRV8662 circuitry is fully enabled and settled.
3. Begin and complete playback of the haptic waveform. The haptic waveform should end with a mid-scale DAC code to bring the differential output back to 0 V.
4. Transition the DRV8662 enable pin from high to low and power down the DAC source.

7.4.2 Low-voltage Operation

The lowest gain setting is optimized for 50 V_{PP} with a boost voltage of 30 V. Some applications may not need 50 V_{PP}, so the user may elect to program the boost converter as low as 15 V to improve efficiency. When using boost voltages lower than 30 V, some special considerations are in order. First, to reduce boost ripple to an acceptable level, a 50 V rated, 0.22 μ F boost capacitor is recommended. Second, the full-scale input range may need adjustment to avoid clipping. Normally, a 1.8 V, single-ended PWM signal will give 50 V_{PP} at the lowest gain. For example, if the boost voltage is set to 25 V for a 40 V_{PP} full-scale output signal, the full-scale input range drops to 1.44 V for single-ended PWM inputs. An input voltage divider may be desired in this case if a 1.8V I/O is used as a PWM source.

7.5 Programming

7.5.1 Programming the Boost Voltage

The boost output voltage (VBST) is programmed via two external resistors as shown in [Figure 7-1](#).

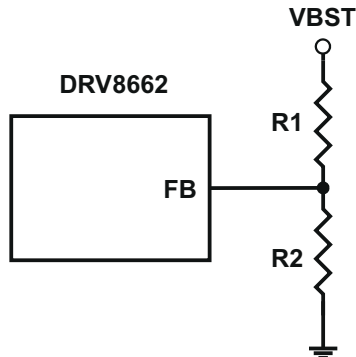


Figure 7-1. Boost Voltage Programming

The boost output voltage is given by [Equation 1](#):

$$V_{\text{BOOST}} = V_{\text{FB}} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1)$$

where $V_{\text{FB}} = 1.32 \text{ V}$.

VBST should be programmed to a value 5.0 V greater than the largest peak voltage expected in the system to allow adequate amplifier headroom. Since the programming range for the boost voltage extends to 105 V, the leakage current through the resistor divider can become significant. It is recommended that the sum of the resistance of R1 and R2 be greater than 500 kΩ. Note that when resistor values greater than 1 MΩ are used, PCB contamination may cause boost voltage inaccuracy. Exercise caution when soldering large resistances, and clean the area when finished for best results.

7.5.2 Programing the Boost Current Limit

The peak current drawn from the supply through the inductor is set solely by the R_{EXT} resistor. Note that this peak current limit is independent of the inductance value chosen, but the inductor should be capable of handling this programmed limit. The relationship of R_{EXT} to I_{LIM} is approximated by [Equation 2](#).

$$R_{\text{EXT}} = \left[K \frac{V_{\text{REF}}}{I_{\text{LIM}}} \right] - R_{\text{INT}} \quad (2)$$

where $K = 10500$, $V_{\text{REF}} = 1.35 \text{ V}$, $R_{\text{INT}} = 60 \text{ } \Omega$, and I_{LIM} is the desired peak current limit through the inductor.

8 Application and Implementation

Note

Information in the following applications sections is not part of the TI component specification, and TI does not warrant its accuracy or completeness. TI's customers are responsible for determining suitability of components for their purposes. Customers should validate and test their design implementation to confirm system functionality.

8.1 Application Information

The DRV8662 is typically used in systems that require haptic feedback using high-voltage Piezo actuators. These systems typically contain an applications processor or microcontroller, which generates a haptic waveform. This section contains two examples of such systems and how to appropriately configure the input signal for the DRV8662.

8.2 Typical Application

8.2.1 DRV8662 System Diagram with DAC Input

In the following DRV8662 diagram, the DRV8662 is configured with a differential DAC input and a generic Piezo actuator. This is useful for systems that have an available DAC or analog signal generator.

