

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерних наук  
Секція комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ А. С. Довбиш

“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ “ 2019 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

Система керування процесом утилізації боєприпасів

Керівник проекту

к. т. н., доцент

Кулінченко Г.В.

Дипломник

студент гр. СУ.м-81

Павленко Є.В.

Суми 2019

*Сумський державний університет*

---

(назва вузу)

Факультет ЕЛІТ Кафедра Комп'ютерних наук

Спеціальність «Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

Затверджую:

зав.кафедрою \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНИУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Павленку Євгенію Вікторовичу

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): Система керування процесом утилізації боеприпасів затверджую наказом по інституту від “27 ” листопада 2019р. № 2342-III
2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) “16 ” грудня 2019р.
3. Вхідні данні до проекту (роботи):
  1. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ, 3-е изд: Учебное пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2016. – 397с.
  2. Кутняшенко И.В., Бован Д.В. Перспективы и проблемы утилизации взрывчатых веществ на предприятиях Украины: сборник научных трудов ДонНТУ серия «Химия и химическая технология» 2-е изд, 1995-2015., 110с.
  3. Автоматизація технічних процесів: ДСТУ 21.404 – 85;

4. Емельянов А. А., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С. и др. Математическое моделирование электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете SimPowerSystems // Молодой ученый. – 2016. – №15. – С. 5-10. – URL <https://moluch.ru/archive/119/33079/>
5. Соколов А.В. Динамические модели шаговых электродвигателей. 4-е изд. // ЮжноУральский государственный университет. Серия «Энергетика», выпуск 17, г. Челябинск 2016 г.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1)Аналіз сучасних технологій ктилізації боеприпасів, 2)Ідентифікація об'єкту керування, 3)Моделювання електропривода на базі КД в динамічних режимах роботи, 4)Аналіз моделювання електроприводу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Функціональна схема автоматизації.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання проекту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз сучасних технологій ктилізації боєприпасів	09.09.19 - 27.09.19	
2.	Ідентифікація об'єкту керування	30.09.19 - 11.10.19	
3.	Моделювання електропривода на базі КД в динамічних режимах роботи	14.10.19 - 11.11.19	
4.	Аналіз моделювання електроприводу	14.11.19 - 29.11.19	
5.	Оформлення пояснювальної записки до дипломної роботи	03.12.19 - 13.12.19	

Студент – дипломник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

**Записка:** 77 стор., 51 рис., 2 додатки, 26 джерел.

**Об'єкт дослідження** — процес утилізації боєприпасу.

**Мета роботи** — отримання необхідних даних для розробки системи керування позиціонуванням каретки на установці утилізації боєприпасів.

**Методи дослідження** базуються на імітаційному моделюванні процесу обертання крокового двигуна.

**Результати** — розроблена імітаційна модель крокового двигуна в середовищі Matlab Simulink, на її основі проведені дослідження та отриманні необхідні данні для розробки системи керування позиціонуванням каретки на установці утилізації боєприпасів, дослідження результатів імітаційної моделі на реальному об'єкті підтвердили адекватність моделі.

**Ключові слова** — утилізація боєприпасів, вибухова речовина, точність позиціонування, математична модель, імітаційна модель, динамічні характеристики, частота комутації.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП .....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ БОЄПРИПАСІВ.....	10
1.1 Задачі утилізації снарядів та технічних засобів їх здійснення .....	10
1.2 Структура технологічних комплексів .....	14
1.2.1 Закрите спалювання.....	14
1.2.2 Додаткові методи утилізації боєприпасів.....	21
1.2.3 Методи поділу компонентів.....	26
1.3 Аналіз технологій утилізації.....	30
1.4 Технологічний процес вилучення бойового заряду .....	31
1.5 Постановка завдань дослідження .....	33
РОЗДІЛ 2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	34
2.1 Огляд раніше розробленого рішення .....	34
2.2 Методи вирішення виявлених недопрацювань.....	40
2.2.1 Точність позиціонування.....	40
2.2.2 Синхронізація процесу розмивання .....	41
2.2.3 Вибухозахист .....	42
2.2.4 Захист від агресивних середовищ .....	43
2.2.5 Підвищення ефективності виробництва .....	44
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ КД В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ.....	45
3.1. Допущення, прийняті при моделюванні крокових електродвигунів.....	45

3.2. Математична модель крокового електроприводу в динамічних режимах роботи.....	47
3.3 Імітаційна модель крокового електроприводу в динамічних режимах роботи.....	51
3.4 Управління кроковим двигуном.....	57
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	60
4.1 Дослідження різних режимів руху .....	60
4.2 Дослідження результатів імітаційної моделі на реальному об'єкті .....	69
4.2.1 Побудова електроприводу скануючого пристрою .....	69
4.2.2 Результати випробувань приводу пристрою дистанційного сканування .....	74
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	78
ДОДАТКИ.....	81

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АВТ – Агрегат високого тиску;

АРМ – Автоматизоване робоче місце;

УВТ – Установа високого тиску;

ВР – Вибухові речовини;

ЧПУ – Числове програмне управління;

ФТО – Фільтр тонкого очищення;

ВО – Виконуючий орган;

ОУ – Об'єкт управління;

ВПТ – Вимірювальні перетворювачі тиску;

ПЛК – Програмований логічний контролер;

ЕПП – Електро – пневмо перетворювач;

ТЕП – Техніко – економічні показники;

ПЗО – Пристрої зв'язку з об'єктом;

ПУ – Пристрій керування;

МК – Мета керування;

ПО – Панель оператора.

ПП – прями́й підрив

RDX – гексоген ("розробка дослідницької лабораторії X ")

TNT – 2,4,6-тринітрометилбензол (Тринітротолуол, тротил, тол)



## ВСТУП

На сьогодні, однією зі складових проблем національної безпеки в Україні є перевантаження складів боєприпасами з вичерпаним гарантійним терміном придатності. Тому ускладнюється процес безпечного зберігання, що представляє постійну загрозу несанкціонованих вибухів і пожеж, та може призводити до катастрофічних наслідків, пов'язаних із загибеллю людей і непоправним збитком природі. Актуальною постає задача розробки сучасної автоматизованої системи утилізації боєприпасів, яка забезпечить ефективно та безпечно для персоналу роззброєння снарядів, і буде відповідати вимогам екологічності.[1]

Головна задача полягає у забезпечення високої точності позиціонування каретки, на якій знаходяться сопло для розрізання та сопло для вимивання. Оскільки боєприпаси мають різну будову та форму, то завданням керування передбачається уникнення небезпечних зон, які під дією струменя високого тиску можуть детонувати.

Метою досліджень є отримання необхідних даних для розробки системи керування позиціонуванням каретки на установці утилізації боєприпасів, що дозволяє зробити процес роззброєння безпечним.

Об'єктом дослідження є саме процес утилізації. Виходячи з науково – технічної точки зору, це буде точність позиціонування каретки. Проте, одночасне вирішення сформованих завдань проблематично вирішити без використання системи керування, тому предметом дослідження являється система керування процесом утилізації боєприпасів.

Практична цінність проведених досліджень полягає у адекватності розробленої імітаційної моделі та застосування її у багатьох сферах досліджень, де використовуються крокові двигуни.

## **РОЗДІЛ 1**

### **АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ БОЄПРИПАСІВ**

У нашій країні і за кордоном основним напрямком зниження запасів застарілих боєприпасів є їх утилізація і, головним чином, розпорядження бойових частин, особливо споряджених великими масами ВР.

Під методами розпорядження боєприпасів розуміють методи вилучення з них елементів вибухових речовин з подальшою утилізацією як ВР, так і елементів корпусів.

#### **1.1 Задачі утилізації снарядів та технічних засобів їх здійснення**

Технології розпорядження боєприпасів мають певну специфіку, яку слід обов'язково враховувати при проведенні робіт.

По-перше, в боєприпасах використовуються чутливі до механічних і теплових впливів речовини, що представляють собою значну потенційну вибухонебезпечність. Випадковий вибух одного снаряда в місці, де зосереджені їх значні запаси, у багатьох випадках призводить до трагічних наслідків.

По-друге, підлягаючі утилізації боєприпаси, як правило, уявляють собою нероз'ємну конструкцію, з самого початку не призначену для демонтажу і, отже, для вилучення заповнених продуктів.

По-третє, необхідна роздільна утилізація, наприклад металевої складової боєприпасу, і значної частки ВР, порохів, твердих ракетних палив і т.д. [ 2]

Як складне технічне завдання переробки вибухонебезпечних виробів тривалого зберігання, нерідко з невідомою історією експлуатації, утилізація повинна будуватися на ряді основних принципів:

I. Процес утилізації повинен передбачати переробку всіх елементів виробів, включаючи бойові частини, металльні заряди і двигуни, засоби ініціювання, системи управління, тару і т.д.

II. Безпека ведення процесів утилізації. Процес утилізації в ряді випадків більш небезпечний, ніж процес спорядження, як по ряду об'єктивних причин (велика різноманітність конструкцій, зосереджених в одному виробництві, різноманітні умови зберігання та експлуатації конкретних виробів, труднощі розбирання і вилучення ВР і т.д.), так і в силу суб'єктивних причин, викликаних меншою вивченістю процесів розпорядження, малим виробничим досвідом вітчизняної промисловості по утилізації, організаційними питаннями постачання боєприпасів на утилізацію і т.д.[3]

III. Процеси утилізації повинні бути екологічно чистими. При прямому спалюванні на відкритому повітрі або підривах в навколишнє середовище потрапляє велика кількість токсичних окислів, ціанідів, солей важких металів, діоксинів. Відбувається забруднення повітря, води і ґрунту. Тому технології утилізації повинні виключити отруєння навколишнього середовища.[3]

IV. Застосовувані процеси утилізації повинні здійснюватися з мінімальними економічними втратами, а при глибоких вторинних переробках одержуваної сировини в місцях утилізації вони повинні бути економічно вигідні, за винятком переробки окремих класів і видів боєприпасів.[4]

У більшості випадків розпорядження боєприпасів передбачає виконання таких типових операцій: вилучення підричника, розтин корпусу для доступу до вибухової речовини, видалення вибухової речовини, подальша переробка елементів корпусу і ВР.

Вивчення та аналіз методів і способів утилізації всіх видів боєприпасів, що застосовуються зарубіжними країнами, показали, що в умовах країн Західної Європи найбільш доцільними є:

- розпорядження з подальшим знищенням і переробкою компонентів боєприпасів;
- знищення методом дроблення і спалювання в спеціально обладнаних печах;
- переробка для промислового комерційного застосування.[4]

Схема основних процесів, що застосовуються при утилізації боєприпасів, представлена на рис. 1.1.

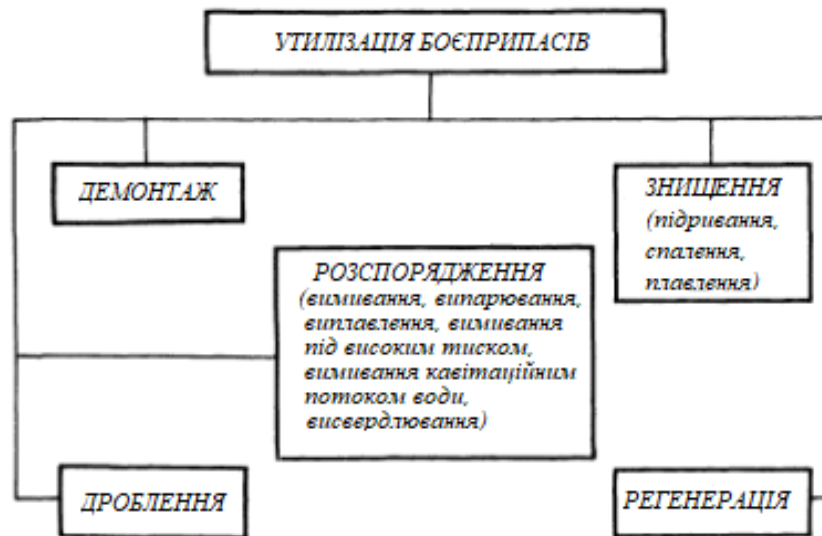


Рисунок 1.1 – Схема основних процесів, що застосовуються при утилізації боєприпасів

Для знищення боєприпасів використовується велика кількість різних технологічних процесів. Перш ніж провести оцінку найбільш прийнятної, для застосування автоматизованої системи управління способу утилізації, слід встановити ряд критеріїв оцінки.

1. Застосовувана технологія повинна бути сприятливою для застосування пристроїв автоматизації.

2. Застосовувана технологія має забезпечувати необоротне руйнування боєприпасів і вибухових речовин які в них містяться, металевих зарядів і піротехнічних складів.[5]

3. Застосовувана технологія повинна бути екологічно чистою і безпечною для персоналу. Слід керуватися принципами комплексної оцінки впливу на екосистему.

4. Застосовувана технологія повинна бути економічною, вимагати мінімальних витрат енергії для руйнування боєприпасів і давати мінімальні обсяги відходів.

5. Вживаний комплекс технологій повинен бути прийнятний для знищення більшості типів боєприпасів.

6. При певних умовах застосовувана технологія дозволяє домогтися безпеки боєприпасів в місці їх виявлення. При цьому залишені небезпечні боєприпаси підлягають транспортуванню.

На практиці знешкодження боєприпасів завжди проводиться з використанням деякої комбінації з перерахованих вище технологічних процесів.

При необхідності переробки великих партій боєприпасів економічно доцільним є створення стаціонарної установки. При необхідності переробки великих партій боєприпасів рекомендується використовувати мобільну установку. Багатообіцяючим підходом може бути трансформація боєприпасів в відходи класу 4.1. Цього можна домогтися шляхом поділу вибухівки та металевих частин боєприпасів і подальшого змішування вибухівки з водою і добавками [6].

## 1.2 Структура технологічних комплексів

В даний час практично немає універсального способу розпорядження боєприпасів. Це пов'язано з великою різноманітністю конструкцій боєприпасів, детонаторів, а також широкою рецептурою штатних бризантних ВР, використовуваних з метою спорядження і вирізняючихся своїми фізико-хімічними та механічними властивостями.

Розглянемо основні способи утилізації боєприпасів та вилучення вибухової речовини, та оберемо найбільш прийнятний, для застосування автоматизованої системи управління.

Захоронення боєприпасів у вигляді скидання у море та поховання на полігонах, а також відкрите спалювання і прямий підрив розглядати не будемо, так як про систему автоматизованого управління в цих випадках не може йти і мови.

### 1.2.1 Закрите спалювання

**Барабанна піч що обертається.** Обертюва піч застосовується для контрольованого термічного знищення боєприпасів або вибухівки за фіксований період часу і для видалення газоподібних відходів у вигляді возгону.

Обертюва барабанна піч є найбільш поширеним типом обертювих печей для знищення боєприпасів.

Боєприпаси подаються через завантажувальний бункер (рис. 1.2), який регулює швидкість надходження в піч боєприпасів (з сусіднього відсіку). Швидкість завантаження боєприпасів велике значення в плані забезпечення безпеки процесу, оскільки дозволяє уникати надмірної концентрації боєприпасів в печі. Боєприпаси реагують на високу температуру в камері печі, яка досягається за рахунок роботи форсунок в торцевій частині печі. Ці форсунки працюють на газі або нафтопродуктах. Обертюва піч спалювання являє собою

товстостінний сталевий барабан, що обертається, циліндричної форми конструкції "архимедова гвинта". Контрольований за швидкістю обертальний рух барабана викликає просування боєприпасів вздовж нагрітої камери. Оскільки для різних типів боєприпасів необхідно різний час знаходження в камері, швидкість обертання печі регулюється. У певний момент знаходження в камері спалювання вибухівка запалюється. Продукти реакції горіння змішуються з додатковими обсягами повітря до повного згорання в камері за межами зони горіння (за форсунками) і повністю згорають. Тверді відходи реакції горіння збираються за допомогою зольних улавлювачей, циклонів і фільтрів; вони можуть мати мішкоподібну форму або форму керамічних фільтрів. Газоподібні продукти сублімації обробляються з допомогою водяних фільтрів і установок з уловлювання шкідливих газів. Ці уловлювачі особливо необхідні при спалюванні такої вибухівки, як ТНТ, в силу утворюючихся високих концентрацій NOx. Завдяки цьому дотримуються строгі вимоги національних природоохоронних органів про викиди відпрацьованих газів [7].



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд обертової барабанної печі (Фото NAMSA)

Залежно від габаритів і експлуатаційних показників обертові печі можуть використовуватися для спалювання безоболонкових вибухових речовин і

метальних зарядів, боєприпасів малого калібру (До 20 000 патронів в годину), детонаторів, детонаторів і інших ініціюючих пристроїв, особливо в великих кількостях. При необхідності боєприпаси великого і середнього калібру проходять фазу попередньої обробки для вивільнення вибухової наповнювача.

Обертові печі спалювання широко застосовуються в промислових масштабах в США, Німеччині, Франції, Італії, Сполученому Королівстві, Албанії та Україні. На закінчення можна зазначити те, що метод закритого спалювання за допомогою обертової печі особливо підходить для знищення широкої номенклатури боєприпасів, що підлягають демілітаризації.

У Боснії ПРООН використовує пересувну систему знищення боєприпасів (TADS) на контейнерній платформі (рис. 1.3). Ця система може бути доставлена в будь-який район з витратами, складовими 25 відсотків від вартості промислової стаціонарної обертової печі. Такі мобільні системи можуть застосовуватися для знищення середніх партій боєприпасів малого калібру.



Рисунок 1.3 – Пересувна система знищення боєприпасів на контейнерній платформі, що застосовується відділенням ПРООН в Боснії

**Піч для спалювання в псевдозрідженому шарі.** Відходи боєприпасів подаються у вигляді недетонуючого шламу в основі печі (червона зона). В основі печі знаходиться шар агента у вигляді піску (в основному окису кварцу) в частинках строго встановленого розміру. Під впливом потоку гарячого повітря піщинки піднімаються вгору і поводяться як рідина. Це досить безпечний метод спалювання відходів вибухівки. [8]



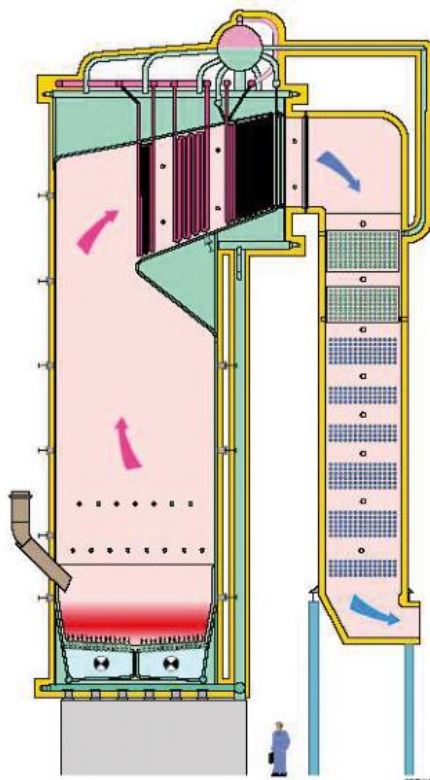


Рисунок 1.4 – Піч для спалювання в псевдозрідженому шарі

Печі такої конструкції можуть мати різні габарити. На рисунку 1.4 показана велика промислова установка. Для спалювання відходів вибухівки годяться і невеликі печі діаметром 0,5 метра.