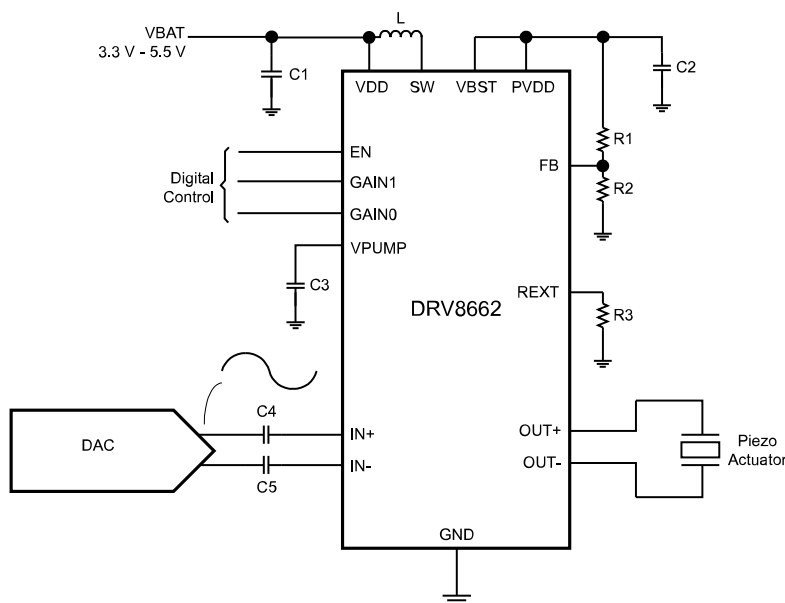


Figure 8-1. DRV8662 System Diagram with DAC Input

8.2.1.1 Design Requirements

For this example, use the parameters shown in [Table 8-1](#).

Table 8-1. Design Requirements

DESIGN PARAMETER	EXAMPLE VALUE
VDD	3.3 V – 5.5 V
Boost Converter	20-105 V
Output Voltage	2 x Boost Converter (Vpp)
Differential Input Voltage (IN+, IN-)	1.8 Vp Sine wave

Table 8-2 contains a list of components required for configuring the DRV8662. The components labeled “Standard” can be used “as-is”; and, the components labeled “Configure” require the designer to evaluate specific system requirements.

Table 8-2. List of Components

COMPONENT	DESCRIPTION	RECOMMENDED VALUE	UNIT	USE
CVDD	VDD bypass capacitor	0.1	μF	Standard
CPUMP	Voltage pump capacitor	0.1	μF	Standard
CIN+ / CIN-	IN+ / IN- AC coupling capacitors	1	μF	Standard
REXT	Boost current limit resistor	See Programming the Boost Current Limit	Ω	Configure
CPVDD	Boost converter output capacitor	See Boost Capacitor Selection	μF	Configure
L	Boost converter inductor	See Inductor Selection	μH	Configure
R1	Boost converter high-side feedback resistor	See Programming the Boost Voltage	Ω	Configure
R2	Boost converter low-side feedback resistor	See Programming the Boost Voltage	Ω	Configure

8.2.1.2 Detailed Design Procedure

8.2.1.2.1 Inductor Selection

Inductor selection plays a critical role in the performance of the DRV8662. The range of recommended inductances is from 3.3 μH to 22 μH. In general, higher inductances within a given manufacturer's inductor series have lower saturation current limits, and vice-versa. When a larger inductance is chosen, the DRV8662 boost converter will automatically run at a lower switching frequency and incur less switching losses; however, larger values of inductance may have higher equivalent series resistance (ESR), which will increase the parasitic inductor losses. Since lower values of inductance generally have higher saturation currents, they are a better choice when attempting to maximize the output current of the boost converter. The following table has sample inductors that provide adequate performance.

For inductor recommendations, see DRV8662EVM User's Guide ([SLOU319](#))

8.2.1.2.2 Piezo Actuator Selection

There are several key specifications to consider when choosing a piezo actuator for haptics such as dimensions, blocking force, and displacement. However, the key electrical specifications from the driver perspective are voltage rating and capacitance. At the maximum frequency of 500 Hz, the DRV8662 is optimized to drive up to 50 nF at 200 V_{PP}, which is the highest voltage swing capability. It will drive larger capacitances if the programmed boost voltage is lowered and/or the user limits the input frequency range to lower frequencies (e.g. 300 Hz).

For piezo actuator recommendations, see the DRV8662EVM User's Guide ([SLOU319](#)).

8.2.1.2.3 Boost Capacitor Selection

The boost output voltage may be programmed as high as 105V. A capacitor with a voltage rating of at least the boost output voltage must be selected. Since ceramic capacitors tend to come in ratings of 100 V or 250 V, a 250 V rated 100 nF capacitor of the X5R or X7R type is recommended for the 105 V case. The selected capacitor should have a minimum working capacitance of at least 50 nF.

8.2.1.2.4 Current Consumption Calculation

It is useful to understand how the voltage driven onto a piezo actuator relates to the current consumption from the power supply. Modeling a piezo element as a pure capacitor is reasonably accurate. The equation for the current through a capacitor for an applied sinusoid is given by [Equation 3](#):

$$I_{\text{Capacitor(Peak)}} = 2\pi \times f \times C \times V_P \quad (3)$$

where f is the frequency of the sinusoid in Hz, C is the capacitance of the piezo load in farads, and V_P is the peak voltage. At the power supply (usually a battery), the actuator current is multiplied by the boost-supply ratio and divided by the efficiency of the boost converter as shown by Equation 4.

$$I_{BAT(Peak)} = 2\pi \times f \times C \times V_P \times \frac{V_{Boost}}{V_{BAT} \times \mu_{Boost}} \quad (4)$$

Substituting typical values for the variables of this equation yields a typical peak current seen by the battery with a sine input as in Equation 5.

$$I_{BAT(Peak)} = 2\pi \times 300 \text{ Hz} \times 50 \text{ nF} \times 100 \times \frac{105}{3.6 \times 0.7} = 392 \text{ mA} \quad (5)$$

8.2.1.2.5 Input Filter Considerations

Depending on the quality of the source signal provided to the DRV8662, an input filter may be required. Some key factors to consider are whether the source is generated from a DAC or from PWM and the out-of-band content generated. If proper anti-image rejection filtering is used to eliminate image components, the filter can possibly be eliminated depending on the magnitude of the out-of-band components. If PWM is used, at least a 1st order RC filter is required. The PWM sample rate should be greater than 30 kHz to keep the PWM ripple from reaching the piezo element and dissipating unnecessary power. A 2nd order RC filter may be desirable to further eliminate out-of-band content to further drive down power dissipation and eliminate audible noise.