Основна перевага печі спалювання в псевдозрідженому шарі полягає в її малій енергоємності. Це дозволяє відбирати надлишки тепла у печі спалювання для опалення окремої камери / печі для теплової обробки невеликих партій елементів боєприпасів середнього розміру.

Печі спалювання в псевдозрідженому шарі спеціально призначені для знищення нерозсортованих вибухових матеріалів і металевих зарядів в формі шламу з енергоносіїв та води. Знищення піротехнічних складів методом спалювання в псевдозрідженому шарі не завжди можливо з огляду на утворення продуктів, які вступають в реакцію з піском в шарі спалювання. Це може привести до грудкування піску і порушити нормальне функціонування киплячого шару.

**Піч з висувним піддоном.** Піч такого типу використовується для теплової обробки боєприпасів малого калібру (і їх комплектуючих), таких, як запальники, детонатори і підрильники. Зазвичай така піч застосовується для знищення невеликих партій боєприпасів; великі партії можуть бути знищені в обертових печах. Піч з висувним піддоном (ПВП) також використовується для теплової обробки металобрухту з невеликими залишковими кількостями вибухівки. На практиці така піч експлуатується в поєднанні з іншими установками, наприклад, в комбінації з піччю іншого типу. Тепло, необхідне для обігріву цієї печі, надходить за рахунок відбору зайвого тепла, виробленого основною установкою.



Рисунок 1.5 – Вид печі з висувним піддоном в напіввідкритому стані

Боєприпаси завантажуються в піддон (який укочують в піч по рейках). Звичайний період знаходження боєприпасів або металобрухту в печі становить 30 хвилин. Відпрацьовані гази з печі потім направляються в систему уловлювання забруднювачів, змонтовану на сусідньому об'єкті (наприклад, печі спалювання в псевдозрідженому шарі). Пройдені теплову обробку і залишені в піддоні металеві частини можуть бути засвідчені, що не містять вибухівку, упаковані і відправлені на підприємство по переробці металобрухту.

**Установка високотемпературної газової дезактивації.** Установка високотемпературної газової дезактивації (ВГД) (по суті справи збільшений варіант ПВП) може застосовуватися для переробки боєприпасів, які містять малі

кількості енергоносіїв, до стану, при якому вони майже не містять енергоносіїв. Підлягаючі переробці предмети завантажуються в короба, закріплені на металевих піддонах, або завантажуються безпосередньо на платформу рейкової вагонетки особливої конструкції. Вагонетка потім подається в дезактиваційних камеру таким чином, щоб вагонетка і камера спалювання разом становили герметично закриту ємність. Потім протягом одного-двох годин в камеру нагнітається розпечене повітря, що підтримує в ній температуру 300 ° С.



Рисунок 1.6 – Установа високотемпературної газової дезактивації.

На платформі вагонетки знаходяться металеві коробки, що містять партію попередню оброблених боєприпасів.

Така установка призначена в першу чергу для звільнення великих партій металевих залишків від присутності вибухівки.

**Камера підриву в герметично закритому об'ємі або контрольованої детонації.** Цей тип обладнання використовується для знищення боєприпасів методом відповідної детонації. У ньому підриву знищуваних боєприпасів проводиться за допомогою їх відповідної детонації при вибуху невеликого заряду вибухівки, в основному пластичної вибухівки, що розміщується впритул до знищуваним боєприпасів. Камера підриву здатна витримати надлишковий тиск, що створюється детонуючої всередині вибухівкою, але не може протистояти бризантного впливу зовнішніх детонацій. Максимальна маса

вибухівки, яка може бути підірвана при єдиній закладці, залежить від конструкції і габаритів детонаційної камери. Детонаційна камера ідеально підходить для знищення невеликих партій боєприпасів середнього розміру, таких, як ручні гранати і протипіхотні міни. Боєприпаси більшого калібру (снаряди калібру > 105 мм), можливо, потребують удосконалення для їх знищення в детонаційній камері.

З метою захисту персоналу слід застосовувати ті ж елементарні засоби індивідуального захисту, що і при відкритому спалюванні і прямому підриві.



Рисунок 1.7 – Пересувний варіант детонаційної камери, обладнаної глушником і секцією очищення вихлопу

### 1.2.2 Додаткові методи утилізації боєприпасів

Були розглянуті окремі методи закритого спалювання і закритого підриву. Застосування більшості цих технологій вимагає обмеження розмірів знищеної за раз партії боєприпасів або вжиття заходів для ослаблення найбільш руйнівних вражаючих властивостей боєприпасів. Утилізація боєприпасів великого калібру може потребувати їх розбирання. За допомогою такого варіанту розпорядження боєприпасів отримують:

- вивільнені вибухові компоненти, повністю придатні для подальшого видалення;
- компоненти вибухівки, що вимагають механічного розукрупнення.

**Розбирання.** Розбирання можлива на збройових заводах, які виробляють боєприпаси. В ході неї комплектуючі боєприпасів поділяються за допомогою обладнання, яке, можливо, також застосовується для виробництва боєприпасів. Це обладнання потребує переналадження на виробничий процес в зворотному порядку і може бути довірено лише кваліфікованим фахівцям. Весь процес складається з наступних операцій:

- видалення з корпусу боєприпасу засобів ініціювання: детонаторів і детонаторів;
- видалення зі снарядів капсулів-детонаторів;
- поділ проміжних детонаторів і запалів;
- видалення з гільзи капсуля-детонатора і запальною трубки;
- відділення від снарядів металевих зарядів і видалення з них металевих вибухових речовин.

На відповідному обладнанні і силами кваліфікованого персоналу можна робити різання корпусів боєприпасів. При механічному розбиранні для розпорядження боєприпасів застосовуються відповідні верстати. На відміну від ручного розбирання механічне відрізняється високою продуктивністю, воно

ефективне і вимагає малих трудових затрат. Однак для повного технологічного розукрупнення боєприпасів необхідний широкий набір машин і устаткування.

**Механічне розукрупнення.** Для механічного розукрупнення корпусів боєприпасів застосовується різне устаткування, таке, як токарні верстати, пили (в першу чергу стрічкові), і обладнання гідроабразивного різання. Різці застосовуються для розкриття корпусу боєприпасів, відділення підривника від корпусу снаряда, відділення вибухового спорядження від снаряда і т. д. без необхідності вдаватися до використання широкої номенклатури спеціалізованої техніки, застосовуваної при розбиранні. Однак за своєю трудомісткості і продуктивності цей метод близький до процесу розбирання.



Рисунок 1.8 – Токарний верстат для різання мінометної міни калібру 81  
мм

Розукрупнення снарядів можливо не тільки за допомогою різання на токарному верстаті, але і шляхом розпилу або різання на частини при дотриманні необхідних запобіжних заходів. Такі методи можуть застосовуватися в будь-якій країні. Користування такою технологією для розбирання боєприпасів вимагає дотримання особливої обережності в силу того, що вибухові наповнювачі чутливі до тертя.

Цей метод розукрупнення боєприпасів застосовуємо за умови прийняття заходів, що гарантують безпеку персоналу. Застосування верстатів з дистанційним управлінням (безлюдній технології) в більшості випадків може бути достатнім і обов'язковою умовою для забезпечення безпеки виробничого процесу.

Боєприпас може також бути розділений на частини з застосуванням технології різання струменем води високого тиску з додаванням абразивного елемента, за умови, що тиск струменя води не перевищує 2000 бар. Як правило, звичайний технологічний тиск не перевищує 200 бар.

Ця технологія вперше стала застосовуватися на морських платформах з видобутку енергоносіїв і використовувалася для різання трубопроводів або відкритих нафтосховищ в присутності вуглеводневих парів.



Рисунок 1.9 – Устаткування для гідроабразивного різання. На вставці показаний розрізаний снаряд калібру 155 мм

Технологія гідроабразивного різання (ГАР) має ту перевагу, що цей метод є гнучким і дозволяє робити поперечне розрізання будь-яких боєприпасів: від снарядів калібру 40 мм до великих авіаційних бомб і торпед. Ще одна перевага полягає в підтвердженій безпеці цього методу при його експлуатації за умови

дотримання обумовленого тиску. Агрегат ГАР в першу чергу призначений для різання боєприпасів, що містять пластифіковану вибухівку.

На закінчення слід вказати на те, що механічне розукрупнення боєприпасів є ефективним методом, за умови застосування обладнання з дистанційним управлінням (безлюдній технології).

**Розламування боєприпасів при наднизьких температурах.** Ця технологія була створена для знешкодження хімічних боєприпасів. [6] Вона полягає в тому, що боєприпаси піддаються впливу наднизьких (Кріогенних) температур в камері з рідким азотом. Під впливом наднизької температури сталевий корпус боєприпасів стає ламким. Снаряди, які пройшли таку обробку далі подаються на гідравлічний прес і розламуються з метою вилучення з корпусу вибухової або хімічної речовини, після чого корпус снаряда піддається подальшому дробленню на більш дрібні металеві фрагменти.

Завдяки низькій температурі бойовий хімічний агент снаряда не випаровується, і тому металеві фрагменти і хімічний агент піддаються обробці в спеціальній печі, обладнаній системою очищення від газів, що відходять.



Рисунок 1.10 – Установка для вакуумного розламування снарядів на заводі "Алсетекс", Франція (фото NAMSA)



Кріогенне розламування знайшло широке застосування в Європі для промислової демілітаризації корпусних боєприпасів малого калібру і їх компонентів. Наднизькі температури десенсибілізують вибуховий матеріал боєприпасу, що дозволяє провести його безпечно дроблення і подальшу переробку в печі спалювання. За допомогою цього методу знищені багато десятків тисяч касетних бомб.

### 1.2.3 Методи поділу компонентів

Серед методів, які звичайно застосовуються для відділення вибухових компонентів від металевого корпусу боєприпасів, слід назвати:

- виплавлення;
- вимивання струменем води високого тиску;
- вимивання за допомогою розчинника.

**Методи виплавлення.** Технологія виплавлення широко застосовується для вилучення вибухівки і наповнювачів з корпусу боєприпасів, що заповнюються компонентами в розплавленому стані. Найбільш відомим прикладом є ТНТ і складові вибухові речовини з тринітротолуолом, такі, як TNT / RDX, які споряджаються в розплавленому вигляді при температурі 80,35°C і вище. Технологія виплавлення придатна для всіх боєприпасів на базі TNN. зважаючи на високу температуру плавлення RDX (205,5°C) цей метод не застосуємо для расснаряження боєприпасів, заповнених RDX.

Боєприпаси розігріваються до необхідної температури в камерах, що обігріваються гарячою водою / паром, або в індукційних печах. Вибухівка плавиться при температурах понад 80,35°C і впливає з корпусу боєприпасу. Розплавлена вибухівка потім збирається для подальшої переробки або видалення. Утилізована вибухівка часто використовується при виробництві промислової вибухівки для підривних робіт.

- Необхідно відокремлювати пари ТНТ від вихлопу
- Залишковий шар вибухівки на стінках корпусу боєприпасів вимагає того, щоб боєприпаси були піддані додатковій тепловій обробці (спалювання в ПВП або ВГД).

Технологія виплавлення також використовується для демілітаризації боєприпасів, що містять білий фосфор (БФ). Боєприпаси розміщують у ванні з гарячою водою (50 ° С). Фосфор плавиться при температурі 42°C і піддається збору в воді. Цей етап необхідний в силу вибухонебезпечності фосфору при

вступі в реакцію з атмосферним киснем. Утилізовано БФ має промислове застосування. Невеликі партії боєприпасів з БФ можуть бути знищені методом прямого підризу (ПП), але при консультативному сприяння фахівців з проблем попередження забруднення навколишнього середовища.



Рисунок 1.11 – Виплавлення TNT в автоклавах на заводі по утилізації боєприпасів в Анкарі (фото NAMSA)

**Вимивання водяним струменем.** Вимивання вибухових наповнювачів водяним струменем будується на принципі застосування вимивного впливу водяного струменя під високим тиском. За допомогою обертової насадки водяний струмінь направляється на вибуховий наповнювач. За допомогою методу вимивання водою під високим тиском можна домогтися вилучення всіх типів вибухових наповнювачів з металевго корпусу боєприпасів. Метод вимивання в першу чергу підходить для видалення пластичних вибухових речовин (ЗВР) і інших неплавких вибухових матеріалів.

Показана на рисунку 1.12 установка здатна вимивати вибухівку з двох снарядів одночасно. Розпорядження всіх восьми показаних на малюнку снарядів на цій установці не перевищило півгодини.



Рисунок 1.12 – Вимивання вибухівки струменем води з снарядів калібру 155 мм

Особливості методу вимивання струменем води полягають в наступному:

- водяна гармата забезпечує повне вимивання всіх типів вибухівки (за винятком плавкої вибухівки), при цьому всередині корпусу снаряда не залишається навіть тонкого шару вибухової матеріалу;
- менш забруднені приміщення з присутністю меншої кількості парів TNT створюють більш гігієнічні умови праці;
- вода, яка використовується для процесу вимивання, працює в замкнутому циклі (без утворення забруднених стоків);
- вибухівка може бути відокремлена від води і утилізована;
- вибухівка може бути трансформована в шлам, що класифікується як клас небезпеки 4.1 [9].

Установка водяної гармати може бути вельми ефективно доповнена системою гідроабразивного різання, про яку йшлося раніше.

**Вимивання з допомогою розчинників.** При цьому методі використовується розчинник, який легко розчиняє вибухівку. Оскільки більшість вибухових речовин, таких, як TNT і RDX, що не розчинні (або,

принаймні, майже не розчинні) в воді, доводиться використовувати інші розчинники. Більшість вибухових речовин розчиняються в таких розчинниках як метиленхлорид, метиловий спирт, ацетон або толуол. Слід мати на увазі, що для цього процесу потрібна велика кількість розчинника. Тому необхідно передбачити будівництво великих об'єктів для рекуперації та зберігання розчинника. Вимивання за допомогою розчинника дозволяє налагодити повторне використання вибухового матеріалу. Цей метод має ту перевагу, що забезпечує реутилізацію дорогої військової вибухівки. Застосуємо при необхідності розпорядження невеликих партій боєприпасів. Метод вимивання за допомогою розчинників може також використовуватися для очищення металевих частин боєприпасів від залишків вибухівки, наприклад, снарядів, які пройшли розпорядження шляхом виплавлення вибухової наповнювача. Розчинник дозволяє прибрати тонкий шар вибухівки, залишився на внутрішніх стінках корпусу після виплавлення вибухівки.

Ця технологія вимагає вжиття належних заходів обережності. Випаровування деяких розчинників створює високий тиск і їх пари можуть утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям, в той час як інші розчинники можуть бути небезпечні для людей в силу своєї токсичності (толуол, метиленхлорид).

### 1.3 Аналіз технологій утилізації

Аналіз сучасного стану утилізації боєприпасів в Україні показав, що ця сфера промисловості відійшла на задній план і не розвивається належним чином. У зв'язку з цим, методи та технічне обладнання застаріли і не відповідають критеріям ефективності, безпеки та екологічності процесу роззброєння боєприпасів.[10, 11]

Керуючись викладеним вище матеріалом, було обрано декілька методів, а саме комбінацію системи гідроабразивного різання та вимивання водяним струменем. Дані технології демілітаризації, після деяких допрацювань та модернізацій технічного обладнання, найбільше, з представлених, підходять для виконання поставлених задач утилізації снарядів та технічних засобів їх здійснення, так як можуть забезпечити високі показники таких критеріїв, які описані в завданнях утилізації. Сутність методу полягає в розтині боєприпасів шляхом вирізання фрагмента корпусу і подальшому розмиванні заряду вибухової речовини з відкритої поверхні, що утворилася, струменем води високого тиску. Також цей метод дозволяє вирішувати широкий спектр завдань з утилізації боєприпасів різного призначення і забезпечувати екологічну чистоту розроблених на його основі технологічних процесів

## 1.4 Технологічний процес вилучення бойового заряду

Технологічний процес демілітаризації боєприпасу виглядає наступним чином.

Перед тим, як вилучити вибухову речовину зі снаряду, потрібно провести попередню обробку, пов'язану з вилученням детонуючих елементів.

Видалення підривника з корпусу боєприпасу здійснюють:

- вигвинчуванням його з корпусу засобами механізації або автоматизації;
- відділенням вбудованих детонаторів;
- застосуванням ультразвукових або гідродинамічних різаків;
- звичайною механічною різкою на верстатах.[2]

Після проходження попередніх етапів роззброєння, а саме вилучення підривника та всього, що з ним пов'язане, боєприпас за допомогою робота чи іншого пристрою, потрапляє до установки, за допомогою якої і відбувається утилізація.

Розтин корпусу боєприпасу для отримання доступу до ВР здійснюється способом гідрорізання, при якому корпус розкривається за допомогою струменя води високого тиску.

Різання корпусу проводиться з використанням в якості основного технологічного устаткування насосної установки агрегату високого тиску (АВТ).

Проведені експерименти дозволили зробити висновок про те, що при впливі на заряд ВР високошвидкісним струменем, діаметром до 2,0 мм, вибухового перетворення не виникає до тиску 1600 МПа при швидкості струменю 1800 м/с.

Діапазон швидкостей різання при товщині корпусу 1-6мм, повинен становити приблизно 5-250 мм/хв.[3]

Вилучення ВР з камори боєприпасу здійснюється способом гідровимивання, при якому ВР вилучається за допомогою струменя води високого тиску.

Процес гідровимивання ВР проводиться за допомогою встановлення значення робочого тиску до 60 МПа і витрати води до 65 л/хв, що забезпечує температуру водної суспензії ВР на рівні 25°C, але вимагає використання потужної системи очищення води із замкнутим водооборотом.[11]

Суттєвий вплив на ефективність вимивання здійснює конструкція вимиваючих сопел і головок. При використанні соплових головок, які формують звичайні (некавітаційні) струмені, при швидкості відносного переміщення соплового вузла 1-5 мм/с досягається максимальна продуктивність вимивання.