8.2.1.3 Application Curves

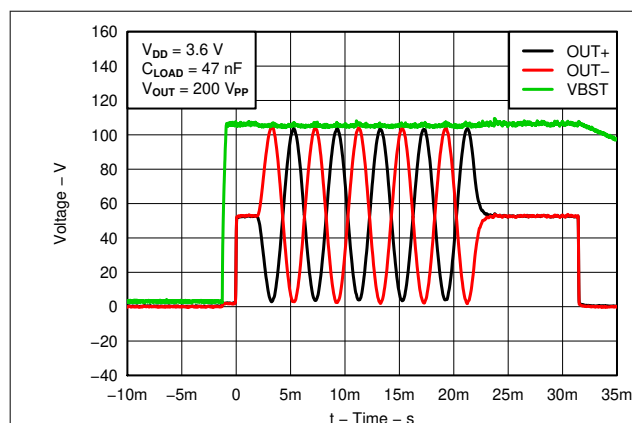


Figure 8-2. Typical Waveform

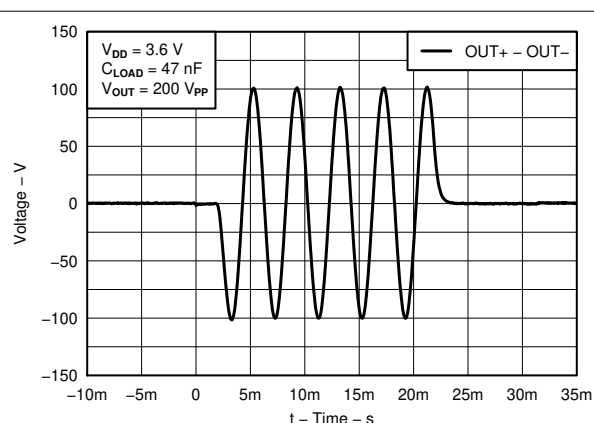


Figure 8-3. Typical Waveform – Differential

8.2.2 DRV8662 System Diagram with Filtered Single-Ended PWM Input

The DRV8662 can be used with a PWM input signal for systems that do not have an available DAC or analog output. Most piezo actuator systems require a PWM input filter to remove any unwanted noise.

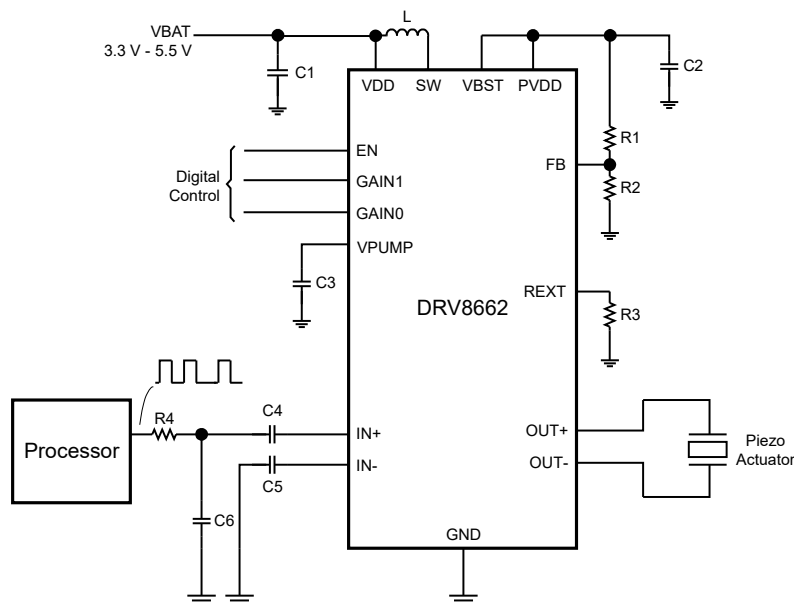


Figure 8-4. DRV8662 System Diagram with Filtered Single-Ended PWM Input

8.2.2.1 Design Requirements

For this example, use the parameters shown in [Table 8-3](#).

Table 8-3. Design Requirements

DESIGN PARAMETER	EXAMPLE VALUE
VDD	3.3 V – 5.5 V
Boost Converter	20-105 V
Output Voltage	2 x Boost Converter (V _{pp})
Differential Input Voltage (IN+, IN-)	1.8 V _p PWM

[Table 8-4](#) contains a list of components required for configuring the DRV8662. The components labeled “Standard” can be used “as-is”; and, the components labeled “Configure” require the designer to evaluate specific system requirements.

Table 8-4. List of Components

COMPONENT	DESCRIPTION	RECOMMENDED VALUE	UNIT	USE
CVDD	VDD bypass capacitor	0.1	μF	Standard
CPUMP	Voltage pump capacitor	0.1	μF	Standard
CIN+ / CIN-	IN+ / IN- AC coupling capacitors	1	μF	Standard
REXT	Boost current limit resistor	See Programming the Boost Current Limit	Ω	Configure
CPVDD	Boost converter output capacitor	See Boost Capacitor Selection	μF	Configure
L	Boost converter inductor	See Inductor Selection	μH	Configure
R1	Boost converter high-side feedback resistor	See Programming the Boost Voltage	Ω	Configure

Table 8-4. List of Components (continued)

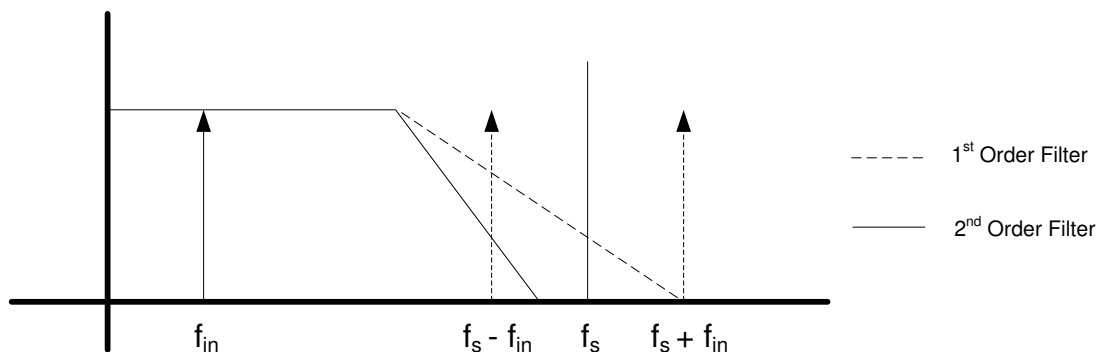
COMPONENT	DESCRIPTION	RECOMMENDED VALUE	UNIT	USE
R2	Boost converter low-side feedback resistor	See Programming the Boost Voltage	Ω	Configure

8.2.2.2 Detailed Design Procedure

Use the following section for designing the DRV8662 input filter. See the [DRV8662 System with DAC Input Detailed Design Procedure](#) for the remaining design.

8.2.2.2.1 Input Filter Design

When using a PWM input, a low-pass filter is required. The primary parameters for determining the input filter are the PWM input frequency and sample rate. Because haptic waveforms are typically less than 500Hz, the input filter must attenuate frequencies above 500 Hz. For sample rates above 20 kHz, a simple first-order RC filter is recommended; however, for sample rates much lower (such as 8 kHz), a first-order filter may not sufficiently attenuate the high-frequency content. Thus, for lower sampling rates, a second-order RC filter may be required. The *DRV8662EVM User's Guide* contains example filter configurations for both first-order and second-order filters. The DRV8662EVM default configuration uses a second-order, differential filter, but it can be replaced by a first-order, single-ended or differential filter.



Apply these criteria to select an input filter:

1. First-order RC filters, both single-ended and differential, are recommended for 20 kHz and higher data sample rates. The first-order filters have adequate settling time and the fewest components.
2. Second-order filters are recommended for noiseless operation when using a lower data sample rate where a sharper cutoff is necessary.
3. The attenuation at the PWM carrier frequency should be at least –40 dB for haptic applications.

8.2.2.3 Application Curves

See [DRV8662 System with DAC Input Application Curves](#).

9 Power Supply Recommendations

The recommended voltage supply range for the DRV8662 is 3.3 V to 5.5 V. For proper operation, place a 0.1 μ F low equivalent series resistance (ESR) supply-bypass capacitor of X5R or X7R type near the VDD pin with a voltage rating of at least 10 V.

The internal charge pump requires a 0.1 μ F capacitor of X5R or X7R type with a voltage rating of 10 V or greater be placed between the VPUMP pin and GND for proper operation and stability. Do not use the charge pump as a voltage source for any other devices.

10 Layout

10.1 Layout Guidelines

- To achieve optimum device performance, use of the thermal footprint outlined by this datasheet is recommended. See land pattern diagram for exact dimensions. The DRV8662 power pad must be soldered directly to the thermal pad on the printed circuit board. The printed circuit board thermal pad should be connected to the ground net with thermal vias to any existing backside/internal copper ground planes. Connection to a ground plane on the top layer near the corners of the device is also recommended.
- Another key layout consideration is to keep the boost programming resistors (R1 and R2) as close as possible to the FB pin of the DRV8662. Care should be taken to avoid getting the FB trace near the SW trace.