У нижній частині модуля встановлюють збірник водної суспензії ВР, що представляє собою ємність з роздільними сітками під різні фракції продукту. Збірник пов'язаний трубопроводом з пневмонасосом, який призначений для перекачування суспензії «вода – ВР» в блок очищення води.

Після того, як закінчили вимивання, корпус снаряду за допомогою роботи чи іншого пристрою потрапляє до відведеного для корпусів місця.



## 1.5 Постановка завдань дослідження

Предметом дослідження буде система керування процесом утилізації боєприпасів, так як це основна складова всього процесу. До системи керування відносять управління розрізанням, вимиванням, фільтрацією води та збору ВР для подальшої переробки, а також підтримки певного тиску та температури води.

На підставі вищевикладеного матеріалу, сформуємо наступні завдання дослідження:

Завдання 1. Ідентифікувати об'єкт керування та визначити його недопрацювання.

Завдання 2. Промодельювати електропривід на базі КД в динамічних режимах роботи.

Завдання 3. Проаналізувати отриману імітаційну модель в режимі робочого ходу, та визначити прийнятні для реального об'єкту параметри.

Завдання 4. Дослідити на реальному об'єкті адекватність розробленої імітаційної моделі.

## РОЗДІЛ 2

### ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

З метою побудови системи керування проводимо огляд раніше розробленої установки утилізації боєприпасів.

#### 2.1 Огляд раніше розробленого рішення

У результаті проведених раніше досліджень, була розроблена установка утилізації боєприпасів, в основі якої лежать методи гідророзривання металевого корпусу, та вимивання вибухової речовини звідти.

Насамперед розглянемо технологічну схему установки утилізації (рис. 2.1).

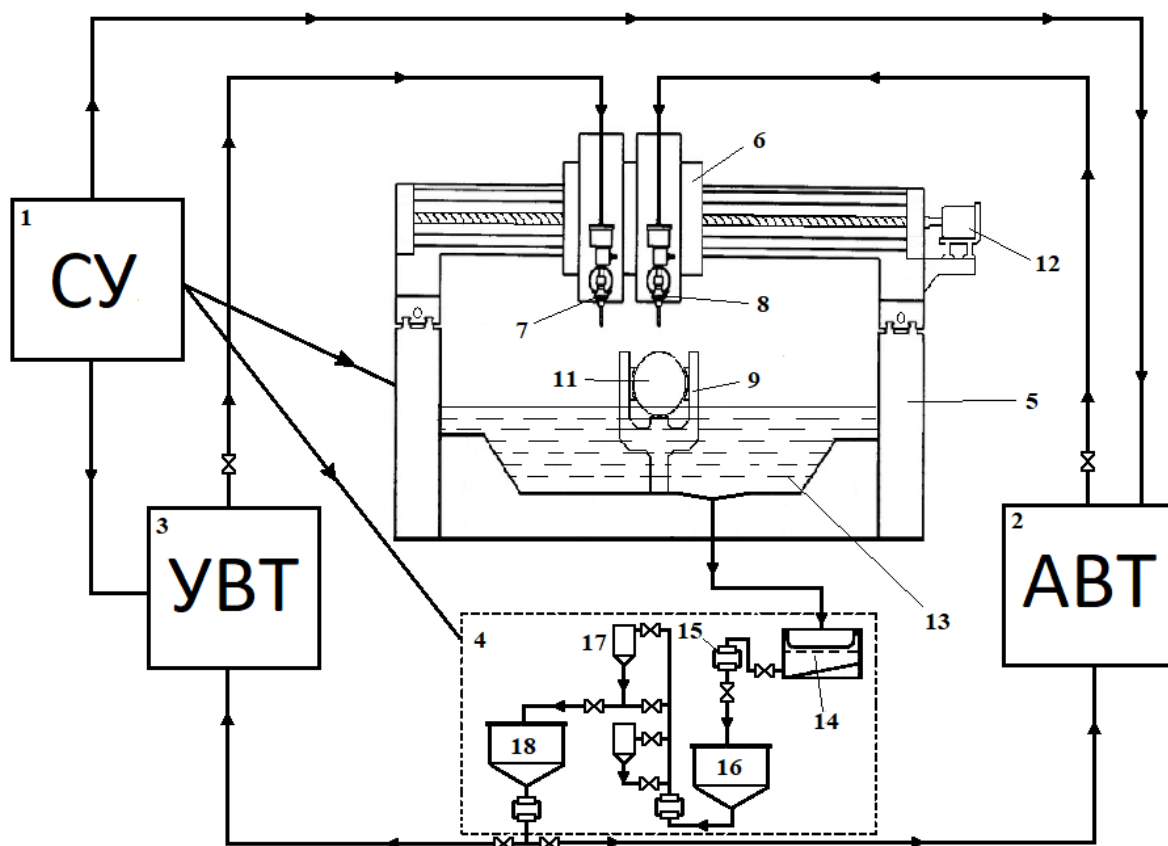


Рисунок 2.1 – Технологічна схема установки утилізації боєприпасів – гідрорізка корпусів в поєднанні з гідровимиванням

На схемі зображені наступні елементи установки: 1 – система керування; 2 – агрегат високого тиску; 3 – АВТ; 4 – система водообороту; 5 – установка утилізації; 6 – каретка, на якій розміщені інструменти обробки боєприпасу; 7 – головка вимивача; 8 – головка гідрорізака; 9 – пристрій затискання виробу; 11 – боєприпас; 12 – привід переміщення каретки по вісі Y; 13 – ємність, в якій збирається водяна суспензія; 14 – ємність з фільтром; 15 – пневматичний насос; 16 – ємність з відпрацьованою водою; 17 – фільтри тонкої очистки; 18 – ємність з чистою водою.

Установка утилізації включає в себе універсальну установку розмивання **5** в комплекті з насосними установками **2** – АВТ і **3** – УВТ, а також систему очищення технологічної води із замкнутим водооборотом **4**. Крім того, ділянка оснащена комплексною системою управління технологічним процесом **1**, що дозволяє дистанційно проводити гідрорзання і вимивання ВР за заданими програмами.

Установка розмивання складається з самої рами **5**, приводу обертання боєприпасу, приводу переміщення П-подібної рами по вісі X, приводу переміщення каретки з головками по вісі Y – **12**, приводу переміщення головок по вісь Z, головок гідрорізання **8** і вимивання **7**, пристрою для затискання виробу **9** і ємності для збирання водяної суспензії ВР – **13**.

Система очищення води **4** містить ємність з фільтром **14**, де відокремлюється основна маса вимитого ВР. Після фільтру забруднена вода пневматичним насосом **15** подається в ємність для відпрацьованої води **16**, в якій вона збирається і охолоджується. Далі вода очищається на фільтрах тонкої очистки **17** і збирається в ємності для чистої води **18**, звідки повертається в технологічний цикл.[6]

Технологічний процес вилучення ВР здійснюється наступним чином. Боєприпаси надходять на спецділянку, де здійснюються підготовчі та контрольні операції, після чого вони подаються на установку розмивання, де фіксуються пристроєм для затискання **9**. Розтин корпусу здійснюється завдяки переміщенню

головки гідрорізака **8**, яка дистанційно управляється СУ **1**, а розмивання ВР здійснюються в результаті переміщення головки **7**. Вимите ВР, відокремлене від води на фільтрі **14**, періодично вивантажується з нього і передається на подальшу переробку. Корпуси після контролю направляються для обробки в металобрухт. Екологічна чистота процесу забезпечується системою очищення води **4**.

Різання корпусу проводиться з використанням в якості основного технологічного устаткування насосної установки агрегату високого тиску (АВТ).

Основними технічними характеристиками даної насосної установки є:

- робочий тиск до 400,0 МПа;
- витрати води до 2,5 л/хв.

Діапазон швидкостей різання при товщині корпусу 1-6мм становить 5-250 мм/хв. Процес гідророзрізання ВР проводиться за допомогою встановлення значення робочого тиску до 60 МПа і витрати води до 65 л/хв, що забезпечує температуру водної суспензії ВР на рівні 25°C.

Суттєвий вплив на ефективність розрізання здійснює конструкція вимиваючих сопел і головок. При використанні соплових головок, які формують звичайні (некавітаційні) струмені, при швидкості відносного переміщення соплового вузла 1-5 мм/с досягається максимальна продуктивність розрізання.

Отримання високошвидкісного струменю забезпечується агрегатом високого тиску (АВТ) за рахунок стиснення води до необхідного тиску.

В основі роботи АВТ лежить універсальна гідравлічна схема (рис. 2.2), де в якості підсилювача тиску використовується спеціальний мультиплікатор двосторонньої дії, принцип роботи якого заснований на мультиплікації тиску за рахунок різниці площ масляного поршня і водяного плунжера. Альтернативним варіантом підсилювача тиску є насоси прямої дії, поршні якого встановлені на колінвалу механізму привода насоса.

Необхідний тиск досягається при відповідній швидкості обертання двигуна насосу АВТ.

Для забезпечення зазначеного тиску вимивання використовується УВТ 4/630 (рис. 2.3).

Характеризується універсальністю застосування, економічністю надійністю, ремонтпридатністю, екологічною чистотою, а також простотою і безпекою обслуговування. Установка виготовляється в звичайному і підризовзахисному виконаннях.

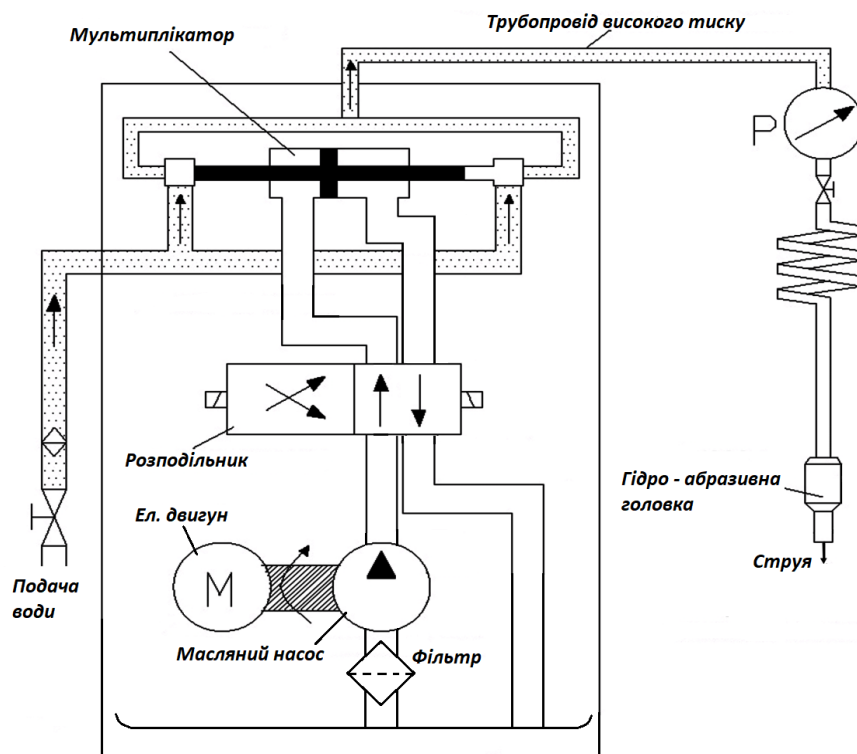


Рисунок 2.2 – Схема АВТ

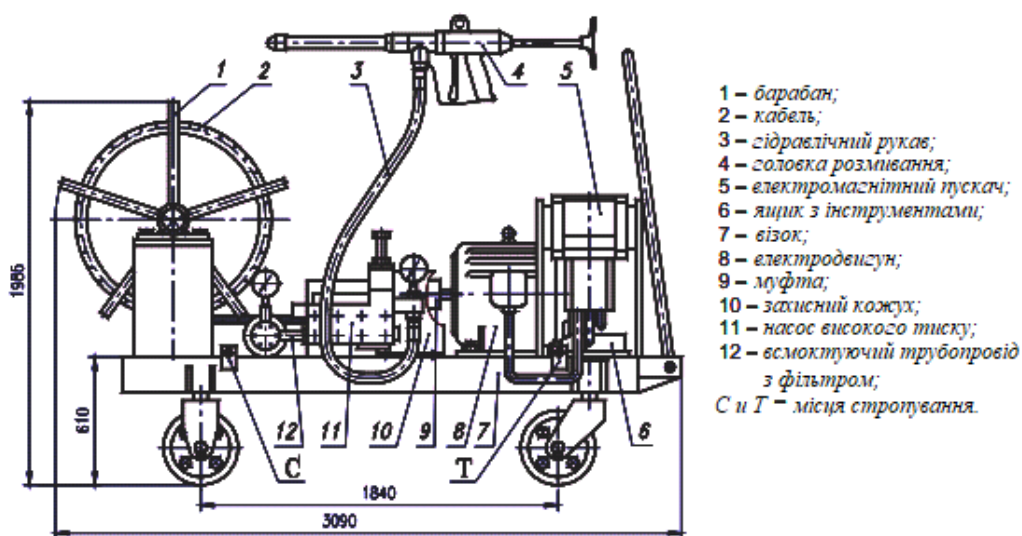


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд УВТ 4/630

### Технічні характеристики:

➤ Продуктивність насоса, куб.м/год	1,5-4;
➤ Тиск робочої рідини, МПа (кгс/кв. см)	не більше 63 (630);
➤ Підпір на всмоктуванні, (Мпа/кв. см)	0,1-0,3 (1,0-3,0);
➤ Електродвигун:	
❖ Потужність, кВт	90;
❖ Частота обертання, об/хв	1500;
➤ Довжина напірного рукава, м	15;
➤ Довжина електрокабелю, м	15;
➤ Габарити:	
❖ Довжина, мм	4175;
❖ Ширина, мм	1710;
❖ Висота, мм	1985;
❖ Вага, кг	2050.

Вимивання ВР струменем води високого тиску дозволяє витягувати як плавкі, так і неплавкі композиції розривних зарядів при розпорядженні боєприпасів, що мають складну внутрішню конструкцію. Так, для отримання гексогеновмісних і інших штатних ВР з корпусів артилерійських боєприпасів середнього калібру (100-152 мм), що підлягають утилізації, застосовують установки модульного типу для вимивання ВР струменем високого тиску, що забезпечують безпеку і екологічну чистоту технологічного процесу. Кожна установка працює спільно з блоком очищення технологічної води.[6]

Головки різання і вимивання, змонтована на П-подібній рамі та містить обертовий механізм фіксації снарядів. Струмінь для вимивання ВР подається з УВТ в соплову головку під тиском 60 МПа. Соплові головки закріплені на штангах, які пов'язані гнучким трубопроводом з гідростанцією і можуть переміщатися за допомогою електромеханічних двигунів з вбудованими давачами положення.[6,8]

У нижній частині установки встановлено збірник водної суспензії ВР, що представляє собою ємність з роздільними сітками під різні фракції продукту.

Збірник пов'язаний трубопроводом з пневмонасосом, який призначений для перекачування суспензії «вода – ВР» в блок очищення води.

Головною особливістю функціонування обладнання є управління точністю позиціонування каретки, на якій знаходяться головки розрізання та розмивання. Цю точність забезпечує гібридний кроковий двигун, кут кроку –  $1.8^\circ$ , великий момент – до 12 Н·м і велика швидкість обертання. Гібридні двигуни поєднують в собі кращі риси двигунів зі змінним магнітним опором і двигунів з постійними магнітами. Інкрементальний енкодер, роздільна здатність якого 1024 імпульси оберт забезпечує зворотній зв'язок за положенням ротора в просторі, а отже перерахувавши кількість імпульсів в відстань пройдену кареткою, знайдемо і положення каретки в просторі.

Загальна функціональна схема автоматизації установки утилізації боєприпасів наведена в додатку А.

Рішення наведене у цьому підрозділі задовольняє майже всі необхідні поставлені вимоги, але є над чим попрацювати. Насамперед виноситься питання безпеки робочого процесу для персоналу, що залежить від точності позиціонування розрізаючої головки, адже один неточний рух може спричинити невіправні наслідки. Також, огляд установки утилізації показав, що на ряд значущих питань, таких як синхронізація процесів утилізації, захист від агресивного середовища з підвищеною вологою в повітрі, вибухозахист приділили мало уваги, або взагалі не приділили.

## 2.2 Методи вирішення виявлених недопрацювань

### 2.2.1 Точність позиціонування

Насамперед мова йде про точність позиціонування інструменту обробки. Тому, що у кожного боєприпаса є своя, як небезпечна, так і безпечна особлива зона, небажаний вплив на яку, може закінчитися дуже прикро. Отже, потрібно досягнути необхідної точності переміщення каретки, на якій розміщені інструменти для обробки боєприпасу, а саме розрізаюча та вимиваюча головки, для того, щоб працювати саме в тій площині, наприклад артилерійського снаряду, яка являється безпечною до зовнішніх впливів, та не зачіпити через недостатню точність іншу, небезпечну зону.

На основі оцінки попередніх експериментів точності та динамічних характеристик двигуна, було виявлено, що крутного моменту двигуна недостатньо для виконання поставлених завдань переміщення, так як відбувалося таке явище, як пропуск кроків. Тому було розраховано необхідний момент на переміщення каретки та обрано наступний за номіналом двигун.

Перед тим, як випробувати його на справі, потрібно промоделювати його в динамічних режимах, та обрати оптимальну частоту комутації. Так як, кожен кроковий двигун має свою динаміку, і для різного навантаження має різні характеристики, об'єктом дослідження буде електропривід на базі крокового двигуна. Виходячи з науково – технічної точки зору, це буде точність позиціонування каретки з розрізаючою та вимиваючою головками на основі динамічних характеристик. Це постає найважливішим завданням на сьогодні в даній промисловості, оскільки на цій установці буде утилізуватися велика різноманітність боєприпасів і потрібно враховувати особливості розрізання кожного з видів.



### 2.2.2 Синхронізація процесу розмивання

Так як процес дуже небезпечний, потрібно дотримуватися певної послідовності операцій при виконанні тих чи інших дій з боєприпасом.

Тобто, якщо боєприпас ще не знаходиться у пристрої затискання виробу, ніяких дій не повинно виникнути. Тільки тоді, коли боєприпас знаходиться на своєму місці, дозволяється рух каретки з інструментами в область обробки.

Тільки після виконання попередніх умов, дозволяється виконувати операцію розрізання корпусу. Поки не закінчений цей процес, ні в якому разі не повинен початися ніякий наступний.

Вимивання вибухової речовини починається лише після розрізання боєприпасу.

Після проведення демілітаризації виробу, дозволяється послабити пристрій затискання і зробити заміну роззброєного снаряду на новий.

Данна синхронізація забезпечується лише давачами положення, ала це не досить безпечно, так як можуть бути непередбачувані обставини, і в контролері цей процес буде зроблений, а на справі – ні. Тому, пропонується доповнити систему машинним зором. Завдяки цьому, система при певній конфігурації буде отримувати сигнали, не тільки від давачів. Це забезпечить високу безпеку процесу, так як не буде розпочатих зайвих операцій, без погодження на це від штучного інтелекту.

### 2.2.3 Вибухозахист

Джерелом ініціювання вибуху є розчинена у воді та в деяких кількостях у повітрі вибухова речовина, тому виробництво відноситься до зони класу В-1.

За класифікацією геометричних розмірів класу зони, маємо зону 0.

Тому потрібно якнайкраще захистити середовище, від впливу електрообладнання, яке може іскрити, для цього будемо використовувати іскробезпечне електричне коло з рівнем вибухозахисту Exi – електрообладнання.

Попередження утворення вибухонебезпечного середовища і забезпечення в повітрі виробничих приміщень змісту вибухонебезпечних речовин, що не перевищує нижньої концентраційної межі займання з урахуванням коефіцієнта безпеки, досягнуто застосуванням робочої та аварійної вентиляції для контролю складу повітряного середовища і відкладень вибухонебезпечного пилу та видаленням з вибухонебезпечного середовища фідфільтрованої від води вибухової речовини, здатної привести до утворення вибуху;

Кімната, в якій відбувається процес утилізації, має бути стійкою до вибуху, а саме стіни, стеля, підлога мають бути розраховані та витримувати ударну хвилю вибуху 152-мм артилерійського снаряду.

З метою захисту персоналу, використовується віддалене керування установкою, а стеження за процесом відбувається за допомогою SCADA та відеомоніторингу.

## 2.2.4 Захист від агресивних середовищ

Для обладнання, яке використовується у середовищі з підвищеною вологістю, потрібно розробити методи захисту від корозії.

Так як виробництво вибухонебезпечне, то активні методи захисту розглядати не будемо.

Одним з найбільш поширеного пасивного захисту металів, є органічні покриття у вигляді фарб, ґрунтовок, смол. Також існує захист заліза від корозії покриттями з інших металів.

Сама установка утилізація боєприпасів має такі аспекти, при яких недоцільно використовувати органічні покриття. Тому для захисту рами та всіх металічних елементів лишається метод покриттями з інших металів, наприклад корозійностійким покриттям сріблом, міддю, нікелем, хромом і свинцем.

Ефективними є комбіновані покриття, що представляють собою системи плівок (металевих і неметалевих), що включають один або кілька шарів, компонентів або фаз. Будемо використовувати поліметалічні покриття, у вигляді мідь – нікель – хром. Це забезпечить довготривале використання елементів установки та підвищить ефективність виробництва.

Також на установці потрібно захистити елементи конструкції позиціонування, такі як черв'ячна передача, роликові рейки та каретки, вплив вологи на які, може спричинити механічне заклинювання та інше. Застосування різного роду інгібіторів корозії, які в невеликих кількостях вводяться в агресивне середовище і створюють на поверхні металу адсорбційну плівку дозволить вирішити це завдання. Також розробити захисні кожухи, від прямого попадання води на такі елементи.

Для захисту всієї електротехніки, а саме давачів, електродвигунів, пенелей управління, та шаф управління використовуємо обладнання, яке передбачає ступінь захисту IP 68. Для обладнання, яке не має такого захисту, має бути передбачений додатковий захист від зовнішнього впливу середовища.

### 2.2.5 Підвищення ефективності виробництва

Підвищення ефективності утилізації можна досягти методом збільшення кількості роззброюваних боєприпасів в установці. Модернізована установка утилізації зображена на рисунку 2.4.

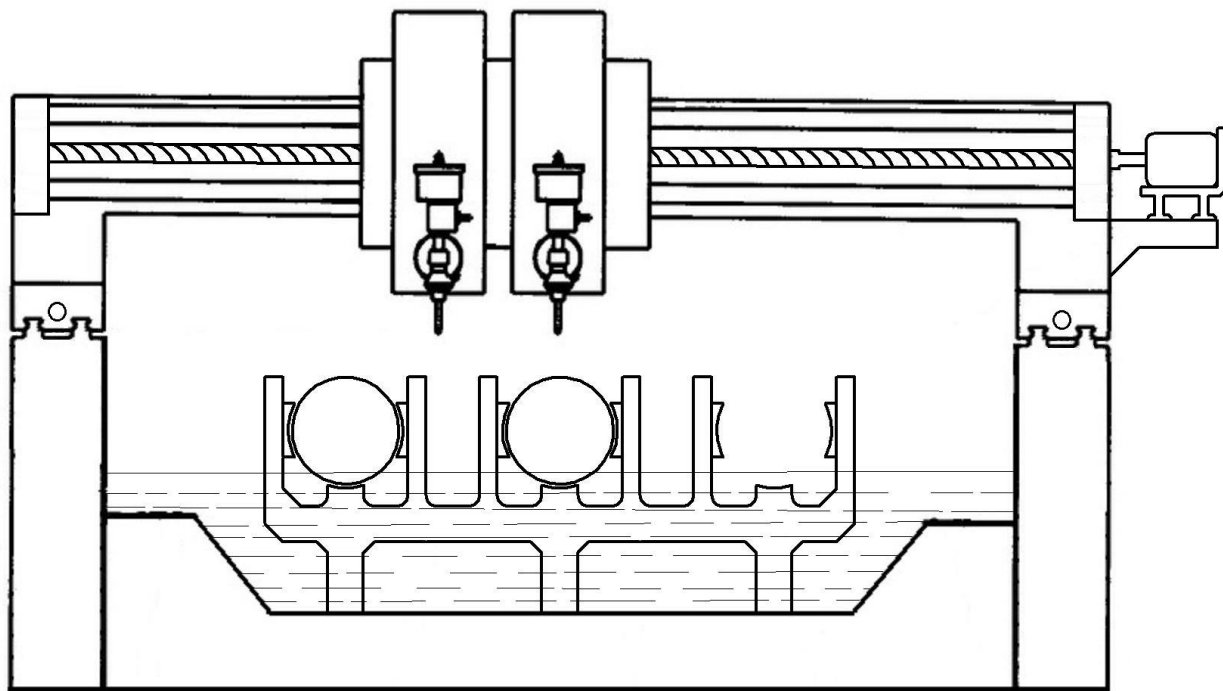


Рисунок 2.4 – Модернізована установка утилізації

Технологічний процес вилучення ВР такий:

- За допомогою робота чи іншого пристрою, заповнюються порожні пристрої затискання виробу боєприпасами.
- Починається утилізація з першого боєприпасу;
- Після того, як перший було роззброєно, установка переходить до наступного за чергою. В той же час, робот чи інший пристрій переміщує залишки у відповідне місце та доставляє новий боєприпас до вільного місця.

Таким чином, час простою лінії утилізації було мінімізовано, тим самим підвищуючи ефективність виробництва.

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ КД В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Під час проектування системи управління виникає багато питань з підбору обладнання, для виконання певних задач автоматизації. В більшості випадків розрахунки та заявлені характеристики обладнання перевищені або недостатні, тоді вирішення поставлених задач виконується за допомогою моделювання. Оскільки аналітичний метод обчислення займає багато часу та ресурсів, доцільним та практичним рішенням буде моделювання крокового двигуна в динамічних режимах, що дозволяє отримати необхідні параметри.

#### **3.1. Допущення, прийняті при моделюванні крокових електродвигунів.**

При математичному описі моделей крокових електроприводів весь час приймається загальноприйнятий ряд припущень з теорії електричних машин. Ці припущення дозволяють замість реальної машини з достатньою необхідною в рамках розглянутих умов точністю досліджувати ідеалізовану [13, 14, 15].

1. Магнітну проникність сердечників статора і ротора приймаємо рівній нескінченності, це дозволяє дійсно однозначно визначати картину поля від струму кожної обмотки і використовувати принцип накладення для визначення результуючого поля в зазорах при одночасній дії струмів у всіх обмотках електричної машини. Це має на увазі, що ідеалізована машина при цьому приймається насиченою, а залежність між струмом електричних контурів і потокозчеплення приймається лінійною. Насичення тут враховується тільки побічно в залежності від вибору індуктивних параметрів.

2. Слід приймати розподіл полів взаємоіндукцією обмоток статора і ротора, і полів самоіндукції трифазних обмоток уздовж окружності електричної машини синусоїдальним, з просторовим напівперіодом, який дорівнює полюсному

поділу. Виходить, що в розрахунок йде лише перша гармоніка в зазначених полях і вплив зубцевих полів в зазорі не враховується. Ці поля обумовлюються зубчатостю статора і ротора, і наявністю вищих субгармонік поля, що викликаються відповідними гармоніками магніторушійною силою обмоток. Підставою для цього припущення є здатність трифазної обмотки «фільтрувати» вищі гармоніки поля в зазорах. У нормально спроектованій машині вдається отримати вищі гармоніки ЕРС, обумовлені рядом вищих гармонік поля, вельми і вельми малої амплітуди. Магнітні поля тих вищих гармонік трифазних обмоток, які індукують ЕРС основної частоти, відносять до полів розсіювання цих обмоток. Тим самим мається на увазі також нехтування участі вищих гармонік у формуванні електромагнітного моменту.

3. Магнітопровід і обмотки приймаються симетричними, тобто магнітопровід має однакові обриси на всіх полюсних розподілах, а в межах полюсного поділу симетричний щодо поздовжніх і поперечних осей. Це означає, що всі фазні обмотки мають однакове число витків, активні опори і взаємний зсув магнітних осей, а розподілені уздовж окружності ротора демпферні обмотки можуть бути представлені зосередженими короткозамкненими контурами в поздовжніх і поперечних осях ротора. Звідси випливає, що досить розглянути процеси в двополюсній машині, тому що фізичні процеси, що протікають в ній і в багатопольсній машині, виявляються повністю еквівалентними. Тому ідеалізована машина приймається двополюсною [13].

4. Для правильного і однозначного математичного опису процесів, що відбуваються в крокових електроприводах, необхідно задатися системою координат, а також позитивними напрямками струмів, обертання ротора і векторів МДС [13].

### 3.2. Математична модель крокового електроприводу в динамічних режимах роботи.

Дослідження динамічних режимів роботи крокового електроприводу встановленого на вісь X установки утилізації боєприпасів доцільно проводити на основі математичного моделювання роботи даного електроприводу. Тому ставиться завдання розгляду математичної моделі крокового електродвигуна, яка дозволяє розглядати його функціонування в динаміці. Розглянемо структурну схему крокового електроприводу осі X, приведену на малюнку 3.1



Рисунок 3.1 – Структурна схема крокового електроприводу осі X

Електропривід (ЕП) складається з системи керування (СК), інвертора напруги і крокового двигуна (КД). Робота електроприводу здійснюється внаслідок надходження сигналів, які відповідно до заданого положення каретки видаються програмою керування СК. Останній формує поточне завдання на керування інвертором (напруга  $g$ ). Інвертор здійснює комутацію транзисторів, забезпечуючи почергове живлення фаз аж до досягнення необхідного положення каретки, на якій розташовані інструменти для обробки боєприпасу.

Для опису динамічних режимів роботи КД складаються рівняння електричної рівноваги для напруг контурів струму, рівняння моментів, що діють на ротор, а також рівняння електромеханічного перетворення енергії (основне рівняння руху ЕП) для даного типу електричної машини.

Схема заміщення обмотки КД являє собою послідовне з'єднання індуктивності та резистора. Крім того, при обертанні ротора в обмотці виникає ЕРС [15]. Отже, еквівалентна схема заміщення КД має вигляд:

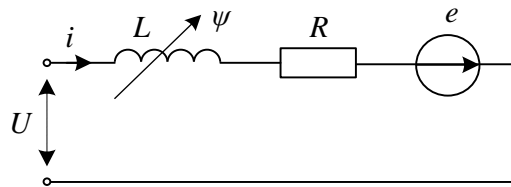


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема заміщення обмотки КД

Для опису динамічних режимів роботи крокового двигуна необхідно скласти рівняння електричної рівноваги для напружень контурів струму, рівняння моментів, що діють на ротор, а також рівняння електро механічного перетворення енергії (основне рівняння руху ЕП) для даного типу приводу.

Тоді виходячи із законів Кірхгофа маючи схему заміщення (рисунок 3.2), запишемо рівняння електричної рівноваги напруг і ЕДС обмоток статора КД:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_s \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + W \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{d\psi_{M1}}{dt}; \\ u_2 &= R_s \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + W \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{d\psi_{M2}}{dt}; \end{aligned} \quad (3.1)$$

Де:  $u_1, u_2$  – напруга прикладена до обмоток фаз;  $i_1, i_2$  – струми фаз протікають по обмотках статора;  $R_s$  – активний опір обмотки статора;

$\psi_{M1} = \psi_M \cdot \sin p\Theta$ ,  $\psi_{M2} = \psi_M \cdot \sin p(\Theta - \lambda)$  – потокозчеплення фаз;

$\psi_M$  - максимальне значення потокозчеплення;  $\lambda$  - кут кроку полюсів  $p$ ;  $\Theta$  - кут положення ротора.

$L_1 = L_0 + L \cos 2p\Theta$  – індуктивність 1 фази;

$L_2 = L_0 + L \cos 2p(\Theta - \lambda)$  – індуктивність 2 фази;

Для випадку електричної машини, що обертається, залежність механічної енергії від електро механічного моменту при зміні положення ротора записується [13]:

$$W = M \cdot \Delta\Theta = M \cos 2p(\Theta - \lambda)$$

Де:  $M$  – електро механічний момент двигуна, що формується фазою;  $W$  – механічна енергія, яка формується фазою на інтервалі кута повороту ротора  $\Delta\theta$ , де  $\theta$  – кут положення ротора в радіанах.



Перетворимо рівняння (3.1), перепишем доданок  $\frac{d\psi}{dt}$  електричної рівноваги для обмотки:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi(i, \theta)}{dt} = \frac{\partial\Psi(i, \theta)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Psi(i, \theta)}{\partial \alpha} \frac{d\theta}{dt} = L(i, \theta) \frac{di}{dt} + W(i, \theta) \cdot \frac{d\theta}{dt} = L(i, \theta) \frac{di}{dt} + K_{\omega} \cdot \omega,$$

де  $L(i, \theta) = \frac{d\psi(i, \theta)}{di}$  – диференціальна індуктивність фази;

$K_{\omega} = \frac{d\psi(i, \theta)}{d\alpha}$  – коефіцієнт ЕРС;

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$  – кутова частота обертання ротора.

Рівняння електричної рівноваги фаз (3.1) в матричній формі набуде вигляду:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_1 + \Psi_{M1} \\ \Psi_2 + \Psi_{M2} \end{bmatrix}$$

Потокозчеплення трьох фаз першої секції в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1(i_1, \theta) & 0 \\ 0 & L_2(i_2, \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} K_{\omega}(i_2, \theta) & 0 \\ 0 & K_{\omega}(i_1, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{M1} \\ \Psi_{M2} \end{bmatrix}$$

Рівняння рівноваги напруг в матричній формі з урахуванням потокозчеплення:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1(i_1, \theta) & 0 \\ 0 & L_2(i_2, \theta) \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} K_{\omega}(i_2, \theta) & 0 \\ 0 & K_{\omega}(i_1, \theta) \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{M1} \\ \Psi_{M2} \end{bmatrix}$$

Матричні рівняння рівноваги напруг у фазах КД в нормальній формі Коші мають вигляд (3.2):

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \{ [u_1] - [R_s][i_1] - \omega[K_{\omega 2}] - [\Psi_{M1}] \}, \quad (3.2)$$

$$\frac{d[i_2]}{dt} = [L_2]^{-1} \{ [u_2] - [R_s][i_2] - \omega[K_{\omega 1}] - [\Psi_{M2}] \},$$

Де:  $[i_1], [i_2]$  – матриці невідомих (струми статора);  $[u_1], [u_2]$  – матриці напруг;  $[R_s]$  – матриця активних опорів;  $[L_1], [L_2]$  – прямі матриці диференціальних індуктивностей в функції фазних струмів і поточного положення ротора;  $[K_{\omega 1}], [K_{\omega 2}]$  – матриці коефіцієнтів проти-ЕРС в функції фазних струмів і поточного положення ротора;  $\omega$  – частота обертання ротора,  $[\Psi_{M1}], [\Psi_{M2}]$  – максимальне значення потокозчеплення створюване постійним магнітом [12]:.

Електромагнітний момент, створюваний обмотками фаз статора:

$$M_{\text{э}} = -\Psi_M \cdot i_1 \cdot \sin p\theta - \Psi_M \cdot i_2 \cdot \sin p(\theta - \lambda)$$

Рівняння руху електроприводу з урахуванням моментів діючих на ротор:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_{\Sigma}} (M_{\text{э}} - M_c), \quad (3.3)$$

де:  $J_{\Sigma} = J_p + J_H$  – сумарний момент інерції електроприводу приведений до валу ротора;  $p$  – число пар полюсів;  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  – частота обертів;  $M_c = M_H + M_T + M_{\Pi}$  – сумарний момент опору двигуна;  $M_H$  – момент опору навантаження,  $M_T = D \cdot \frac{d\theta}{dt}$  – момент опору в'язкого тертя (де  $D$  – коефіцієнт в'язкого тертя),  $M_{\Pi}$  – момент тертя ковзання в підшипниках.

Тоді система рівнянь математичної моделі крокового електроприводу в динамічному режимі (3.4) може бути записана на основі виразів (3.1), (3.2), (3.3):

$$\begin{cases} \frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \{ [u_1] - [R_s][i_1] - \omega[K_{\omega 2}] - [\Psi_{M1}] \}, \\ \frac{d[i_2]}{dt} = [L_2]^{-1} \{ [u_2] - [R_s][i_2] - \omega[K_{\omega 1}] - [\Psi_{M2}] \}, \\ M_{\text{э}} = -\Psi_M \cdot i_1 \cdot \sin p\theta - \Psi_M \cdot i_2 \cdot \sin p(\theta - \lambda), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_{\Sigma}} (M_{\text{э}} - M_c), \\ \theta = p \int_0^t \omega dt = p\lambda; \end{cases} \quad (3.4)$$

Де:  $[i_1], [i_2]$  – матриці невідомих (струми статора);  $[u_1], [u_2]$  – матриці напруг;  $[R_s]$  – матриця активних опорів;  $[L_1], [L_2]$  – прямі матриці диференціальних індуктивностей в функції фазних струмів і поточного положення ротора;  $[K_{\omega 1}], [K_{\omega 2}]$  – матриці коефіцієнтів проти-ЕРС в функції фазних струмів і поточного положення ротора;  $\omega$  – частота обертання ротора;  $[\Psi_{M1}], [\Psi_{M2}]$  – максимальне значення потокозчеплення створюване постійним магнітом,  $M_{\text{э}}$  – електромагнітний момент, створюваний обмотками фаз статора;  $M_c$  – момент опору двигуна;  $J_{\Sigma}$  – сумарний момент інерції ЕП;  $\omega$  – частота обертання ротора;  $\theta, \lambda$  – механічний і електричний кути ДПР;  $p$  – число пар полюсів [14,15]:.