10.2 Layout Example

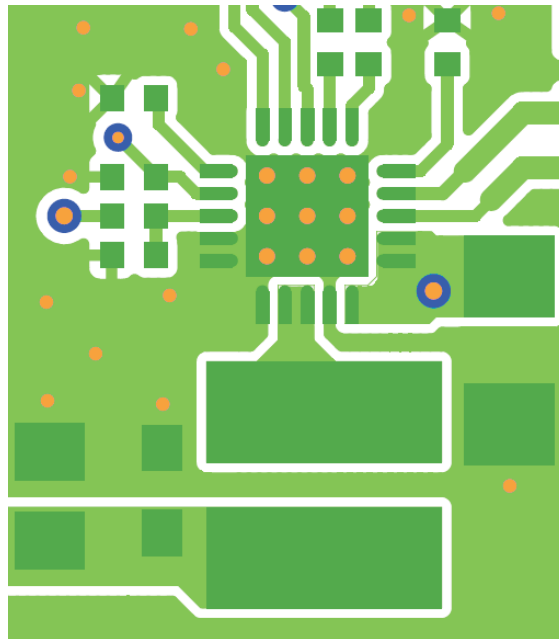


Figure 10-1. Layout Example

11 Device and Documentation Support

11.1 Documentation Support

11.1.1 Related Documentation

DRV8662EVM User's Guide ([SLOU319](#))

DRV8662 Configuration Guide ([SLOA198](#))

11.2 Trademarks

All trademarks are the property of their respective owners.

12 Mechanical, Packaging, and Orderable Information

The following pages include mechanical, packaging, and orderable information. This information is the most current data available for the designated devices. This data is subject to change without notice and revision of this document. For browser-based versions of this data sheet, refer to the left-hand navigation.

PACKAGING INFORMATION

Orderable part number	Status (1)	Material type (2)	Package Pins	Package qty Carrier	RoHS (3)	Lead finish/ Ball material (4)	MSL rating/ Peak reflow (5)	Op temp (°C)	Part marking (6)
DRV8662RGPR	Active	Production	QFN (RGP) 20	3000 LARGE T&R	Yes	Call TI Nipdau	Level-4-260C-72 HR	-40 to 70	8662
DRV8662RGPR.A	Active	Production	QFN (RGP) 20	3000 LARGE T&R	Yes	Call TI	Level-4-260C-72 HR	-40 to 70	8662
DRV8662RGPT	Active	Production	QFN (RGP) 20	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-4-260C-72 HR	-40 to 70	8662
DRV8662RGPT.A	Active	Production	QFN (RGP) 20	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-4-260C-72 HR	-40 to 70	8662

⁽¹⁾ **Status:** For more details on status, see our [product life cycle](#).

⁽²⁾ **Material type:** When designated, preproduction parts are prototypes/experimental devices, and are not yet approved or released for full production. Testing and final process, including without limitation quality assurance, reliability performance testing, and/or process qualification, may not yet be complete, and this item is subject to further changes or possible discontinuation. If available for ordering, purchases will be subject to an additional waiver at checkout, and are intended for early internal evaluation purposes only. These items are sold without warranties of any kind.

⁽³⁾ **RoHS values:** Yes, No, RoHS Exempt. See the [TI RoHS Statement](#) for additional information and value definition.

⁽⁴⁾ **Lead finish/Ball material:** Parts may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

⁽⁵⁾ **MSL rating/Peak reflow:** The moisture sensitivity level ratings and peak solder (reflow) temperatures. In the event that a part has multiple moisture sensitivity ratings, only the lowest level per JEDEC standards is shown. Refer to the shipping label for the actual reflow temperature that will be used to mount the part to the printed circuit board.