### 3.3 Імітаційна модель крокового електроприводу в динамічних режимах роботи

Приймаючи до уваги наведені вище співвідношення, в стандартній бібліотеці SimPowerSystems пакета MatLab Simulink будується модель електроприводу сканера з керуючим інвертором напруги, що дозволить досліджувати динамічні та стаціонарні режими роботи електроприводу.

Загальний вигляд імітаційної моделі крокового електроприводу однієї координати установки утилізації боєприпасів представлений на рисунку 3.3.

Шаг моделювання визначає точність і час моделювання. Компромісним значенням прийняте значення  $T_s=10^{-6}$  s.

#### Stepper Motor Drive

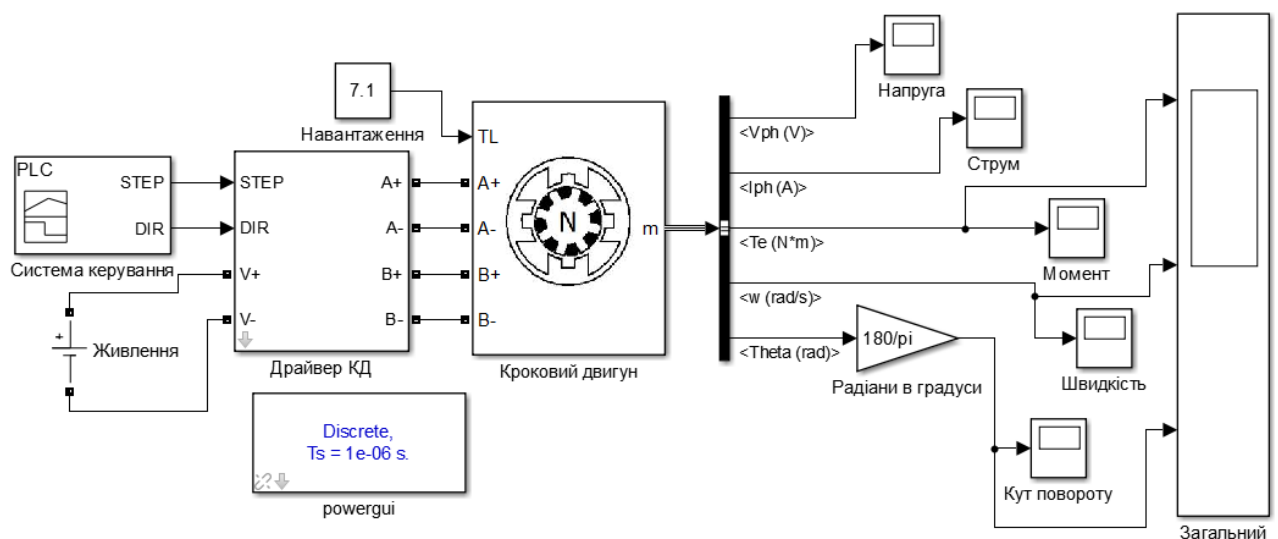


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель одного каналу електропривода

При моделюванні скористаємося явним методом Рунге-Кутта вищого порядку, а саме методом Дормана-Прінса 8-го порядку. У MatLab Simulink це функція ode45. Функція ode45 призначена для чисельного інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь. Вона може бути застосована як для вирішення простих диференціальних рівнянь, так і для моделювання складних динамічних систем. Крок моделювання при такому методі стандартно узятий

рівним  $t = 10^{-6}$ . Детальніше про це можна подивитися в блоці Discrete Powergui, є блоком бібліотеки SimPowerSystems.

При моделюванні буде використаний кроковий гібридний двофазний двигун з бібліотеки SimPowerSystems пакета MatLab Simulink. Для моделювання буде взятий кроковий електродвигун FL110STH150-6504, який ми вибрали у другому розділі. Робоча частота 1000 кроків на секунду. Детальніше всі параметри двигуна наведені на малюнку 3.4.

ModelNo.	Rated Voltage	Current /Phase	Resistance /Phase	Inductance /Phase	Holding Torque	# of Leads	Rotor Inertia	Weight	Detent Torque	Length
Single shaft	V	A	$\Omega$	mH	N.m		g-cm <sup>2</sup>	kg	kg-cm	m m
FL110STH995504A	3.2	5.5	0.58	10.1	11.5	4	5500	5	3	99
FL110STH150-6504A	3.9	6.5	0.6	12.8	22	4	10900	8.4	5.9	150
FL110STH201-8004A	4	8	0.5	11	30	4	16200	11.7	7.5	201

Рисунок 3.4 – Параметри крокового електродвигуна[16]

Block Parameters: Кроковий двигун

Stepper Motor (mask) (link)

Depending on the motor configuration specified by the Motor type parameter, this block models:

- a two or four phases permanent-magnet / hybrid stepper motor,
- a three, four, or five phases variable reluctance stepper motor.

Parameters

Motor type: Permanent-magnet / Hybrid

Number of phases: 2

Winding Inductance (H): 0.0128

Winding resistance (Ohm): 0.6

Step angle (degree): 1.8

Maximum Flux Linkage (Vs): 0.005

Maximum Detent Torque (N.m): 0.57859235

Total inertia (kg.m.m): 10.38e-6

Total friction (kg.m/s): 1e-7\*1000

Initial speed (rad/s): 0

Buttons: OK, Cancel, Help, Apply

Рисунок 3.5 – Задані в модель параметри крокового електродвигуна.

Розрахуємо постійні часу електроприводу за наявними даними:

Електромагнітна постійна часу (3.5):

$$T_{em} = \frac{L}{R_L} = \frac{0,0128}{0,6} = 0,021[c] \quad (3.5)$$

Електромеханічна постійна часу (3.2):

$$T_{mex} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot S_H = \frac{0,00109 \cdot 200}{0,021} \cdot 10^{-6} = 10,38 \cdot 10^{-6}[c]$$

Детальніше зупинимося на пристрої блоку «Кроковий двигун» малюнок 3.6.

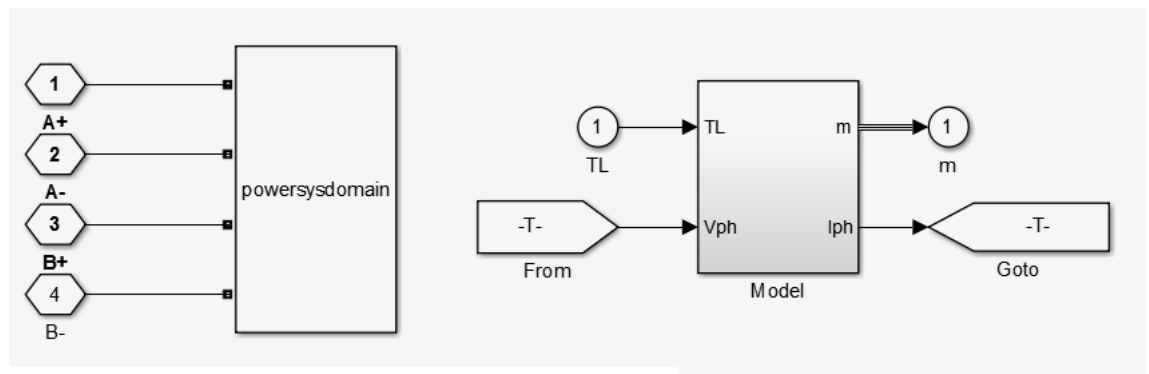


Рисунок 3.6 – Пристрій блоку Hybrid Stepper motor

Тут є стандартний блок бібліотек powersysdomain який дозволяє імітувати комутацію кожної фази до інвертору напруги, і дозволяє економити ресурси обчислювальної техніки за рахунок того, що досить привести модель окремої однієї фази, а для інших фаз цей блок зробить моделювання за аналогією з урахуванням всіх необхідних законів. На малюнку 3.3 приведена модель фаз електродвигуна показано підключення всіх вхідних впливів як це показано на загальному вигляді моделі, а саме напруга живлення, навантаження, показано що в блоці формуються фазні струми і є вихідна змінна  $m$  в якій зібрані всі отримані характеристики для основних вихідних параметрів двигуна. Детальніше пристрій блоку Model Discrete 2 phase Hybrid показано на малюнку 3.7.

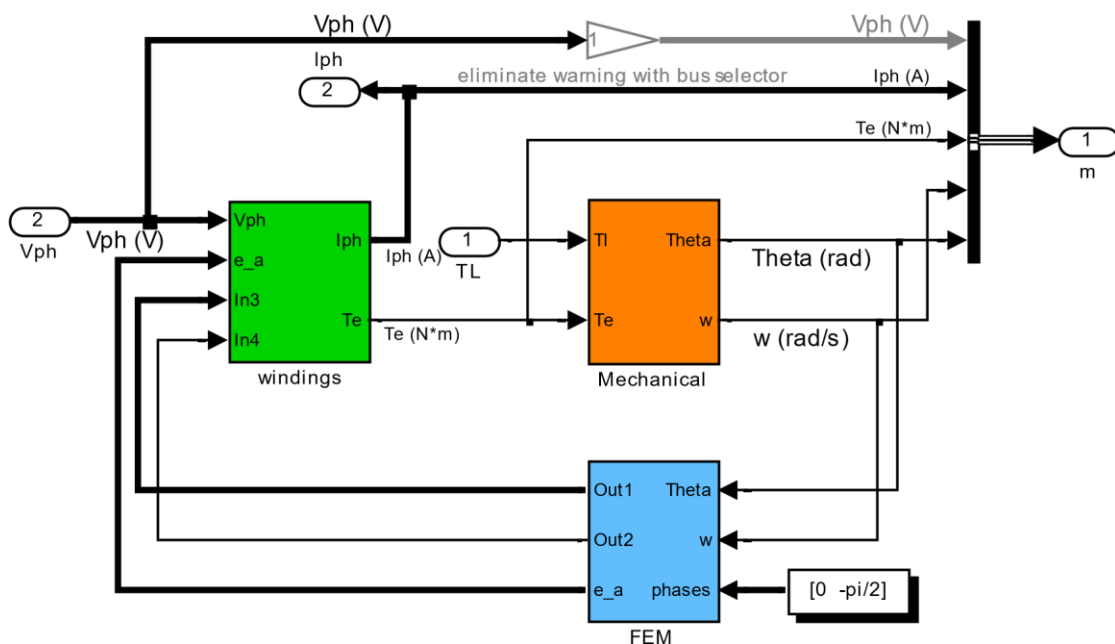


Рисунок 3.7 – Пристрій блоку Model Discrete 2 phase Hybrid

Даний блок складається з трьох основних частин. Тут блок, що імітує обмотки електродвигуна, блок імітує механічне перетворення в двигуні, блок формування протидії ЕРС в залежності від поточного положення ротора. З блоку FEM в блок Windings приходять значення поточної протидії ЕРС, потокозчеплення формованого зубця статора і кута. А також в цей блок приходить напруга живлення. На виході блоку Windings маємо значення фазного струму і поточного електромагнітного моменту. Далі значення моменту приходить на блок Mechanical де він з урахуванням моменту навантаження TL перетворюється в положення і частоту обертання. Далі значення положення і частоти обертання потрапляють в блок FEM де на підставі заданих кутів фаз над ними проводять математичні операції по формуванню керуючих впливів для блоку Windings. Детальніше будова блоку Windings показано на малюнку 3.8.

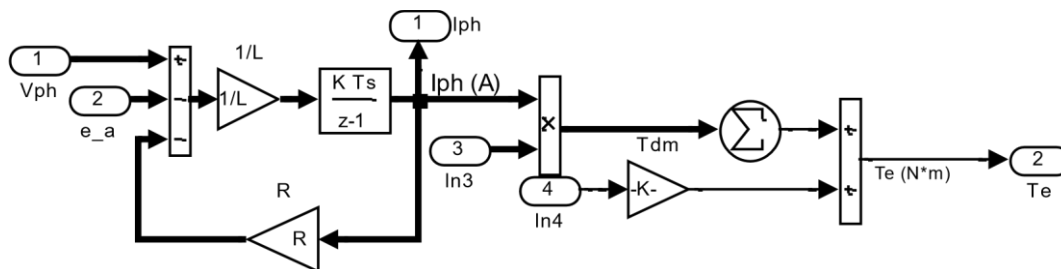


Рисунок 3.8 – Пристрій блоку Windings

Тут ми бачимо поетапне перетворення напруги в купі з ЕРС в фазний струм і його подальший перехід в електромагнітний момент за допомогою даних з блоку FEM, а саме потокозчеплення і значень поточного кута.

Далі докладніше розглянемо блок Mechanical (рисунок 3.9).

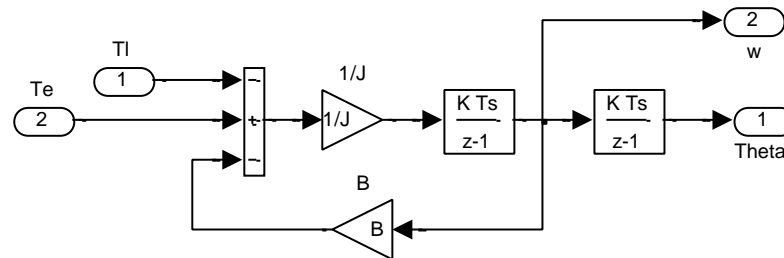


Рисунок 3.9 – Пристрій блоку Mechanical

Тут бачимо реалізацію основного рівняння руху електроприводу. На підставі значень поточного електромагнітного моменту в купі з моментом інерції і коефіцієнтом тертя і моментом навантаження за допомогою інтегрування і подвійного інтегрування відповідно відбувається перехід до частоти обертання і положення. Далі докладніше розглянемо блок FEM (рисунок 3.10).

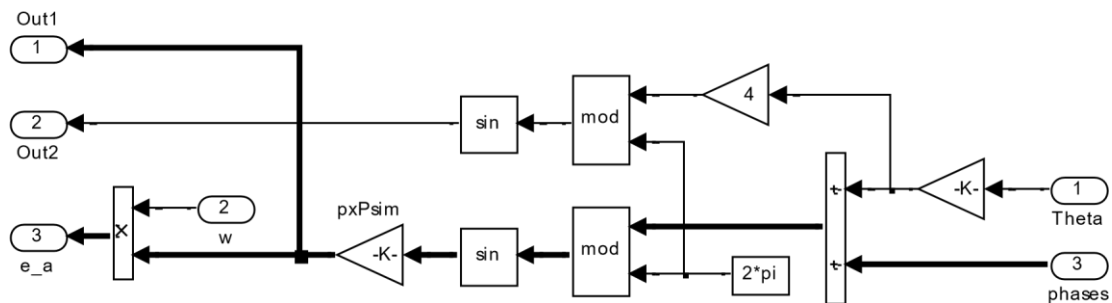


Рисунок 3.10 – Пристрій блоку FEM

В даному блоці відбувається формування розподіл управління за фазами, формується ЕРС і вважається значення по кроках електродвигуна на підставі кутів, положення і частоти обертання.

Далі розглянемо блок Driver, що імітує інвертор напруга і драйвера управління ключами для нього. Зовнішній вигляд внутрішнього устрою блоку Driver з малюнка 3.3, наведено на малюнку 3.11.[17]

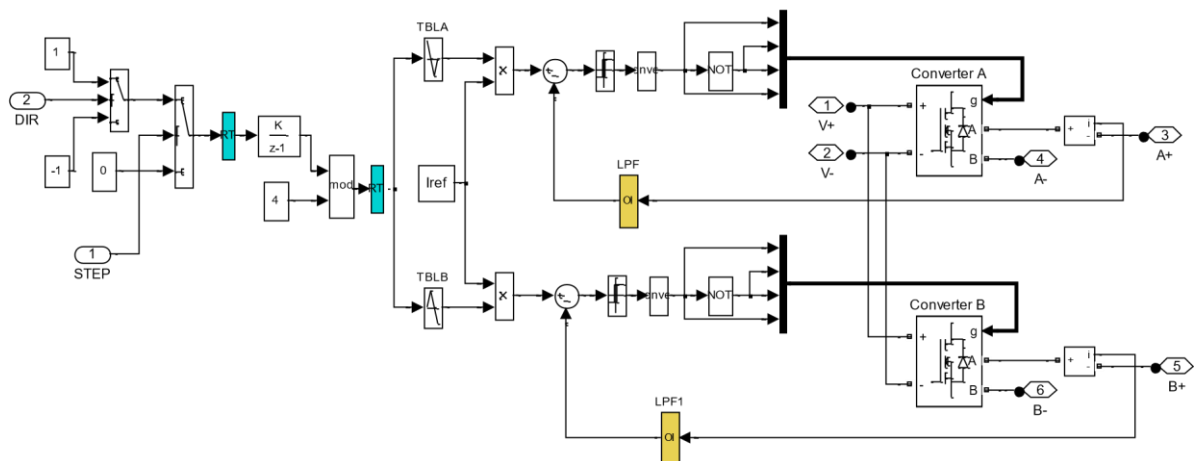


Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд внутрішнього устрою блоку «Драйвер»

На схемі два польових транзистора, і система логічного управління ними. На підставі керуючих сигналів «Step» – крок і «Dir» – напрям, що сформовані програмно з допомогою блоків генерування часових послідовностей, система логічного управління здійснює комутацію ключів інвертора з заданою частотою і в потрібні моменти. [18-20].

Перед тим, як перейти до самого моделювання, розглянемо, як управляти електроприводом на базі КД.



### 3.4 Управління кроковим двигуном

Конструкція крокового двигуна підходить для здійснення управління з відкритим контуром. Основна ідея управління полягає в забезпеченні обертання ротора на заданий кут. Під кроком прийнято називати мінімально можливе кутове переміщення ротора КД, що забезпечується його конструкцією в режимі повного кроку. На кожен імпульс управління ротор повертається на певний кут. Після отримання сигналу логічний ланцюг визначає фазу, яка повинна бути задіяна і посиляє сигнал управління. Як правило, логічна схема виготовляється на транзисторних елементах, і якщо вихідний сигнал низький, то відповідна фаза обмотки відключається, а в разі, якщо він високий - збуджується.

Існує кілька основних способів управління кроковим двигуном:

1. Режим повного кроку
2. Дроблення кроку, яке охоплює напівшаговий і мікрошаговий режим управління.
3. Векторне управління.

Існує два поняття режиму **повного кроку**. Спочатку під режимом повного кроку на увазі роздільне управління КД, тобто струм подавався на фази КД в різні моменти часу. В даний час під цим режимом повного кроку управління розуміють, таке управління при якому струм подається відразу на дві обмотки КД. Перевагою сучасного розуміння режиму повного кроку, є більше значення електромагнітного моменту. В даний момент повністю відмовилися від уявлення режиму повного кроку, як режим роздільного управління.

**Дроблення кроку.** Суть цього методу полягає в тому, що на одну з фаз статора подається сигнал управління, в результаті чого ротор переміщається на певний кут, заданий конструктивом двигуна. Як правило, кут, на який переміщується ротор, великий (рисунок 3.12).

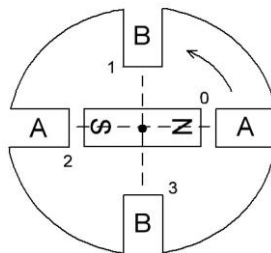


Рисунок 3.12 – Повношаговий режим управління КД

Середній крутний момент на валу двигуна можна визначити наступним вираженням

$$\overline{T_{em}} = 0.9C_T I \quad (3.5)$$

Напівшаговий і мікрошаговий режими використовуються для зменшення кута повороту ротора (кроку).

У момент використання напівшагового режиму управління необхідно подавати сигнали на дві фази двигуна. При цьому ротор буде провертатися на половину повного кроку двигуна (рисунок 3.13).

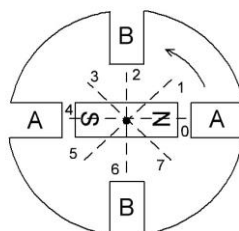


Рисунок. 3.13 – Напівшаговий режим управління КД

Однак, варто зауважити, що сигнали необхідно подавати в два рази швидше, ніж при повношаговом режимі.

У напівшаговом режимі управління двигуном середній крутний момент більше, ніж при повношаговому режимі управління, і визначається наступним виразом [21].

$$\overline{T_{em}} = 1.17C_T I \quad (3.6)$$

Під мікрошаговим розуміється режим поділу кроку. Його відмінна риса полягає в тому, що в кожен момент часу фазні обмотки живляться струмом

певного рівня. Токи, що подаються на обмотки, змінюються за законом  $\sin$  і  $\cos$  відповідно. Функціонуючи в даному режимі, можливо здійснювати розгін і гальмування, а в основний час працювати в повношаговому режимі. Сенса мікрошагового режиму лежить в подачі на обмотки КД сигналу, який за своєю формою нагадує синусоїду. Зазвичай такий режим використовується в системах позиціонування в верстатах ЧПУ.

Середній крутний момент можна описати наступною формулою

$$\overline{T_{em}} = 0.99C_T I \quad (3.7)$$

При мікрошаговому режимі управління крутний момент вище, ніж при використанні повношагового. Поряд з цим гарантуються сталість крутного моменту і плавність роботи.

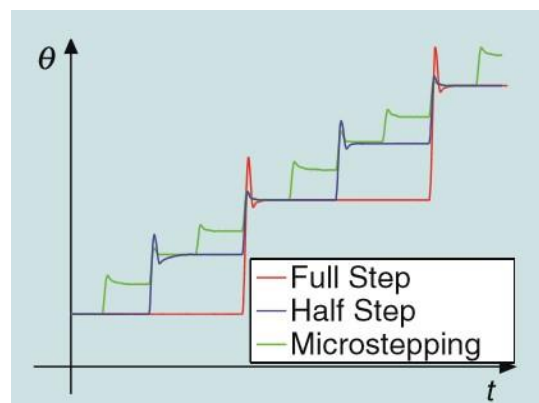


Рисунок 3.14 – Графік порівняння повношагового (Full step) напівшагового (Half step) і мікрошагового (Microstepping) режиму управління [21]

Переваги мікрошаговий режиму полягають в більш плавному обертанні ротора, зменшенні кроку, усуненні зон резонансу (при певній швидкості крутний момент стає рівним нулю) і безшумності роботи, а також ривки різних деталей, підключених до мотору, і поштовхи самого мотора, звичайно, значно знижуються. У той же час мають місце бути і недоліки, головними з яких є зменшення моменту і ускладнення алгоритму управління [22]. Отже для моделювання динамічних режимів оберемо повнокроковий режим.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Дослідження моделі електроприводу на базі КД здійснюється з метою знаходження оптимальних режимів відпрацювання заданої позиції каретки з інструментами для обробки боєприпасів. Після введення параметрів КД FL110STH150-6504 отримуємо осцилограми зміни параметрів моменту, що розвиває КД, швидкості обертання валу та його кута повороту, оскільки саме кут повороту визначає відстань, на яку переміщується платформа з допомогою черв'ячної передачі.

#### 4.1 Дослідження різних режимів руху

Різні режими руху будемо досліджувати за допомогою блока «Драйвер» та зміни навантаження на самому КД. Досліджувати будемо у повнокроковому режимі. Траєкторію руху обираємо однакову для всіх режимів. Приклад змін у часі моментів перемикавання показано на рис. 4.1.

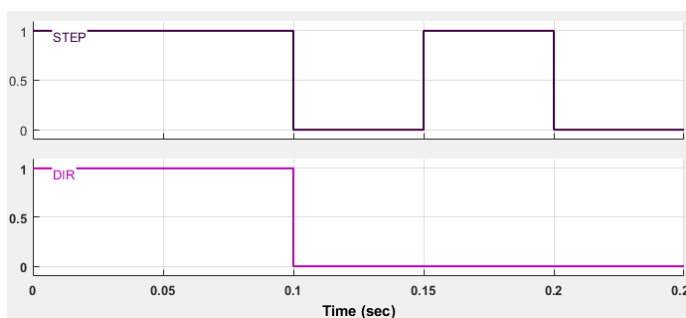


Рисунок 4.1 – Перемикання в часі напрямку руху та його тривалості

Відповідно до інтервалу часу, що діє сигнал «Step», імпульси з заданою частотою перемикавання надходять до обмоток КД.

Частота перемикавання та струм обмотки, що насправді формуються програмно мікроконтролером, можна задати в параметрах блоку «Драйвер» (рис. 4.2), імітуючи різні режими функціонування.

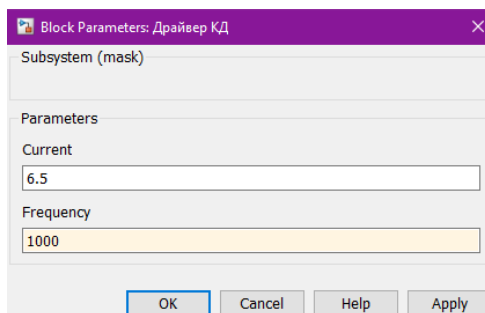
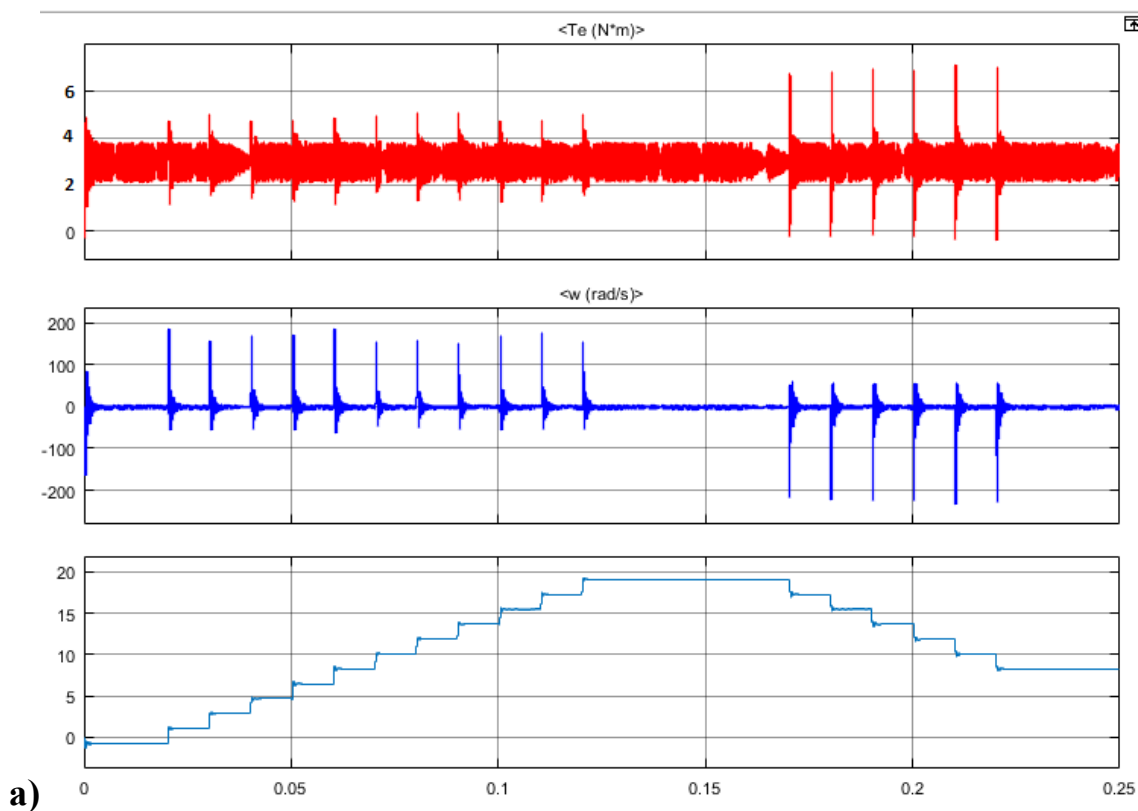


Рисунок 4.2 – Вікно завдання частоти перемикачів та току на обмотку

Розглянемо поведінку системи при робочому режимі руху, так як цей режим найбільш навантажений та має помірну швидкість переміщення, коли навантаження на вал КД відповідає найбільшому значенню. Задаємо в досліджувану модель параметри розрахунків з другого розділу, а саме навантаження при робочому ході 7.1 Н·м.



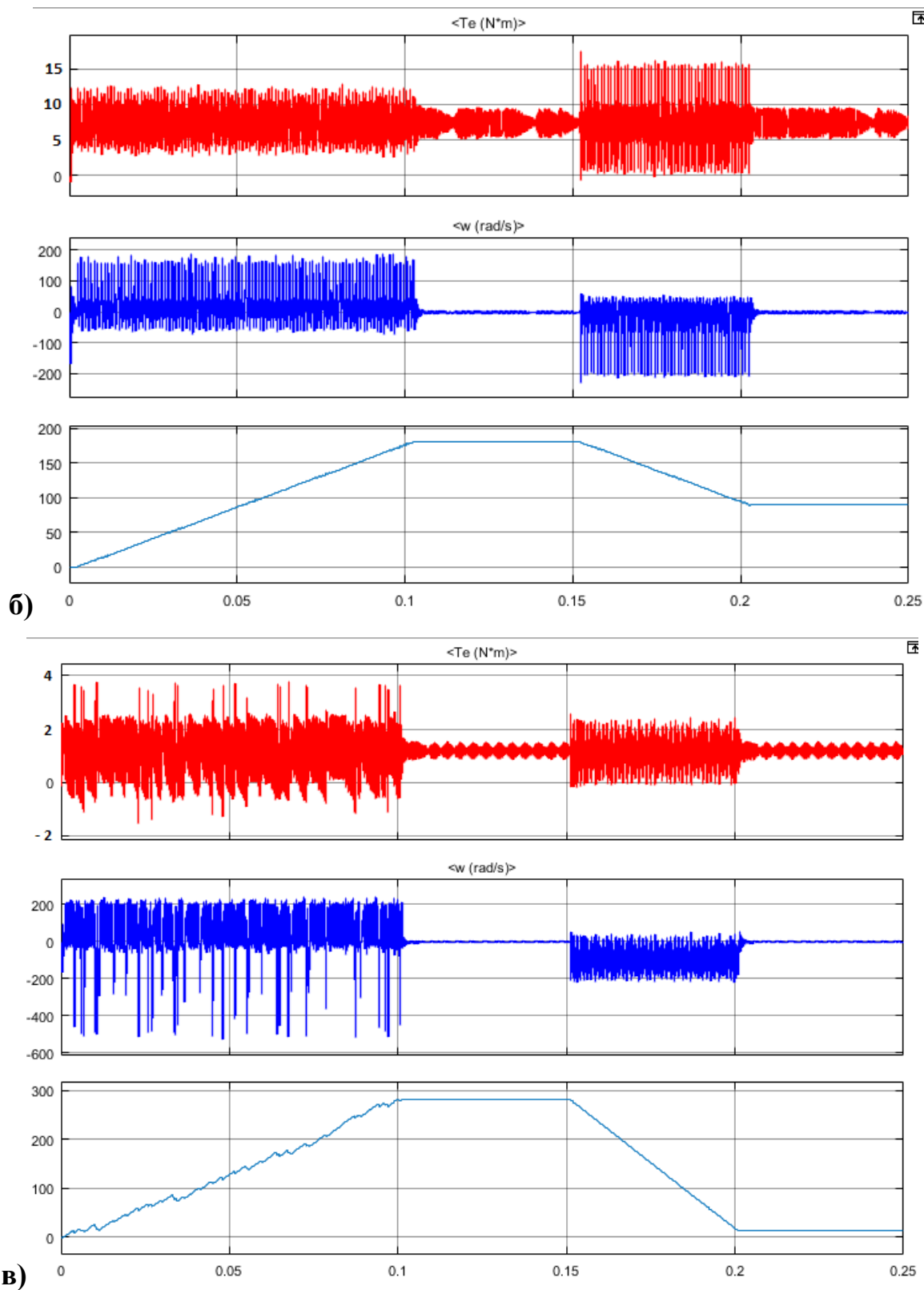


Рисунок 4.3 – Осцилограми параметрів при зміні частоти перемикачів.

На рисунку 4.3 а, б, в, показано характер зміни вихідних параметрів електроприводу при зміні частоти перемикачів обмоток, що відповідають закону перемикачів, зображеному на рис.4.1. При цьому рис. 4.3 а) відображує процес

переміщення при частоті перемикачів 50Гц; рис. 4.3 б) –1000Гц; а рис. 4.3 в) – 3000 Гц . При цьому в параметрах драйвера задано, що струм через обмотку КД дорівнює 6.5А. Із рисунків видно, що на низьких частотах (50Гц і менше) спостерігається зменшення моменту, зменшення швидкості та пропуск кроків. На високих частотах (3000 Гц і вище) спостерігаються зменшення моменту та ривки замість стабільного плавного переміщення, що ведуть за собою пропуск кроків та неправильне позиціонування. Зміна значення кута повороту, який відпрацьовується електроприводом при певній частоті комутації відбувається через те, що кроковий двигун не може працювати в таких частотах і пропускає кроки. Порівняльні графіки зміни кута повороту при зміні частоти перемикачів показано на рис. 4.4.

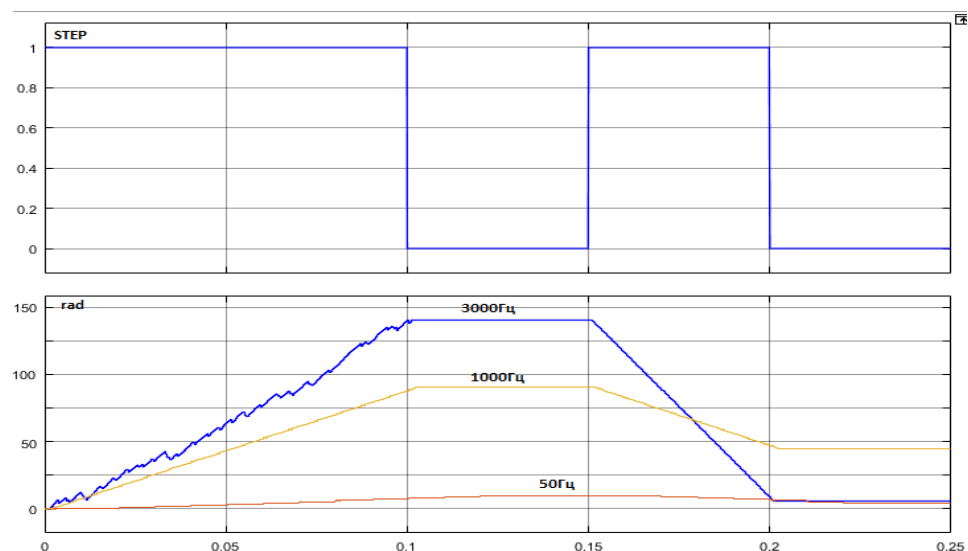


Рисунок 4.4 – Вплив частоти перемикачів на значення кута повороту КД.

В той же час варіації значень фазного струму в моделі мало впливає на рівномірність обертання валу КД, хоч амплітуда коливань моменту КД та швидкості обертання валу збільшується по мірі зменшення значення струму обмотки, що задається в параметрах драйвера.

Розглядаючи значення моменту КД в різних режимах його роботи, зазвичай припускають, що час досягнення струмами обмоток сталих значень багато менше, ніж час відпрацювання кроку ШД, тому в межах кроку струми можна вважати постійними. Однак при високих частотах комутації струми в

обмотках можуть не досягати сталих значень, внаслідок чого електромагнітний момент  $M_E$  КД зменшується.

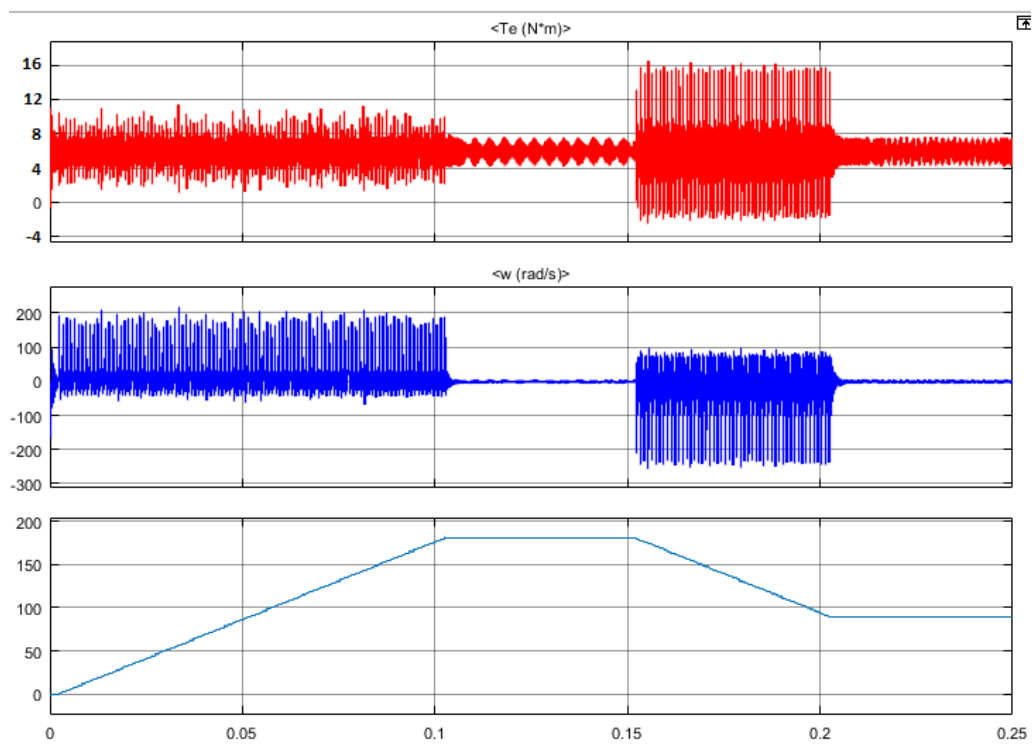


Рисунок 4.5 – Коливання моменту КД при струмі 5.5А, частоті перемикань 1000Гц

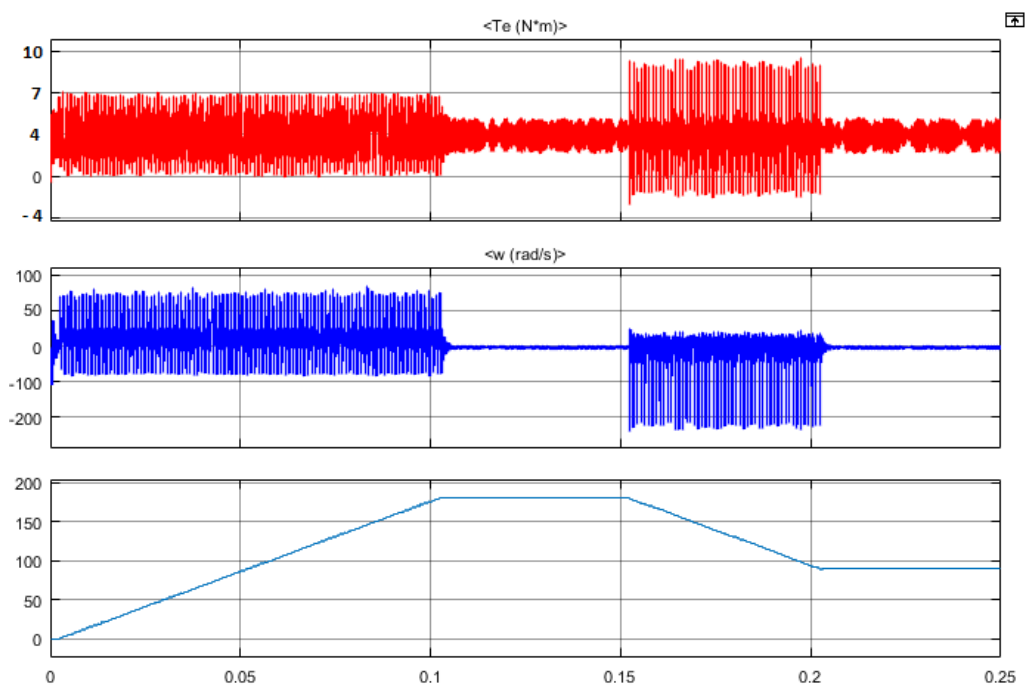


Рисунок 4.6 – Коливання моменту КД при струмі 4А, частоті перемикань 1000Гц



Щоб забезпечити працездатність електромеханічних систем, частоту перемикань КД вибирають таким чином, щоб забезпечити момент, що перевищує момент навантаження  $M_c$  у всіх режимах роботи системи.

Досліджуючи фактори, що впливають на рівномірність переміщення в моделі КД змінювався головний параметр двигуна – кут повороту на один крок. При цьому вважалось, що інші параметри умовного апарата однакові.

На рис.4.7 показано характер зміни кута повороту вала КД у часі при різних параметрах кута повороту на один крок (числа зубців на оберт) при частоті перемикання обмоток КД 1000Гц.

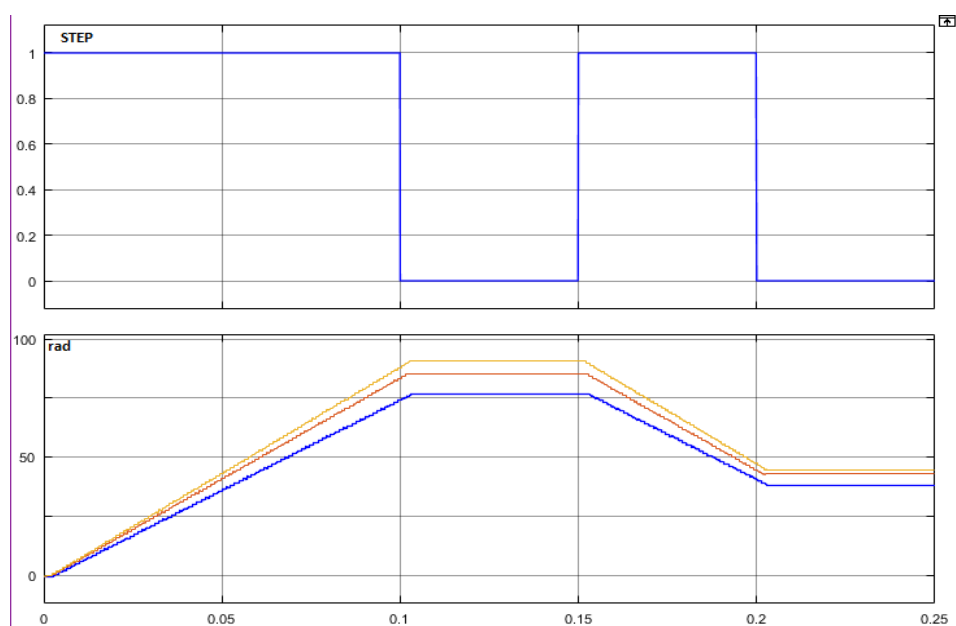


Рисунок 4.7 – Зміни кута повороту вала КД у часі

Як видно із осцилограм, для вибраних електричних параметрів і частоти перемикань, більш точним позиціонуванням характеризується апарат із 1.8 град/крок. Вибраний режим є оптимальним, оскільки такий КД виграє не тільки по енергетичним показникам, а і по показникам точності позиціонування, підтримки заданого режиму швидкості та відповідає характеристикам по моменту.

Отже оптимальними параметрами при моделюванні повношагового режиму кута повороту вала, для КД з кроком 1.8 град/крок, вважаємо ті, за яких модель та видавала гарні показники з таких вихідних величин як крутний

момент, а саме близько 7 Н·м, швидкість обертання валу, а саме між границями 150 – 160 рад/с, та кут повороту валу. Такими параметрами є частота перемикання обмоток близько 1000 Гц, та струм в обмотках двигуна близько 6А.

Досліджуючи перехідну характеристику зміни положення валу при повношаговому режимі, було виявлено що перехідний процес одного кроку КД має велике перерегулювання, та відносно довго приходить в усталений режим.

Тому, що при повнокроковому режимі роботи крокового двигуна (кут кроку  $S = 1,8^\circ$ ) керуючі сигнали мають форму, наведену на малюнку 4.9. З малюнків 4.8-4.9 видно, що за рахунок зсуву керуючих сигналів фаз на чверть періоду в кожен момент часу працюють обидві фази, це дозволяє збільшити електромагнітний момент двигуна. Так само керуючі сигнали фаз можуть бути зміщені на половину періоду.

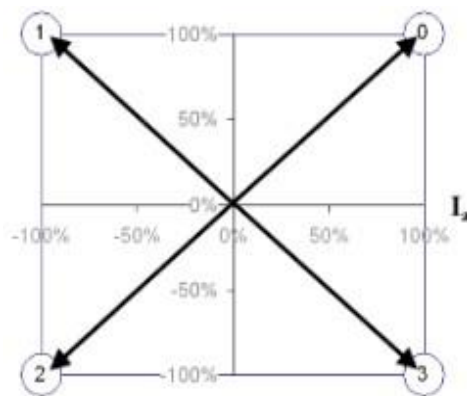


Рисунок 4.8 – Діаграма струмів в фазах при повнокроковому режимі

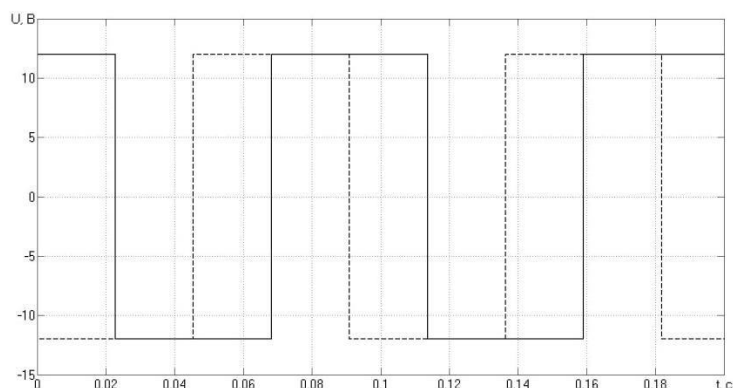


Рисунок 4.9 – Керуючі сигнали при повнокроковому режимі

Цього перерегулювання та довгого перехідного процесу можна позбутися у режимі дроблення кроку. При розгляді дробленні кроку КД на 2 (напівкроковий режим), характеристики будуть мати такий вигляд (рисунок 4.10).

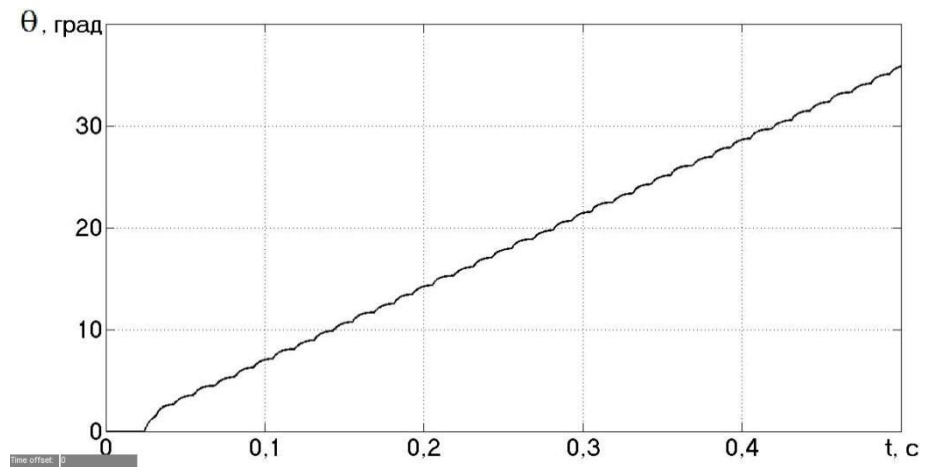


Рисунок 4.10 – Залежність кута повороту ротора від часу при напівкроковому режимі

Для того реалізації полушагового режиму (кут кроку  $S = 0,9^\circ$ ) змінена форма керуючих сигналів шляхом додавання рівнів (рисунок 4.11).

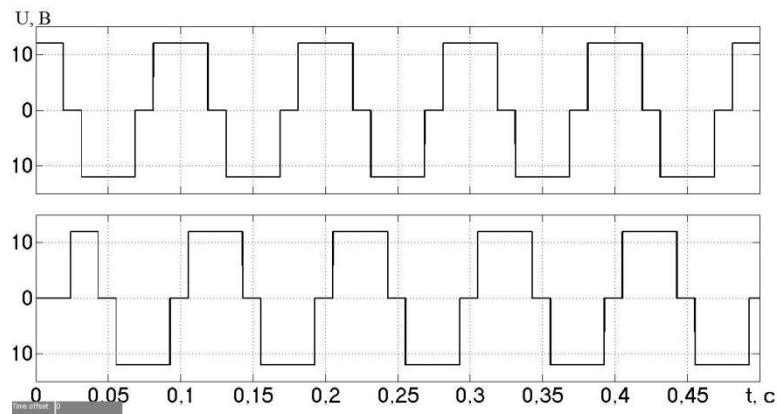


Рисунок 4.11 – Керуючі сигнали при напівкроковому режимі

З малюнка 4.12 видно, що при напівкроковому режимі повний оборот ротора здійснюється 8-ю станами підключення обмоток: 4 стани, при яких працює обмотка тільки однієї фази; 4 стани, при яких працюють обмотки обох фаз.

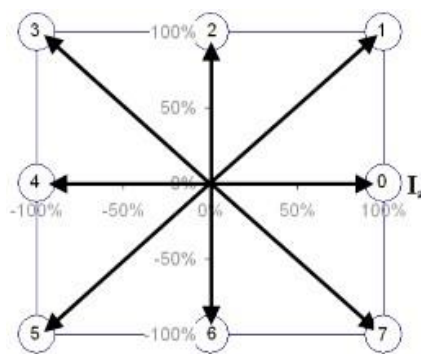


Рисунок 4.12 – Діаграма струмів в фазах при напівкроковому режимі

Формування керуючих сигналів зробили шляхом розбиття періоду на 8 інтервалів (рисунок 4.13). При частоті 5 Гц тривалість кожного інтервалу становить 0,025 с.

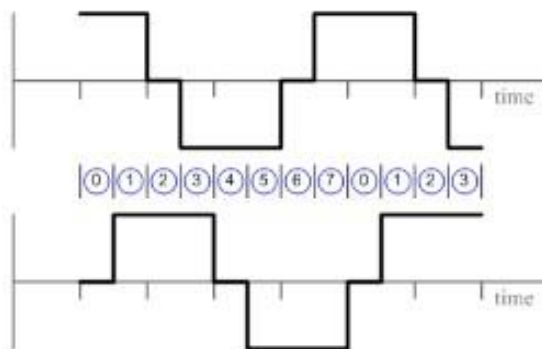


Рисунок 4.13 – Розбиття керуючих сигналів

## 4.2 Дослідження результатів імітаційної моделі на реальному об'єкті

Дана імітаційна модель перед тим, як залучатися до проектів великого масштабу, також досліджувалася та відпрацьовувалася на реальному об'єкті, а саме на скануючому притерті теплового поля.

### 4.2.1 Побудова електроприводу скануючого пристрою

Відповідно до сформованих принципів розбудови електропривода модуля сканування (рис. 3.1), розроблена схема електроприводу, зображена на рис. 4.14.

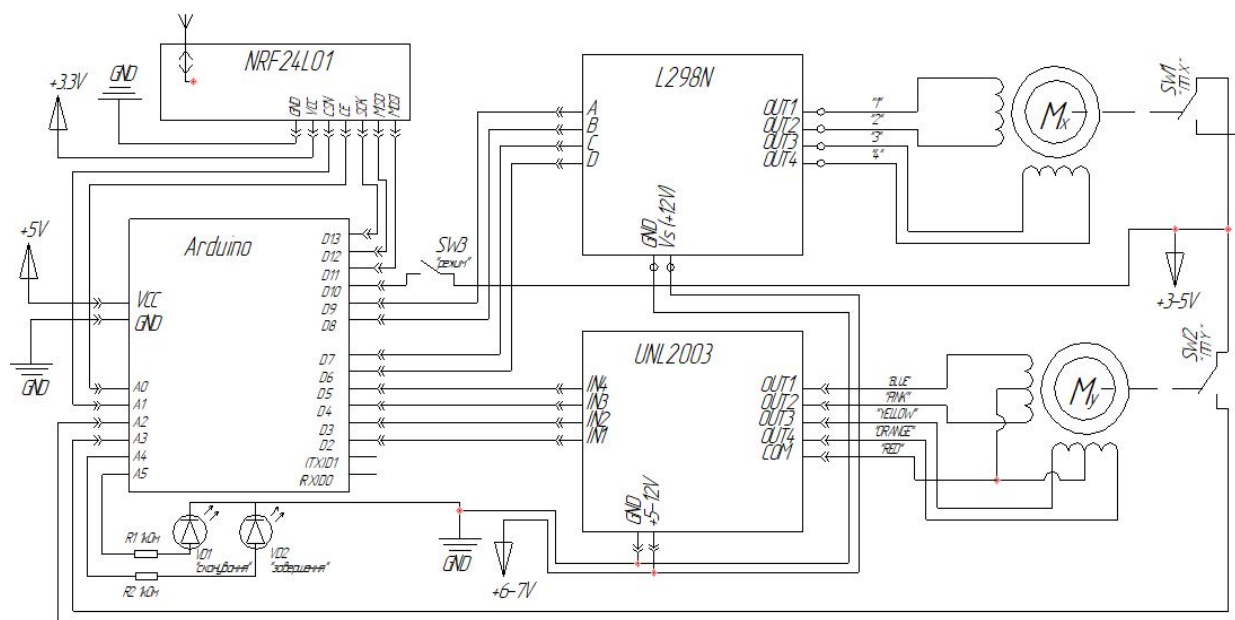


Рисунок 4.14 – Схема електроприводу скануючого пристрою. Зовнішній вигляд приводу сканування показано на рис. 4.15



### Характеристики КД 28BYJ-48-5V:

Напруга живлення:	5 вольт DC;
Тип двигуна:	уніполярний;
Кількість фаз:	4;
кроків на повний оборот:	2048 кроків;
Кількість кроків на оборот (до редуктора):	64
Затримка між кроками:	2 мс;
Кількість кроків на оборот (на вихідному валу):	4096 (64 * 64);
кут кроку:	5,625 x 1/64;
Частота:	100 Гц;
Момент на вихідному валу (зусилля):	0,031 кг * см;
Діаметр вала:	5мм;
Опір постійному струму(при температурі 25 ° C):	50 Ом ± 7%;
Вага:	34 г.
Всі технічні параметри відповідають національному електронному стандарту SJ / T10689-95	

Формування фазних струмів КД здійснюється з допомогою 2х драйверів:

- перший драйвер для КД 28BYJ-48 розроблений на мікросхемі ULN2003, що являє собою транзисторну збірку з вихідними ключами підвищеної потужності, має на виходах захисні діоди, які призначені для захисту керуючих електричних ланцюгів від зворотного викиду напруги від індуктивного навантаження. Схема і зовнішній вигляд модуля керування представлена на рис. 4.17.

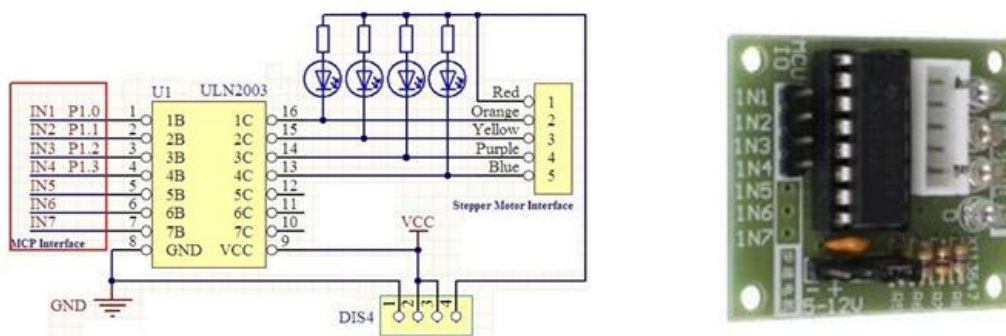


Рисунок 4.17 – Схема і зовнішній вигляд модуля драйвера КД на базі ULN2003

### Характеристики модуля

- Напруга живлення двигуна: 5 ... 12В;
- Виведено 4 фази;
- Напруга управління: 5В;
- Номінальний струм колектора одного ключа 0,5А;
- Індикація включення фаз;
- Захисні діоди на виходах;
- Вхід адаптований до всілякими видами логіки;
- Вага: 8 гр;
- Розміри: 35x30x10мм.:

- другий драйвер для КД PL15S-020 на базі чіпа L298 підтримує роботу з керуючим мікроконтролером з напругою рівнів 3.3В, забезпечуючи силу струму 2А на міст[24]. На рис. 4.18 показана плата драйвера та його принципова схема.

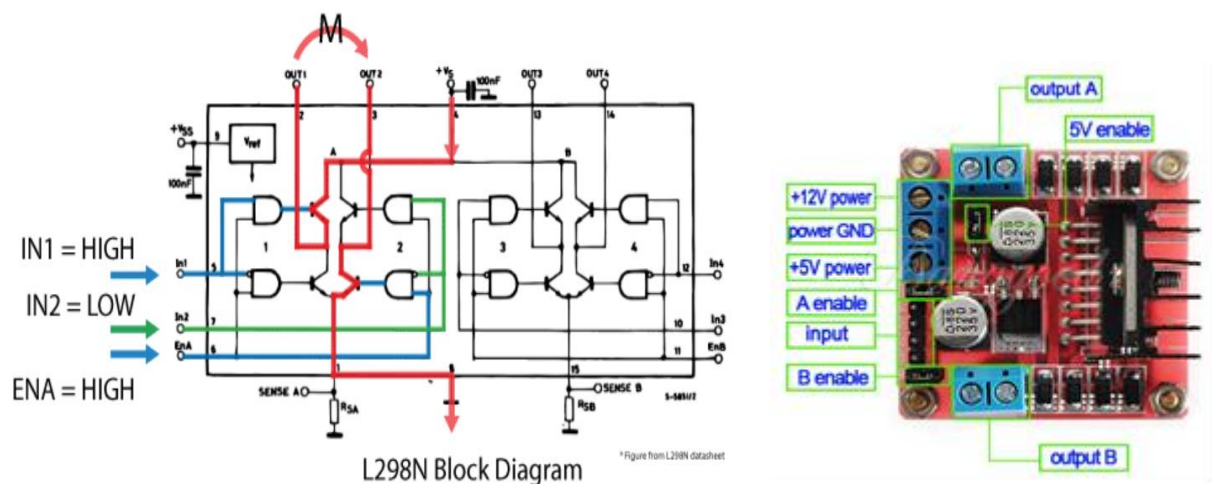


Рисунок 4.18 – Схема і зовнішній вигляд модуля драйвера бази чіпа L298

Апаратна обчислювальна платформа, що керує двигунами через згадані драйвера, реалізована пристроєм Arduino Uno на основі мікроконтролера ATmega328. До складу пристрою Arduino Uno входить:

14 цифрових входів / виходів (з них 6 можуть використовуватися в якості ШІМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрисхемного програмування (ICSP) і кнопка скидання.



Зовнішній вигляд пристрою керування на базі Arduino Uno представлено на рис. 4.19

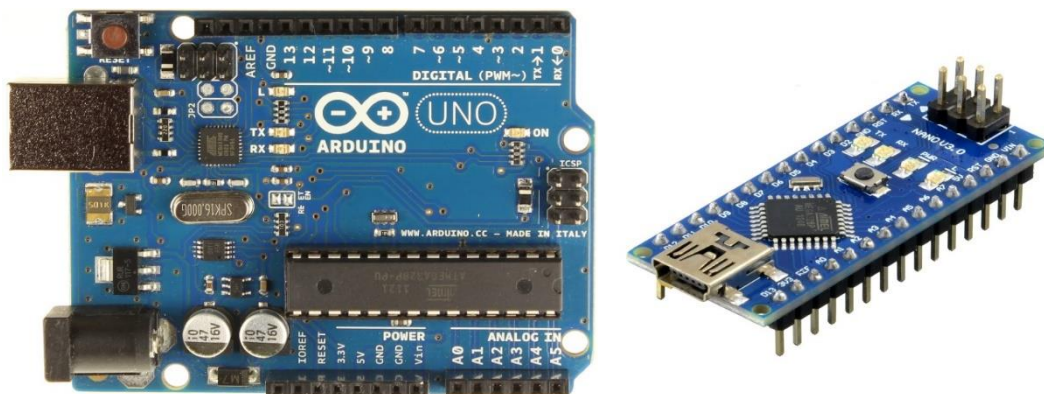


Рисунок 4.19 – Зовнішній вигляд модуля Arduino Uno та Arduino Nano

### *Характеристики Arduino Uno*

мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5В
Напруга живлення (рекомендований)	7-12В
Максимальний струм одного виведення	40 мА
Максимальний вихідний струм виводу	3.3V 50 мА
Flash-пам'ять	32 КБ (ATmega328) з яких 0.5 КБ
SRAM:	2 КБ (ATmega328)
EEPROM:	1 КБ (ATmega328)
Тактова частота:	16 МГц

Переміщення модуля сканування, здійснюється згідно алгоритму, наведеного в додатку Б. При цьому програми керування двома КД через драйвери розміщені в пам'яті модуля Arduino Uno.

Головним параметром, що визначає режими сканування є площа, яка підлягає скануванню. Саме завдання початкових та кінцевих координат сканування визначає необхідну швидкість переміщення модуля. Втім, на даному етапі, доки не визначені динамічні параметри приймача ІЧ поля, немає потреби детальних визначень абсолютних координат. Алгоритмом передбачається дискретна зміна величини поля, що сканується. Ці дискретні значення площі

сканування задаються оператором як вихідні дані для електропривода скануючого модуля. Оскільки передбачається дистанційне керування модулем, то перед початком сканування із початкової позиції приймаючим пристроєм організовано очікування наявності керуючого сигналу для запуску одного із передбачених режимів сканування.

#### **4.2.2 Результати випробувань приводу пристрою дистанційного сканування**

Оскільки метою роботи є отримання необхідних даних для розробки системи керування позиціонуванням каретки на установці утилізації боєприпасів, то першочерговим завданням випробувань є оцінка адекватності розробленої моделі електроприводу сканування. Оскільки при цьому не ставиться завдання оптимізації конструкції електроапарату, то практичний інтерес представляють результати керування цим апаратом, що забезпечує точність позиціонування та швидкість переміщення.

Приймаючи до уваги останні дві характеристики, досліджувався вплив різних параметрів системи керування на динамічні показники електроприводу модуля. Звертаючись до залежності характеру зміни кута повороту від частоти комутації, встановлено, що при заданих параметрах КД існує певна частота комутації струмів в обмотки КД, при якій спостерігається найбільша рівномірність переміщення. Експериментальні оцінки, отримані з допомогою схеми рис. 4.20, дозволяють констатувати, що паспортні дані КД (Моментна характеристика КД типу PL15S-020) дещо завищені. Експериментальне визначення частоти перемикачів, при якій досягалась найбільша рівномірність переміщення платформи, відповідала значенню 60-80Гц, в той час для розробленої моделі КД це значення складало 100-120Гц, а паспортна характеристика вказує на можливість стабільної роботи 500Гц.[25]

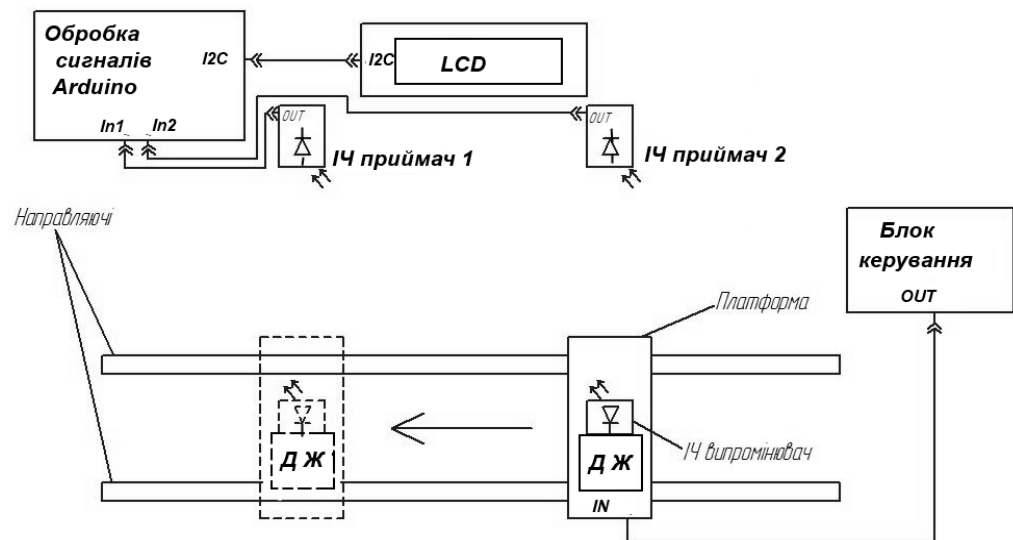


Рисунок 4.20 – Схема вимірювань проміжків часу при переміщенні платформи.

ДЖ – джерело живлення; LCD – індикація часового відрізка.

Не виключено, що ці розходження пов'язані якістю виготовлення конструктивних елементів модуля сканування (люфтів та неврахованим тертям деталей).

Іншими вимірюваннями по схемі рис. 4.20 оцінювався час переміщення платформи із одного кінцевого положення сканування до іншого.

Час проходження горизонтального напрямку складає ( $x = 40$ ) приблизно 240мс, час проходження «кадру», в залежності від запрограмованої часової затримки в кінцевих положеннях:

для поля розміром 40 x 10:

затримка 500 мс – час проходження 26 сек

затримка 300 мс – час проходження 18 сек

затримка 100 мс – час проходження 10 сек

Необхідність введення часової затримки при перемиканнях напрямків руху платформи з'явилась внаслідок того, що при оцінюванні точності її позиціонування з допомогою інкрементального енкодера (рис. 4.21), помічені розбіжності в значеннях числа імпульсів в різних лініях поля, що сканується.

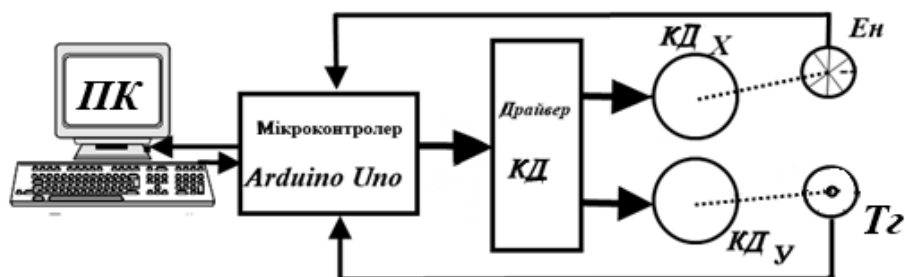


Рисунок 4.21 – Схема оцінки точності позиціонування модуля.

КДх – кроковий двигун переміщення по координаті Х; КДу – кроковий двигун переміщення по координаті У; Ен – енкадер 600 імп/об; Тг – тахогенератор. [26]

Дослідження точності позиціонування проводилась при різних швидкостях переміщення модуля сканування різних значеннях маси навантаження модуля. Результати випробувань показали, що похибка позиціонування, в залежності від вибраних режимів комутації складала різну величину, наближаючись до 15%.

При спробах оцінити динаміку КД з допомогою тахогенератора, зв'язаного із валом КД, отримання коректних даних призвело до певних проблем. Протиріччя вимірювань проявляються в значних розбіжностях сталих часу вимірювального приладу і об'єкту вимірювань. До того ж час вимірювань складає незначну величину внаслідок конструктивних обмежень модуля по переміщенню в просторі.

Слід зазначити, що не дивлячись на значну швидкість переміщення платформи, яка свідчить про достатній запас по крутному моменту КД, при певних значеннях навантажень, тобто момента опору, об'єкт втрачає динамічні параметри. Це обумовлює пошук компромісів між удосконаленням конструкції модуля та параметрами системи керування. Можливість таких компромісів визначається параметрами давача ІЧ випромінювання, які на даний час ще недосліджені.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблена модель електромеханічного перетворювача для скануючого пристрою на базі крокового двигуна в пакеті імітаційного моделювання Matlab Simulink.

2. На базі моделі отримані динамічні характеристики, що дає змогу розробити блоки керування електроприводами установки утилізації.

3. Отримані експериментальні дані функціонування модуля дають змогу сформулювати вимоги до характеристик електричних апаратів, які використовуються в системі позиціонування.

4. Аналіз експериментальних даних електроприводу блоку дозволяє стверджувати про адекватність розробленої моделі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вибухи на складах боєприпасів в Україні. Історія катастроф [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://gordonua.com/ukr/publications/vibuhi-na-skladah-bojepripasiv-v-ukrajini-istorija-katastrof-179716.html>.
2. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ, 3-е изд: Учебное пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2016. – 397с.
3. Мацеевич Б.В. Номенклатура и характеристика промышленных взрывчатых материалов. – М.: Наука, 1986. – 80с.
4. Утилізація та знищення вибухонебезпечних предметів: навч. посіб. Том 1. Порядок та правила утилізації вибухонебезпечних предметів 4-е видання / В.В. Барбашин, О.М. Смирнов, І.О. Толкунов. – Х.: Міська друкарня, 2015. – 570 с.
5. International ammunition technical guideline IATG 10.10:2015 [E]. Demilitarization and destruction of conventional ammunition. – UN ODA, 2015. – 40 p.
6. Попкович Г. С., Гордеев М. А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1986. -392 е., ил.
7. EU Directive 2000/76, Dec 2015.
8. Cryofracture process, General Atomics. Cryofracture technology for the destruction of AP mines, International Demil Conference St. Petersburg 2016.
9. Van Nam, N.H.A., Safety Aspects of Slurry Explosives, in Application of demilitarized gun and rocket propellants in commercial explosives, NATO Science Series II- Volume 3.
10. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ РАКЕТ И БОЕПРИПАСОВ. БЕЗОПАСНОСТЬ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ СБОРНИК ДОКЛАДОВ под редакцией академиков РАН, докторов технических

- наук, профессоров, лауреатов премий Правительства РФ Б.В. Мацевича и В.А. Чобаняна 24–26 августа 2015 года Республика Бурятия, г. Улан-Удэ.
11. Кутняшенко И.В., Бован Д.В. Перспективы и проблемы утилизации взрывчатых веществ на предприятиях Украины: сборник научных трудов ДонНТУ серия «Химия и химическая технология» 2-е изд, 1995-2015., 110с.
  12. Никифоров А.Д., Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф. Процессы управления объектами в машиностроении 3-е изд. Учеб пособие для машиностроит. Спец. Вузов. – М.: Высшая школа, 2015. – 455с
  13. Семисалов В.В. Разработка математической модели для исследования динамических режимов работы шагового электропривода с трехфазным инвертором напряжения 2-изд.: дис. канд. тех. наук. Московский авиационный институт, г. Москва, 2017 г.
  14. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2015. – 327 с.
  15. Соколов А.В. Динамические модели шаговых электродвигателей. 4-е изд. // ЮжноУральский государственный университет. Серия «Энергетика», выпуск 17, г. Челябинск 2016 г.
  16. Відомості про кроковий двигун – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.npoatom.ru/katalog/step\\_motor/fl110sth/#1](http://www.npoatom.ru/katalog/step_motor/fl110sth/#1)
  17. В.Б. Самородов, Н.А. Митцель. Исследование свойств шагового электропривода как системы управления двухпоточной гидрообъемномеханической трансмиссией, 2-е изд. Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774. г. Харьков, 2016 г.
  18. Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle 3-d edition/ Acta Polytechnica Hungarica. №1, 2015.
  19. Krishnan R., Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Fellow, Center for Organizational and Technological Advancement

- (COTA) Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, TK2787 .R35 2001, ISBN 0 8493-0838-0
20. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M., Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control, 3-d edition, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2016.
21. Andrew, J. High-Speed parameter Estimation of Stepper Motors/ J.Andrew, J. Chiasson// Transactions on control system technology. – 1993. – vol.1№4. – 270–271с.
22. Samokhvalov, D. Hybrid Stepper Motor Modeling in Simulink./ D.Samokhvalov, S. Stoliarov, A. Kekkonen // «LETI» Department of robotics and industrial automation//.–4
23. Емельянов А. А., Бесклеткин В. В., Авдеев А. С. и др. Математическое моделирование электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете SimPowerSystems // Молодой ученый. – 2016. – №15. – С. 5-10. – URL <https://moluch.ru/archive/119/33079/>
24. Інформація про драйвер L298N крокового двигуна – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [https://arduino.ua/prod406-Draiver\\_dvyh\\_dvigateli\\_na\\_L298N](https://arduino.ua/prod406-Draiver_dvyh_dvigateli_na_L298N)
25. Кулінченко Г.В., Мозок Є.М. Павленко Є.В Керування позиціонуванням пристрою сканування Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» – Тернопіль: 2017– 244 с 8-9 червня С.217-219
26. Кулінченко Г.В., Мозок Є.М. Павленко Є.В Дослідження режимів позиціонування скануючого пристрою. XVI Міжнародна науково - технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» .- Кременчук.-2017.-С. 115-117.
27. Павленко Є. В. Автоматизація процесу утилізації боєприпасів, дипломний проект: 151 / . – Суми, 2018. – 70с.



# ДОДАТОК А

(довідковий)

## Конструкторська документація

СУ – 42 6.050201.1 А2 Функціональна схема автоматизації процесу  
утилізації боєприпасів

## ДОДАТОК Б

### Алгоритм процесу сканування об'єкту