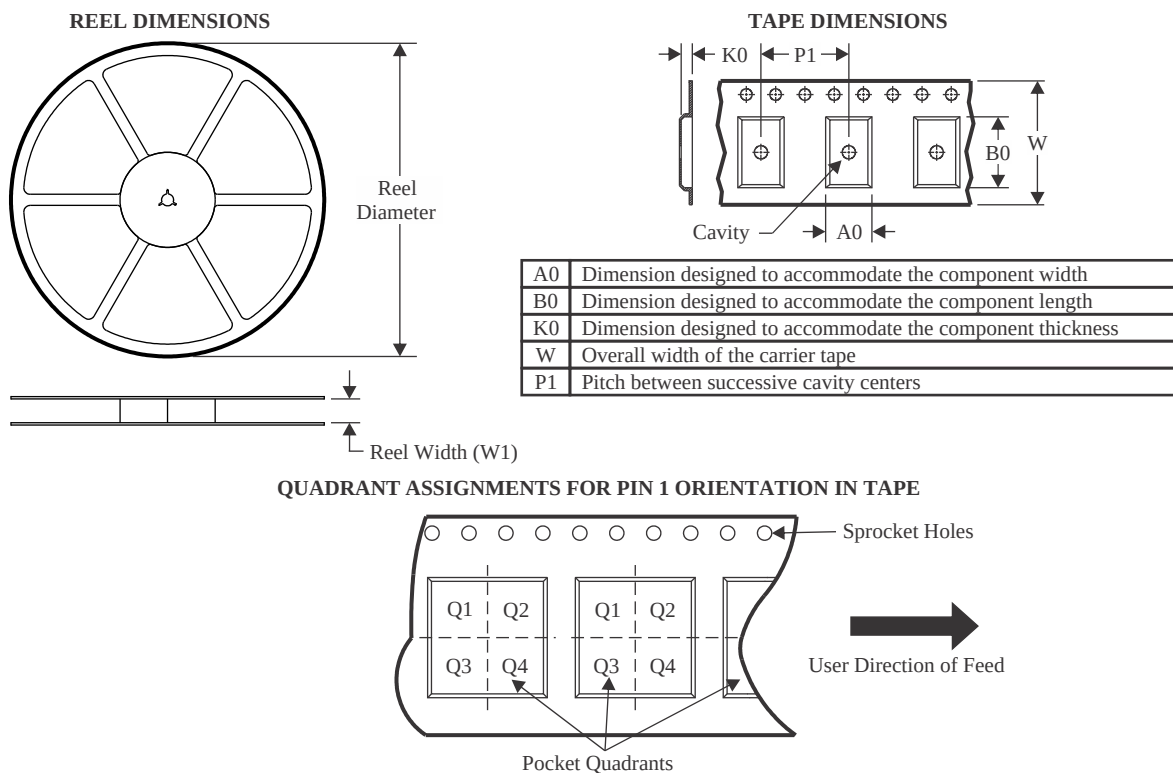
⁽⁶⁾ **Part marking:** There may be an additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category of the part.

Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

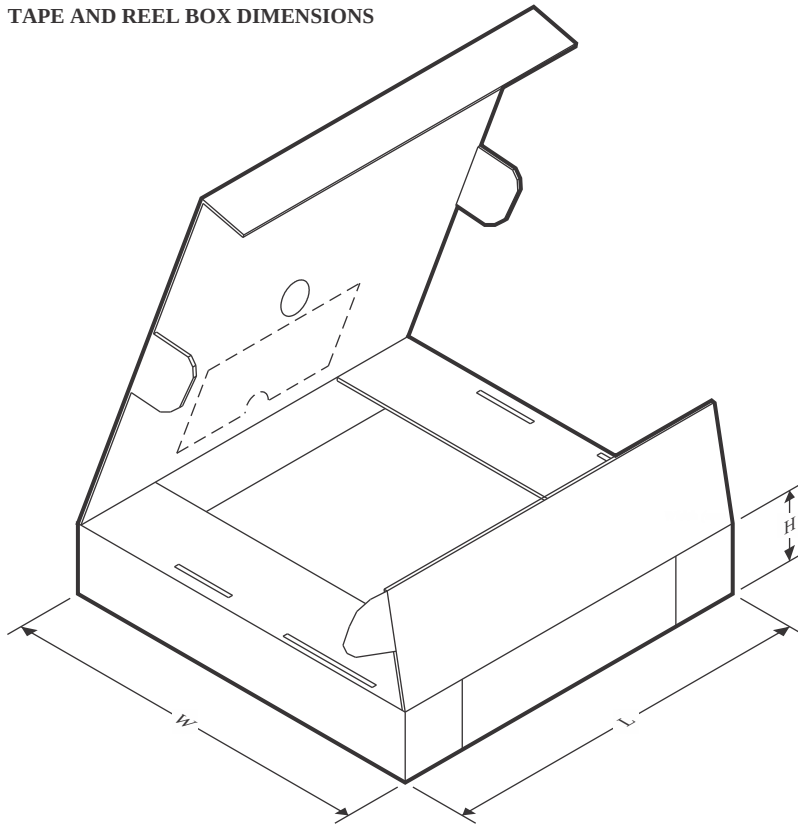
TAPE AND REEL INFORMATION



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
DRV8662RGPR	QFN	RGP	20	3000	330.0	12.4	4.25	4.25	1.15	8.0	12.0	Q2
DRV8662RGPT	QFN	RGP	20	250	180.0	12.4	4.25	4.25	1.15	8.0	12.0	Q2

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
DRV8662RGPR	QFN	RGP	20	3000	346.0	346.0	33.0
DRV8662RGPT	QFN	RGP	20	250	210.0	185.0	35.0

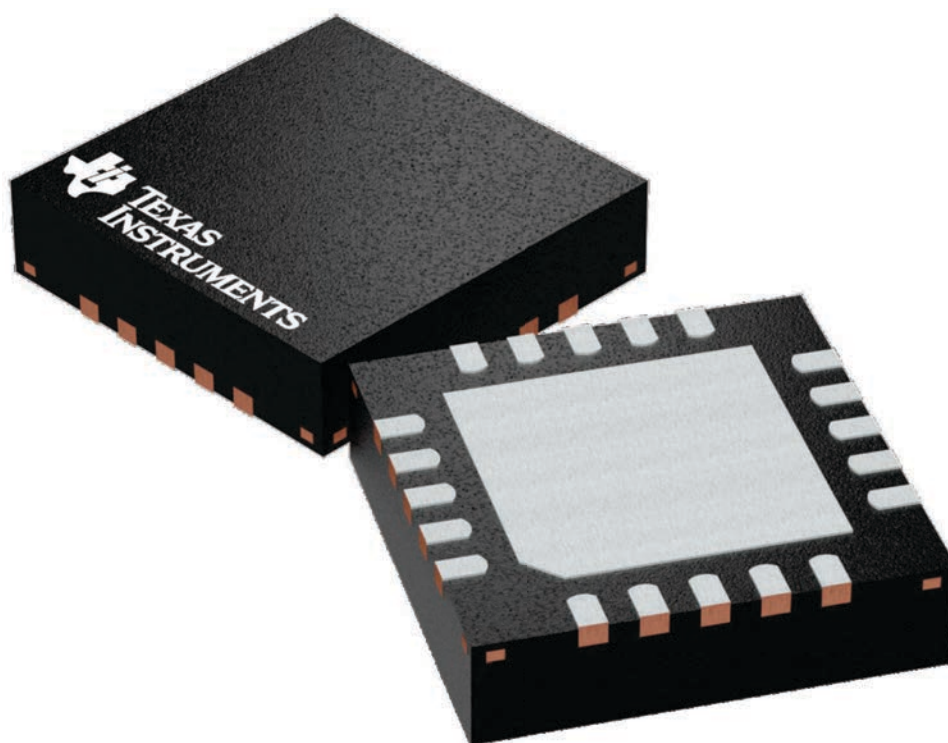
GENERIC PACKAGE VIEW

RGP 20

VQFN - 1 mm max height

4 x 4, 0.5 mm pitch

VERY THIN QUAD FLATPACK



Images above are just a representation of the package family, actual package may vary.
Refer to the product data sheet for package details.

4224735/A

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated