

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра тракторів, автомобілів та енергетичних засобів**

# **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**НА ТЕМУ:**

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ  
МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО  
РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДИЗЕЛЯ»**

**Виконав:**

здобувач освітнього ступеня «Магістр»  
освітньо-професійної програми  
«Агроінженерія» спеціальності  
208 «Агроінженерія»  
денної форми навчання

**МАЗУРЕНКО Володимир Олександрович**

**Керівник:**

д.пед.н., професор

**ДУГАНЕЦЬ Віктор Іванович**

**Оцінка захисту:**

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_\_

Шкала ECTS \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р.

**Допускається до захисту:**

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р.

Гарант освітньо-професійної програми «Агроінженерія»  
спеціальності 208 «Агроінженерія»,

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ **ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович**

м. Кам'янець-Подільський, 2025

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙОЇ РОБОТИ.....	4
АНОТАЦІЯ.....	5
РЕФЕРАТ.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕТАПІВ РОЗВИТКУ ДОСЛІДЖЕНЬ САРЧ ДИЗЕЛЯ.....	11
1.1. Дизель як об'єкт регулювання.....	11
1.2. Аналіз досліджень автоматичних систем регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля.....	13
1.3. Аналіз складових електронної системи регулювання дизеля.....	23
1.4. Задачі дослідження електронної САРЧ для автомобільного дизеля.....	26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ ВСЕРЕЖИМНОЇ САРЧ ДИЗЕЛЯ З ПІД-ЗАКОНОМ УПРАВЛІННЯ.....	29
2.1. Розробка структурної схеми .....	29
2.2. Обґрунтування введення ПІД-закону управління в електронну САРЧ дизеля.....	30
2.3. Виконавчий механізм і зворотній зв'язок .....	31
2.4. Технічні параметри та конструкція експериментальної всережимної САРЧ дизеля.....	33
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЯ З ЕЛЕКТРОННОЮ ВСЕРЕЖИМНОЮ САРЧ З ПІД-РЕГУЛЮВАННЯМ.....	43
3.1. Базова модель САРЧ дизеля для дослідження.....	43
3.2. Математична модель електронної всережимної САРЧ з ПІД- регулятором.....	47
3.3. Моделювання принципу роботи ЕБК.....	53
3.4. Математична модель підпрограми електромеханічного виконавчого механізму.....	55
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ.....	59
4.1. Обґрунтування необхідності вибору раціональних параметрів.....	59
4.2. Методика і результати досліджень МР на ПНВТ.....	62

4.3. Методика визначення і значення вихідних параметрів для математичної моделі електронної САРЧ.....	66
4.4. Дослідження ПД-параметрів ЕВР на вплив вібрацій двигуна.....	70
<b>РОЗДІЛ 5. ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПД-МОДЕЛЮВАННЯ В МОТОРНИХ І ДОРОЖНІХ ВИПРОБУВАННЯХ.....</b>	<b>75</b>
5.1. Додаткове уточнення процесів запуску і зупинки на дизелі.....	75
5.2. Перевірка раціональних налаштувань ПД-параметрів дизеля при зміні швидкісних режимів.....	77
5.3. Порівняння показників роботи дизеля з різними регуляторами.....	82
5.4. Підтвердження результатів ПД-моделювання дорожніми випробуваннями.....	85
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....</b>	<b>89</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>91</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>95</b>

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
Кафедра тракторів, автомобілів та енергетичних засобів  
Освітній ступінь «Магістр»  
Спеціальність 208 - «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри,  
професор \_\_\_\_\_ Віктор ДУГАНЕЦЬ  
„ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

**Здобувачу МАЗУРЕНКУ Володимирі Олександровичу**

**1. Тема роботи:** «ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДИЗЕЛЯ»

**2. Керівник роботи:** ДУГАНЕЦЬ Віктор Іванович, професор  
**Затверджено наказом** Закладу вищої освіти «Подільський державний університет» від «15» лютого 2025 року № 355с.  
**Строк подання** здобувачем закінченої роботи 26 листопада 2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи:**

1. Матеріали дипломного проекту з освітнього ступеня "Бакалавр".
2. Науково-технічна література.
3. Результати досліджень та випробувань дизельних двигунів.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:**

Вступ

1. *Аналіз етапів розвитку досліджень САРЧ дизеля.*
2. *Розробка електронної всережимної САРЧ дизеля з під-законом управління.*
3. Математична модель дизеля з електронною всережимною САРЧ з ПІД-регулюванням.
4. Дослідження параметрів налаштування ПІД-регулятора для автотракторного дизеля.
5. *Використання результатів під-моделювання в моторних і дорожніх випробуваннях*
7. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Загальні висновки по роботі.

Список використаних джерел.

Додатки.

## 5. Перелік ілюстративного матеріалу:

1. Титульний аркуш.
2. Мета і завдання досліджень.
3. Функціональна схема дизеля як об'єкта регулювання.
4. Узагальнена функціональна схема гідравлічного регулятора частоти обертання колінчастого вала.
5. Узагальнена функціональна схема електронного регулятора дизеля з ПНВТ.
6. Структурна схема електронного всережимного регулятора САРЧ дизеля.
7. Конструкція виконавчого механізму з встановленим датчиком зворотного зв'язку.
8. Виконуючий механізм, встановлений на ПНВТ в ході безмоторних випробувань.
9. Схема встановлення датчика частоти обертів.
10. Математична модель електронної САРЧ з ПНВТ дизеля.
11. Характеристики ПНВТ для дизеля графічно-матричним способом.
12. Графічна інтерпретація алгоритму вибору системою положення рейки ПНВТ.
13. Залежність сили струму виконавчого механізму від навантаження на валу.
14. Технічні характеристик елементів мікропроцесорного регулятора при дослідженнях.
15. Технічні характеристики виконуючого механізму при безмоторних дослідженнях.
16. Цифровий запис перехідних процесів.
17. Моторні випробування на дизель-генераторі.
18. Перевірка раціональних налаштувань ПІД-параметрів дизеля при зміні швидк. режимів.
19. Підтвердження результатів ПІД-моделювання дорожніми випробуваннями.
20. Загальні висновки по роботі.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Консультант з нормоконтролю	ПУКАС В.Л., доцент		

## 7. Дата видачі завдання 04 квітня 2025р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділів роботи	Строк виконання розділів роботи		Підпис керівника
		планово	фактично	
	Вступ	20.04.2025р.	20.04.2025р.	
1.	Аналіз етапів розвитку досліджень САРЧ дизеля.	25.05.2025р.	25.05.2025р.	
2.	Розробка електронної всережимної САРЧ дизеля з під-законом управління.	03.06.2025р.	03.06.2025р.	
3.	Математична модель дизеля з електронною всережимною САРЧ з ПІД-регулюванням.	20.07.2025р.	20.07.2025р.	
4.	Дослідження параметрів налаштування ПІД-регулятора для автотракторного дизеля.	12.08.2025р.	12.08.2025р.	
5.	Використання результатів під-моделювання в моторних і дорожніх випробуваннях.	12.09.2025р.	12.09.2025р.	
6.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.	10.10.2025р.	10.10.2025р.	
	Загальні висновки по роботі.	20.10.2025р.	20.10.2025р.	
	Список використаних джерел.	10.11.2025р.	10.11.2025р.	
	Додатки.	26.11.2025р.	26.11.2025р.	

Здобувач  
Керівник

**Володимир МАЗУРЕНКО**  
**Віктор ДУГАНЕЦЬ**

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки, виконаної машинописним способом на 91 аркушах формату А4, яка вміщує 6 розділів 9 таблиць, 56 рисунки, 28 найменувань використаних джерел і презентаційного матеріалу на 19 аркушах.

Метою роботи є обґрунтування і визначення раціональних налаштувань складових мікропроцесорного всережимного ПД - регулятора, які поліпшують паливну економічність та якість роботи САРЧ автотракторного дизеля.

В процесі виконання роботи використовувались методи наукової ідентифікації та порівняльного аналізу при опрацюванні літературних джерел, експериментальне визначення вихідних даних для математичної моделі із застосуванням методики планування багатофакторного експерименту і числового методу Рунге-Кутга-Фельдберга при вирішенні системи диференціальних рівнянь, статистичні методи обробки результатів досліджень. У результаті проведених досліджень розроблено і випробувано експериментальний зразок всережимного МР з ПД-управлінням і електромеханічним ВМ, що забезпечує момент 1,4 Н·м при 36° повороту вала і відсутності редуктора. Розроблено алгоритм розрахунку циклової подачі палива при всережимному регулюванні для математичної моделі електронної САРЧ дизеля з всережимним регулюванням, який враховує динамічне моделювання ВМ, ПД-алгоритм регулювання циклової подачі палива, підтримання кута нахилу регуляторної гілки та відтворенням впливу вібрацій дизеля на роботу системи. Підтверджено адекватність математичної моделі в статиці і динаміці. Розроблено експериментально-розрахункову методику досліджень з визначення раціональних ПД-параметрів з урахуванням умов експлуатації автотракторного дизеля, яка була підтверджена безмоторними і моторними дослідженнями на автомобільному дизелі 4ЧН12/14. Для дизеля 4ЧН12/14 П-складову необхідно збільшувати в 2...2,5 рази при ступені нерівномірності регулятора 0...6 %. Рекомендовано після безмоторних випробувань виконати корекцію ПД-складових на дизелі в діапазонах  $n = 0,5...0,9$  і  $0,9...1,06$  відносних частот обертання колінчастого вала, зменшивши запропонований комплексний корегуючий коефіцієнт КΣ з 5 % до 2 % відповідно.

Ключові слова: ДИЗЕЛЬ, РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ, ПД-РЕГУЛЮВАННЯ, ПАЛИВНА ЕКОНОМІЧНІСТЬ, ВПЛИВ ВІБРАЦІЙ, ЗВОРОТНІЙ ЗВ'ЯЗОК.

## АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі магістра розроблено алгоритм розрахунку циклової подачі палива при всережимному регулюванні для математичної моделі електронної САРЧ дизеля з всережимним регулюванням, який враховує динамічне моделювання ВМ, ПІД-алгоритм регулювання циклової подачі палива, підтриманням кута нахилу регуляторної гілки та відтворенням впливу вібрацій дизеля на роботу системи. Підтверджено адекватність математичної моделі в статиці і динаміці.

Розроблено експериментально-розрахункову методику досліджень з визначення раціональних ПІД-параметрів з урахуванням умов експлуатації автотракторного дизеля, яка була підтверджена безмоторними і моторними дослідженнями на автомобільному дизелі 4ЧН12/14. Результатом досліджень став 3-х вимірний масив значень запропонованого  $K_{\Sigma}$  комплексного корегуючого коефіцієнта ПІД-складових МР.

## SUMMARY

In the master's qualification work, an algorithm for calculating cyclic fuel supply with all-mode regulation was developed for a mathematical model of an electronic SARC diesel engine with all-mode regulation, which takes into account dynamic modeling of the VM, a PID algorithm for regulating cyclic fuel supply, maintaining the angle of inclination of the regulatory branch and reproducing the influence of diesel engine vibrations on the system operation. The adequacy of the mathematical model in statics and dynamics is confirmed.

An experimental and computational research methodology has been developed to determine rational PID parameters taking into account the operating conditions of a truck-tractor diesel engine, which was confirmed by engine-less and engine-powered studies on a 4ChN12/14 automobile diesel engine. The result of the research was a 3-dimensional array of values of the proposed  $K_{\Sigma}$  complex correction coefficient of PID components of MR.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- ВГ – відпрацьовані гази;
- ВМ – виконавчий механізм;
- ДВЗ - двигун внутрішнього згорання;
- ЕБК – електронний блок керування;
- ЕВР – електронний всережимний регулятор;
- КТЗ – колісний транспортний засіб;
- МР – мікропроцесорний регулятор;
- НК – негативний коректор;
- ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;
- ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій;
- ПІД – пропорційно інтегрально диференціальний;
- ПНВТ – паливний насос високого тиску;
- САРЧ – система автоматичного регулювання частоти обертання  
колінчастого вала;
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Впровадження європейських стандартів щодо викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами стимулює широке застосування та вдосконалення бортових мікропроцесорних систем керування роботою дизельних двигунів. Такі системи здатні оперативно обробляти значну кількість сигналів від датчиків, оптимально регулювати роботу двигуна у різних режимах, здійснювати постійну бортову діагностику систем, що впливають на токсичність ВГ, та інформувати водія про можливі несправності. Крім того, вони включають автоматичний регулятор частоти обертання колінчастого вала.

Мікропроцесорні системи керування для транспортних дизелів повинні створюватися на сучасній електронній елементній базі, а програмне забезпечення є інтелектуальною власністю розробника. Налаштування проводиться за рекомендаціями або під наглядом представника виробника.

З теорії автоматичного регулювання відомо широке використання ПД-регуляторів (П – пропорційна, І – інтегральна, Д – диференційна складові) для систем автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) колінчастого вала дизеля. В Україні такі регулятори застосовуються на колісних транспортних засобах при переході від механічних і гідромеханічних САРЧ до мікропроцесорних систем.

Фахівці відзначають, що більшість законів регулювання можна реалізувати за допомогою ПД-регуляторів. На практиці, переважно використовуються іноземні регулятори, а процес їх налаштування є власністю виробника, тому доступ працівників експлуатації обмежений технічними інструкціями.

Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі щодо налаштування складових ПД-регулятора автотракторних дизелів для забезпечення стійкої роботи у всіх швидкісних і навантажувальних режимах без погіршення паливної економічності.

**Мета та завдання досліджень.** Метою роботи є обґрунтування та визначення оптимальних налаштувань складових мікропроцесорного всережимного ПД-регулятора, які підвищують паливну економічність та якість роботи САРЧ дизеля. Для досягнення цієї мети необхідно:

- проаналізувати дослідження щодо різних типів систем регулювання транспортних дизелів;

- розробити та дослідити функціональні складові електронної САРЧ дизеля для колісного транспортного засобу;
- створити математичну модель всережимної САРЧ дизеля та перевірити її адекватність;
- провести розрахункові та моторні експерименти роботи електронної САРЧ у різних експлуатаційних режимах;
- розробити рекомендації щодо вибору та налаштування електронної САРЧ на транспортному дизелі.

**Об'єкт дослідження:** усталені та перехідні процеси автотракторного дизеля з мікропроцесорним всережимним регулятором частоти обертання колінчастого вала.

**Предмет дослідження:** підвищення якості роботи САРЧ дизеля з всережимним ПД-алгоритмом управління за різних швидкісних і навантажувальних режимів, вибір оптимальних налаштувань ПД-складових без погіршення динаміки перехідних процесів, паливної економічності та незалежно від вібрацій дизеля.

**Методи дослідження:** наукова ідентифікація та порівняльний аналіз літературних джерел, експериментальне визначення вихідних даних для математичної моделі із застосуванням планування багатофакторного експерименту, числовий метод Рунге-Кутта-Фельдберга для розв'язання систем диференціальних рівнянь, статистична обробка результатів. Теоретичні дослідження виконані з використанням математичного моделювання, інтерполяції для формування нахилу часткових характеристик та симуляції вібрацій різної амплітуди й частоти.

**Практичне значення одержаних результатів:** розроблено методику налаштування ПД-параметрів всережимної електронної САРЧ з урахуванням вібрацій, створено математичний алгоритм роботи САРЧ з електромеханічним виконавчим механізмом, визначено налаштування Д-складових для забезпечення стійкої роботи дизеля у широкому діапазоні частот обертання. Проведено дорожні випробування електронного регулятора з раціональними параметрами.

**Апробація результатів роботи:** основні положення роботи обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих науковців «Перші наукові кроки – 2025» і розглядалися на кафедрі під час попереднього розгляду кваліфікаційної роботи.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЕТАПІВ РОЗВИТКУ ДОСЛІДЖЕНЬ САРЧ ДИЗЕЛЯ

#### 1.1. Дизель як об'єкт регулювання

Дизельний двигун, як об'єкт регулювання, може бути представлений як сукупність взаємодіючих структурних компонентів, серед яких безпосередньо сам двигун, система подачі повітря, паливний насос високого тиску, система мастила, регулятор частоти обертання колінчастого вала, органи керування двигуном та інші. У межах системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчастого вала (САРЧ) розглядаються лише ті компоненти, робота яких безпосередньо впливає на частоту обертання колінчастого вала. Кількісні значення фізичних величин, що характеризують ці компоненти, у подальшому будуть називатися координатами. Так, вхідними координатами блока двигуна, як об'єкта регулювання є циклова подача палива ( $q_{ц}$ ), подача повітря ( $G_{пов}$ ), та зовнішнє навантаження ( $M_{нав}$ ). Вихідними координатами є частота обертання колінчастого вала ( $n_{\delta}$ ) та кількість відпрацьованих газів у випускному колекторі ( $G_{г}$ ).

Циклова подача палива виступає вихідною координатою паливної апаратури. Водночас вхідною координатою паливної апаратури є положення рейки паливного насоса високого тиску (ПНВТ). В залежності від типу паливної апаратури до вхідних координат також може відноситись частота обертання колінчастого вала ( $n_{\delta}$ ). Так як  $n_{\delta}$  є вихідною координатою двигуна, це додає зворотний зв'язок.

У дизелях без турбонадуву циклова подача повітря не підлягає регулюванню та визначається частотою обертання колінчастого вала. Якщо розглядати турбокомпресор як окремий об'єкт регулювання, то його вихідним сигналом є секундний об'єм подачі повітря компресором. Вхідними сигналами турбокомпресора дизеля виступають кількість відпрацьованих газів за одиницю часу та положення органа керування (у випадку регульованого турбонадуву). З теорії регулювання двигунів внутрішнього згоряння побудовано функціональну схему дизеля як об'єкта регулювання (рис. 1.1), що включає ланки двигуна, ПНВТ, регулятора частоти обертання та турбокомпресора.

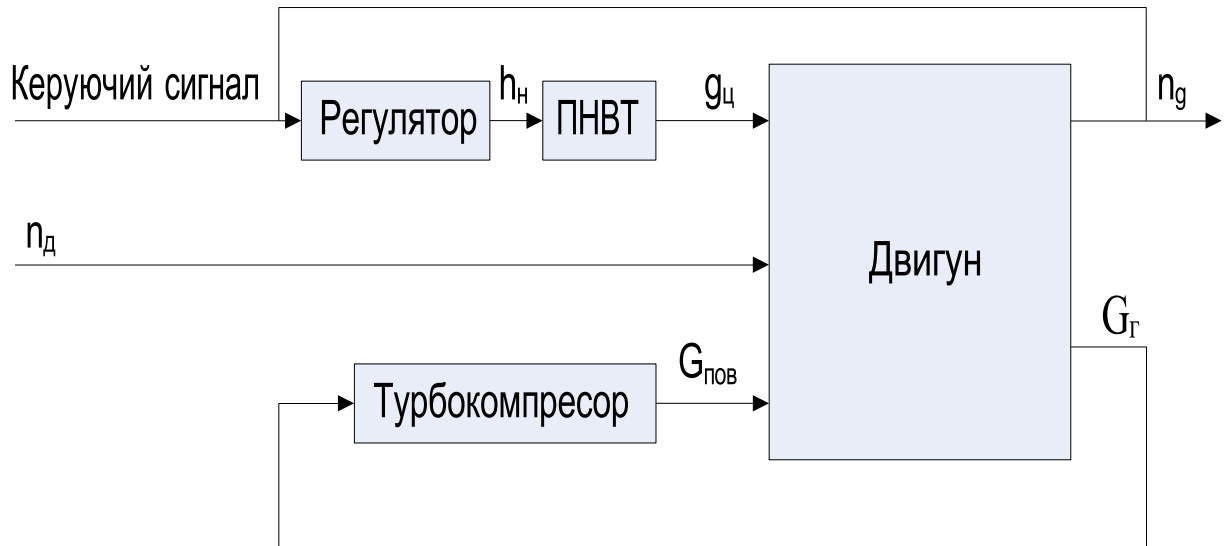


Рисунок 1.1 – Функціональна схема дизеля як об'єкта регулювання

Зв'язки між цими ланками описують і частоту обертання колінчастого вала ( $n_g$ ), переміщення рейки ПНВТ ( $h_n$ ), циклову подачу палива ( $q_{ц}$ ), викиди відпрацьованих газів ( $G_{Г}$ ) та подачу повітря ( $G_{пов}$ ). Ця схема є відправною точкою для аналізу існуючих систем автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) колінчастого вала дизеля і розробки математичної моделі електронної САРЧ дизеля.

До дизеля та його автоматичних систем регулювання висувається низка вимог. Основними серед них є підтримання заданого швидкісного режиму, забезпечення експлуатаційної надійності та відповідність екологічним нормам і регламентам. Виходячи з призначення дизеля та умов його експлуатації, визначають пріоритет вимог і обирають відповідний алгоритм регулювання системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ). Досягнення задовільних показників за всіма критеріями потребує застосування складних алгоритмів, здатних опрацьовувати велику кількість вихідних сигналів двигуна.

Автомобільні дизелі значну частину часу працюють у перехідних режимах, що потребує підвищеної уваги до якості перехідних процесів, що впливають на частоту обертання колінчастого вала. Для цього необхідно враховувати не лише поточне значення частоти обертання, а й її попередні значення та швидкість зміни.

Сучасні динамічні математичні моделі САРЧ дизеля повинні описувати стан регульованої системи у довільний момент часу та враховувати швидкість зміни

вхідних сигналів і зворотні зв'язки для більш точного моделювання перехідних процесів. Для побудови такої динамічної моделі необхідно розглядати поведінку блоку двигуна, регулятора та системи повітряпостачання, представляючи їх у вигляді системи рівнянь, що зазвичай мають нелінійний характер. Кожен дослідник формує власну математичну модель на основі експериментальних даних, оскільки єдиної універсальної моделі для дизелів не існує.

## **1.2. Аналіз досліджень автоматичних систем регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля**

Управління частотою обертання колінчастого вала дизеля здійснюється через регулювання процесу паливоподачі. Для підвищення ефективності роботи дизеля, зменшення токсичності відпрацьованих газів та поліпшення паливної економічності, система управління паливоподачею повинна забезпечувати оптимальні характеристики циклової подачі палива. Робота двигуна з прийнятним коефіцієнтом надлишку повітря, високою паливною економічністю та допустимими екологічними показниками забезпечується реалізацією раціональних законів управління [6].

Аналіз даних [6] показує, що при формуванні базових характеристик автомобільного дизеля необхідно забезпечувати правильну форму зовнішньої швидкісної характеристики. Додатково, режим роботи дизеля обмежують головна регуляторна характеристика та регуляторні характеристики мінімальної частоти обертання.

Виходячи з експлуатаційних вимог до швидкісних і навантажувальних режимів дизеля, обирають відповідний тип системи регулювання. Засоби регулювання та вимоги до керованих параметрів залежать від типу системи паливоподачі.

Згідно з теорією автоматичного регулювання дизельних двигунів, розрізняють однорежимні, дворежимні та всережимні регулятори.

**Дворежимні регулятори** забезпечують стійку роботу на холостому ході та обмежують подачу палива при підвищенні частоти обертання колінчастого вала за межі робочого діапазону. У решті швидкісного діапазону подача палива контролюється водієм. Часткові регуляторні характеристики близькі до

горизонтальних. Недоліком дворежимного регулювання є ускладнене керування у неусталених режимах та можливе виникнення нестійкості при низьких частотах обертання.

**Всережимні регулятори** дозволяють підтримувати задану частоту обертання колінчастого вала на постійному рівні. Часткові регуляторні характеристики мають вигляд прямих з кутом нахилу близьким до  $90^\circ$ . Кут нахилу визначає стійкість регулятора, а недоліком є ймовірність виходу дизеля на зовнішню швидкісну характеристику при різкій зміні навантаження. Всережимні регулятори поділяють на такі, що використовують попередньо задані положення керуючих елементів, та на регулятори зі змінним положенням органа управління паливоподачею.

**Трирежимні регулятори** є компромісним варіантом між дворежимним та всережимним регулюванням і мають пологі проміжні регуляторні криві.

За типом чутливого елемента регулятори можуть бути механічними, пневматичними, гідравлічними, електричними або електронними. За наявністю посилення дії на орган управління паливоподачею виділяють регулятори прямої та непрямої дії. Найбільше поширення отримали механічні регулятори прямої дії.

Вхідним сигналом механічного регулятора є частота обертання кулачкового вала ПНВТ. Чутливими елементами слугують тягарці, які під дією відцентрових сил переважають зусилля пружин і через систему важелів впливають на положення рейки паливного насоса, визначаючи циклову подачу палива. Необхідні регуляторні характеристики формуються підбором маси чутливих елементів та використанням набору пружин з різними попередньо заданими деформаціями.

Для покращення статичних та динамічних характеристик механічних регуляторів автотракторних дизелів застосовують коригуючі зв'язки, додаткові імпульси за навантаженням або за похідною від регульованого параметра. На кафедрі двигунів та теплотехніки НТУ були розроблені автономні паралельні коригуючі приставки до серійних регуляторів, що дозволяють підвищити точність регулювання та надійність роботи.

У дизелях з нерегульованим газотурбінним наддувом для підтримки стабільності процесу та обмеження температурного режиму деталей поршневої групи використовують пневматичні негативні коректори паливоподачі, що

особливо актуально для автомобільних і тракторних дизелів.

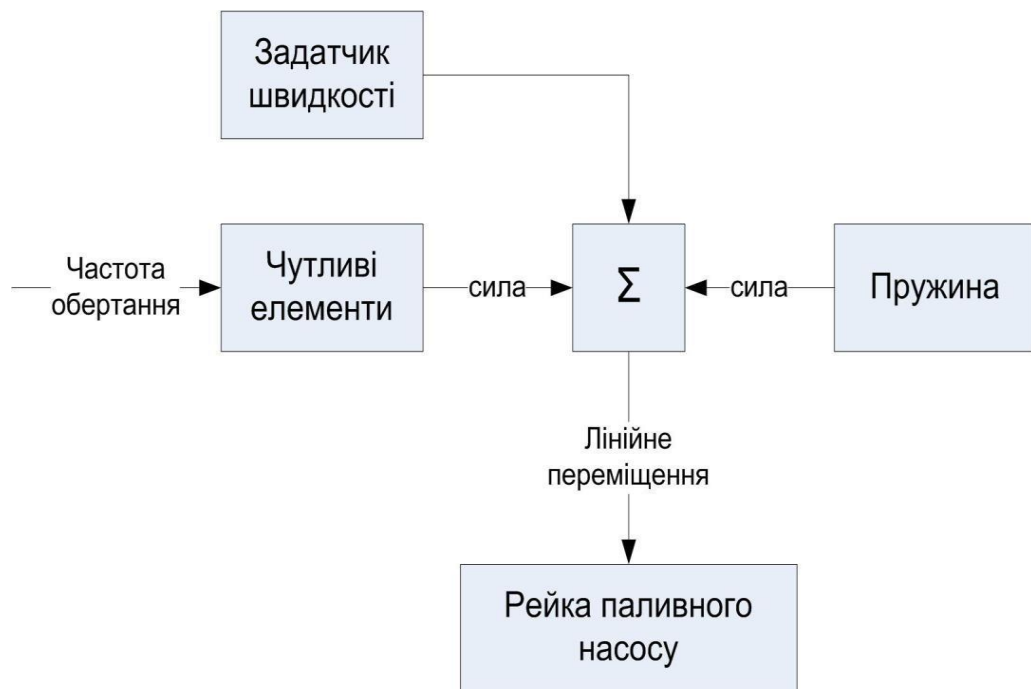


Рисунок 1.2 – Узагальнена функціональна схема регулятора прямої дії з механічним чутливим елементом

### Пневматичні та гідравлічні регулятори паливоподачі дизеля

Пневматичні негативні коректори (НК) призначені для зменшення подачі палива при зниженні тиску наддуву від турбокомпресора. Чутливим елементом НК є діафрагма, яка деформується під впливом різниці між тиском наддуву та опорним атмосферним тиском.

Механічні регулятори мають перевагу у відносній простоті виробництва та перевірності часом завдяки великій кількості моделей, які пройшли практичну експлуатацію. Недоліками механічних схем є велика кількість шарнірних з'єднань у системі важелів, необхідність періодичних регулювань, а також ускладнення конструкції при реалізації складних алгоритмів регулювання, що знижує надійність. З часом характеристики пружин змінюються, що потребує повторного налаштування регулятора.

Гідравлічні регулятори частоти обертання колінчастого вала перетворюють кінетичну енергію вихідного параметра (частоту обертання колінчастого вала) у потенціальну енергію робочої рідини, яка через гідропривід переміщує рейку

ПНВТ. Перетворення фізичних величин здійснюється насосом, що приводиться від колінчастого вала, а тиск рідини залежить від частоти обертання. У якості робочої рідини використовують оливу або дизельне паливо. Зміни тиску робочої рідини впливають на циклову подачу палива, а режим регулювання обирається органом управління дизелем.

Недоліком гідравлічних регуляторів є залежність регуляторних характеристик від фізичних властивостей робочої рідини (в'язкість, густина), що змінюються в умовах експлуатації. Для подолання цього недоліку до конструкції вводять коригуючі елементи.

У гідравлічному регуляторі з тягарцем та золотником регулюючим параметром залишається тиск робочої рідини. Його значення змінює механічний регулятор, який коригує ефективний прохідний переріз трубопроводу, змінюючи тиск у поршні гідропривода. Вхідним параметром є частота обертання колінчастого вала, а керуючий сигнал подається через попередню деформацію зворотної пружини, що робить процес регулювання незалежним від фізичних властивостей рідини.

Суттєвим обмеженням гідравлічних регуляторів є неможливість введення інтегральної та диференціальної складових у закон регулювання, а також їхня чутливість до якості робочої рідини.

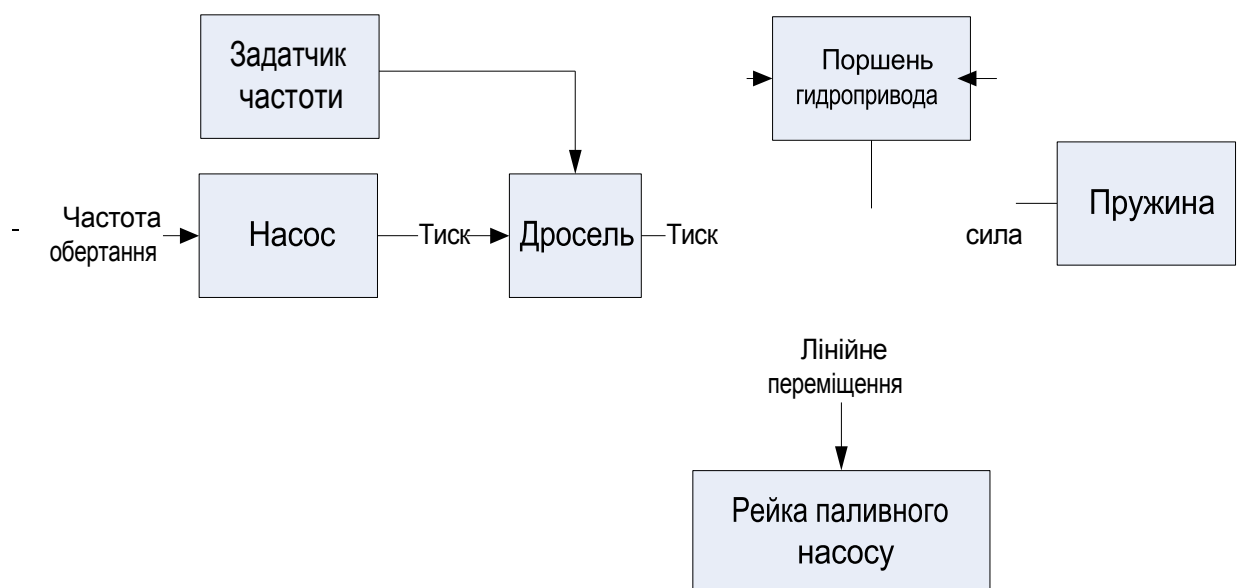


Рисунок 1.3 – Узагальнена функціональна схема гідравлічного регулятора частоти обертання колінчастого вала

В пневматичних регуляторах вхідним сигналом є розрідження у впускному колекторі дизеля. Це розрідження збільшується одночасно зі зростанням частоти обертання колінчастого вала. Пневматичні регулятори застосовували на автомобільних дизелях без турбонадуву для забезпечення стабільної роботи двигуна в різних швидкісних режимах.

На рис. 1.4 наведена узагальнена функціональна схема пневматичного регулятора частоти обертання колінчастого вала дизеля, що відображає принцип дії та основні елементи регулюючого пристрою.

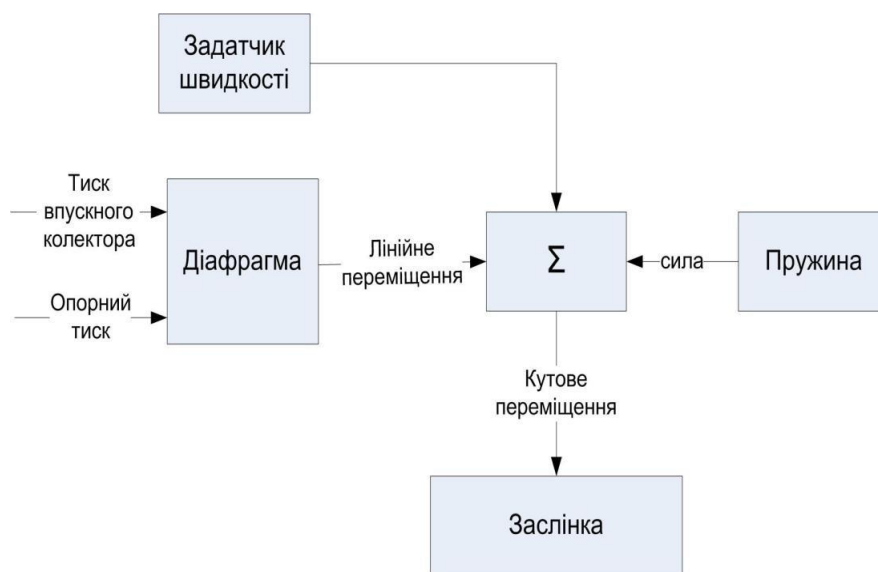


Рисунок 1.4 – Узагальнена функціональна схема пневматичного регулятора частоти обертання колінчастого вала

У пневматичних регуляторах різниця між тиском у впускному колекторі та опорним заданим тиском деформує діафрагму. Ця деформація переміщує рейку паливного насоса високого тиску (ПНВТ), регулюючи циклову подачу палива. Вибір режиму регулювання здійснюється за допомогою повітряної заслінки, встановленої у впускному колекторі. Зі зменшенням ефективного перерізу трубопроводу вхідного колектора зменшується частота обертання, при якій обмежується подача палива.

До переваг пневматичних регуляторів відносять конструктивну простоту. Вони застосовувалися, зокрема, на автомобілях Mercedes-Benz з дизелями шостої серії OM із вихровою камерою згорання та дворегимним регулюванням. Недоліками є необхідність створення додаткового гідравлічного опору у впускному колекторі, складність підтримання стабільного регулювання та обмежені можливості введення інтегральних і диференціальних складових закону регулювання.

В електричних регуляторах перетворення вхідного сигналу в зміну вихідного сигналу здійснюється у вигляді цифрових значень. На рис. 1.5 показана одна з можливих функціональних схем електричного регулятора частоти обертання колінчастого вала дизеля.

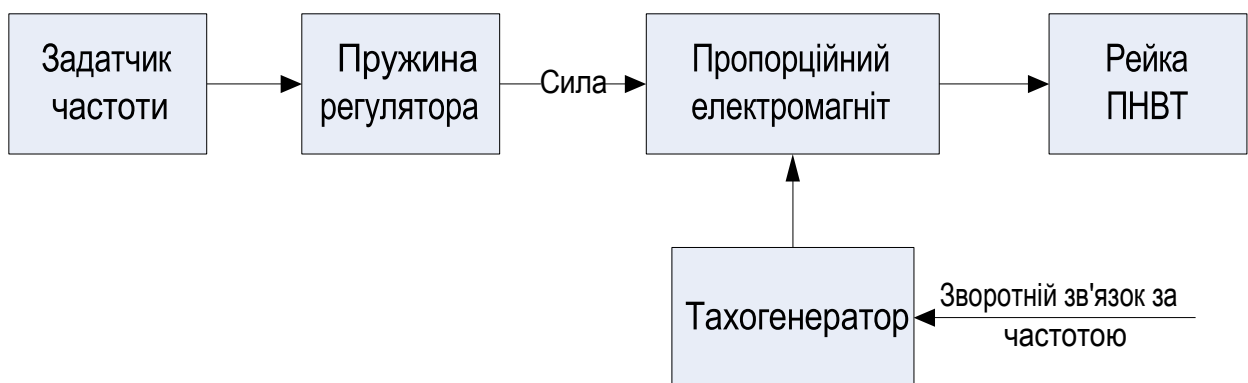


Рисунок 1.5 – Узагальнена функціональна схема електричного регулятора частоти обертання колінчастого вала

Електричні регулятори частоти обертання колінчастого вала дизеля відносяться до регуляторів непрямої дії. Вхідним сигналом у таких системах є частота обертання колінчастого вала, яка за допомогою тахогенератора перетворюється на електричну величину — напругу. В якості виконавчого механізму зазвичай використовується пропорційний електромагніт або

електродвигун, що переміщує рейку паливного насоса високого тиску.

Зміна режиму регулювання може здійснюватися двома способами: через попередню деформацію зворотної пружини виконавчого механізму або шляхом регулювання напруги живлення за допомогою реостату. Схеми електричних регуляторів можуть значно відрізнятися залежно від використаних компонентів та способу перетворення сигналів двигуна на електричні та зворотно. Такі регулятори застосовувалися на дизель-електричних установках.

Електронні регулятори є логічним продовженням електричних. Вони містять електронний блок управління, що дозволяє реалізовувати більш складні закони регулювання без істотного ускладнення механічних елементів. Завдяки цьому можливо враховувати безліч факторів, що впливають на роботу дизеля, таких як температура двигуна, температура повітря та навантаження.

Електронні регулятори можуть бути аналоговими або цифровими. В аналогових вихідний закон формується безперервно, на основі сигналів датчиків, тоді як цифрові системи перетворюють вхідні сигнали в цифрову форму для обробки мікропроцесором.

Серед переваг електронних регуляторів:

усунення нерівномірності кута нахилу регуляторної гілки залежно від частоти обертання колінчастого вала;

стабільна робота дизеля на низьких частотах;

можливість введення інтегральної та диференціальної складових без конструктивних ускладнень;

підвищення паливної економічності та екологічних характеристик.

Недоліки: висока вартість, складність налаштування та закритість алгоритмів програмного забезпечення.

Для регулювання частоти обертання колінчастого вала широко застосовуються ПІД-регулятори, які включають пропорційну (П), інтегральну (І) та диференціальну (Д) складові. Вони дозволяють гнучко налаштовувати параметри системи для забезпечення оптимальної роботи дизеля. Проте багато аспектів впливу конструкції виконавчого механізму на ПІД-параметри залишаються дослідженими недостатньо.

Дослідження в галузі всережимного електронного регулювання виконували

такі науковці: П.І. Андрусенко, К.Є. Долганов, Ю.Ф. Гутаревич, А.Г. Говорун, А.Ф. Головчук, А.С. Жерновий, І.Є. Каньковський, В.І. Мельниченко, В.І. Захарчук, В.Г. Лясковський. Встановлено, що всережимні регулятори підвищують стабільність підтримання заданої частоти обертання, але в умовах перехідних процесів можуть збільшувати витрату палива через вихід рейки ПНВТ на зовнішню швидкісну характеристику.

Переваги електронних всережимних регуляторів над механічними, гідравлічними та пневматичними системами полягають у:

- непрямій дії, що усуває залежність кута нахилу регуляторної гілки від швидкості обертання;
- стабільній роботі дизеля на низьких частотах;
- можливості введення ПД-компонентів для покращення перехідних процесів;
- оптимізації паливної економічності та зменшення шкідливих викидів.

Механічні та гідравлічні регулятори обмежені фізичними характеристиками компонентів та зміною властивостей робочих рідин, що ускладнює точне регулювання та знижує надійність у тривалому експлуатаційному циклі. Використання електронного регулятора дозволяє компенсувати недоліки механічних систем, підвищити точність управління та знизити витрати палива за умов нестабільних режимів.

Висновок: електронні регулятори частоти обертання колінчастого вала дизеля, особливо з всережимним алгоритмом та ПД-компонентами, є сучасним і ефективним рішенням для автотракторних дизелів, забезпечуючи високу точність, стабільність і економічність роботи двигуна.

### **1.3. Аналіз складових електронної системи регулювання дизеля**

Дослідження та вдосконалення електронних регуляторів можна умовно розділити на три основні напрямки:

1. Розробка алгоритмів управління, що реалізуються електронними регуляторами;
2. Покращення існуючих виконавчих механізмів;
3. Створення надійних і доступних датчиків для використання в системах

управління.

Сьогодні світова автомобільна промисловість пропонує широкий асортимент датчиків, які можуть ефективно застосовуватися разом із електронними регуляторами. Методи вдосконалення алгоритмів роботи регулятора обираються залежно від експлуатаційного призначення дизеля та його режимів роботи.

Для наочності розроблено узагальнену функціональну схему сучасного електронного регулятора дизеля з паливним насосом високого тиску (ПНВТ), яка наведена на рис. 1.6.

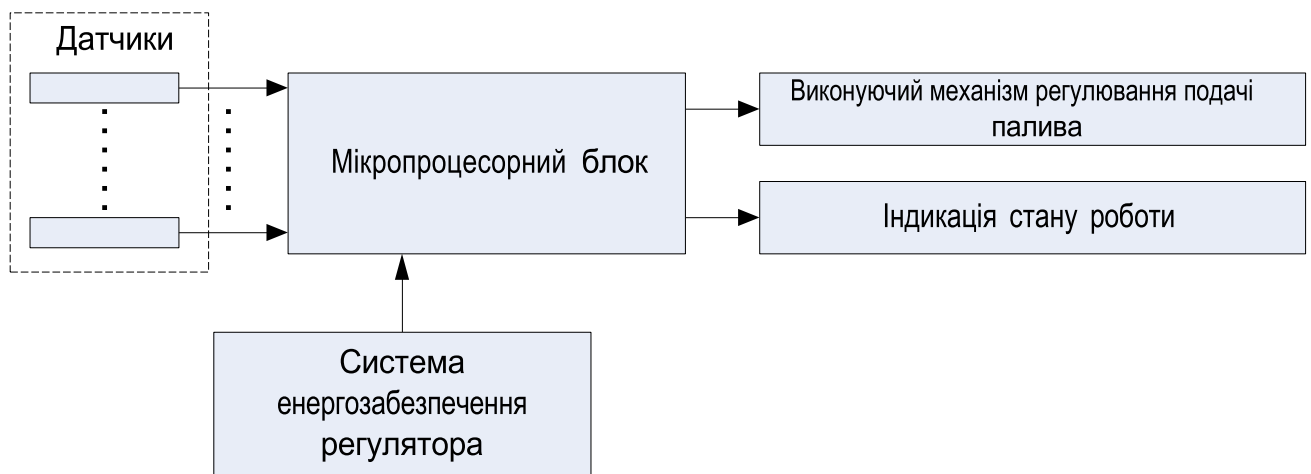


Рисунок 1.6 – Узагальнена функціональна схема електронного регулятора дизеля з ПНВТ

Електронний регулятор включає мікропроцесорний блок, систему датчиків, виконавчий механізм для керування подачею палива, індикатори стану роботи та систему живлення.

Основними функціями мікропроцесорного блоку є:

- обчислення необхідних значень положення виконавчих механізмів на основі сигналів від датчиків;
- перетворення вхідних аналогових сигналів у цифрову форму;
- формування сигналів індикації стану регулятора;
- виконання самодіагностики системи.

Розроблена узагальнена структурна схема мікропроцесорного блоку наведена на рис. 1.7. Блок складається з цифрового процесора, оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП), постійного запам'ятовуючого пристрою

(ПЗП), аналого-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів, портів введення та виведення сигналів, а також джерела живлення з запобіжниками.

Кількість та тип вхідних сигналів, що обробляє мікропроцесорний блок, визначаються розробленим алгоритмом регулятора. Деякі датчики формують вихідний сигнал у вигляді зміни струму, напруги або опору. Для обробки таких аналогових сигналів блок оснащено АЦП. Вхідними сигналами для ряду виконавчих електромагнітних механізмів є сила струму, тому для управління цими пристроями блок містить ЦАП для перетворення цифрових сигналів у керуючі електричні величини.

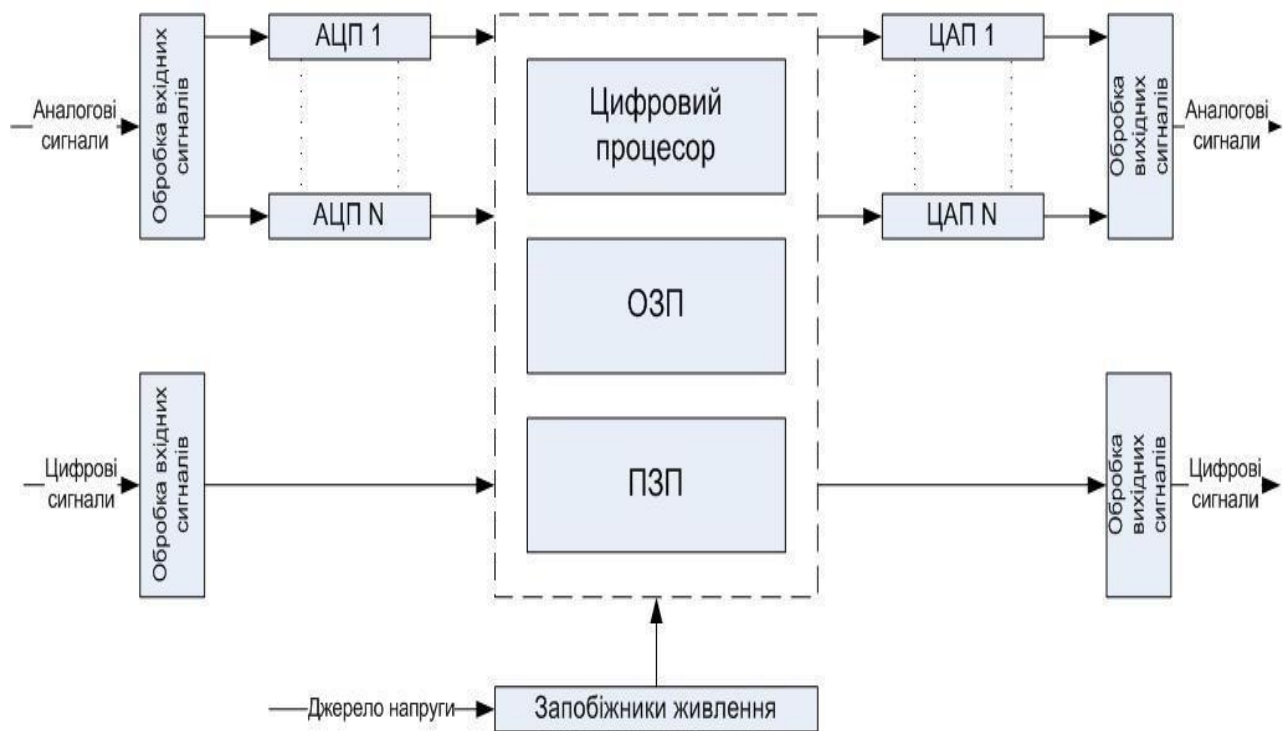


Рисунок 1.7 – Структура мікропроцесорного блоку

Кількість аналого-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів визначається відповідно до числа завдань, які має виконувати система регулювання. Мінімальна кількість АЦП для електронного регулятора САРЧ дизеля приймається рівною чотирьом. АЦП застосовуються для переведення сигналів від аналогових датчиків у цифрову форму, тоді як ЦАП формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів і сигнали індикації стану роботи.

Дослідження показали, що сучасні мікропроцесорні регулятори (MP) потребують мінімального набору датчиків, які забезпечують обробку таких сигналів: положення педалі управління подачею палива (цифрова педаль), частота обертання колінчастого вала, зворотний зв'язок за положенням рейки ПНВТ, сигнал увімкнення стартера, сигнал зупинки двигуна, температура охолоджуючої рідини, температура навколишнього повітря, температура оливи, тиск оливи та тиск наддуву. Загальна кількість зовнішніх сигналів становить 10.

Індикація стану роботи регулятора може суттєво відрізнитися залежно від вимог виробника транспортного засобу. Для забезпечення універсальної діагностики на етапі випробувань розробляють програмний діагностичний комплекс, який підключається до персонального комп'ютера. Найбільш зручними для комунікації з MP є інтерфейси USB та RS-232. Під час експлуатації система регулювання повинна забезпечувати визначення справності мікропроцесорного блоку без спеціалізованого діагностичного обладнання, наприклад, за допомогою світлодіодних індикаторів.

Сучасні транспортні засоби часто оснащуються бортовими комп'ютерами, і електронний регулятор знаходиться на нижчому ієрархічному рівні. Частина сигналів може надходити від бортового комп'ютера, а не безпосередньо від датчиків. Тому до мікропроцесорного блоку висувуються вимоги щодо сумісності з бортовим комп'ютером, наявності цифрових входів і аналогових виходів для забезпечення автоматизації роботи системи та зворотного зв'язку.

Система живлення регулятора формується від штатних акумуляторів постійного струму транспортного засобу з запобіжниками, що захищають від перевищення напруги. Для автотракторних дизелів напруга живлення становить 12 В або 24 В постійного струму.

Виконавчі механізми, що переміщують рейку ПНВТ, можуть бути електромагнітними або електрогідравлічними. В електромагнітних механізмах переміщення рейки здійснюється силою електромагніту. Такі механізми можуть бути представлені у вигляді поступального пропорційного електромагніту (вихідний важіль підключено безпосередньо до рейки ПНВТ) або обертового пропорційного електромагніту (вихідний вал електромагніту через важіль зв'язаний із рейкою ПНВТ).

В електрогідравлічних механізмах рух рейки ПНВТ забезпечується тиском робочої рідини (паливо або олива), керованої електрично-контрольованими перепускними клапанами. Виконавчі механізми оснащено датчиками зворотного зв'язку за положенням рейки.

Аналіз сучасних систем виконавчих механізмів показав, що швидкохідні багатополюсні електродвигуни постійного струму у складі сервоприводу можуть ефективно застосовуватися в мікропроцесорних регуляторах частоти обертання колінчастого вала дизеля.

#### **1.4. Задачі дослідження електронної САРЧ для автомобільного дизеля**

Кількість аналого-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів визначається відповідно до числа завдань, які має виконувати система регулювання. Мінімальна кількість АЦП для електронного регулятора САРЧ дизеля приймається рівною чотирьом. АЦП застосовуються для переведення сигналів від аналогових датчиків у цифрову форму, тоді як ЦАП формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів і сигнали індикації стану роботи.

Дослідження показали, що сучасні мікропроцесорні регулятори (МР) потребують мінімального набору датчиків, які забезпечують обробку таких сигналів: положення педалі управління подачею палива (цифрова педаль), частота обертання колінчастого вала, зворотний зв'язок за положенням рейки ПНВТ, сигнал увімкнення стартера, сигнал зупинки двигуна, температура охолоджуючої рідини, температура навколишнього повітря, температура оливи, тиск оливи та тиск наддуву. Загальна кількість зовнішніх сигналів становить 10.

Індикація стану роботи регулятора може суттєво відрізнитися залежно від вимог виробника транспортного засобу. Для забезпечення універсальної діагностики на етапі випробувань розробляють програмний діагностичний комплекс, який підключається до персонального комп'ютера. Найбільш зручними для комунікації з МР є інтерфейси USB та RS-232. Під час експлуатації система регулювання повинна забезпечувати визначення справності мікропроцесорного блоку без спеціалізованого діагностичного обладнання, наприклад, за допомогою

світлодіодних індикаторів.

Сучасні транспортні засоби часто оснащуються бортовими комп'ютерами, і електронний регулятор знаходиться на нижчому ієрархічному рівні. Частина сигналів може надходити від бортового комп'ютера, а не безпосередньо від датчиків. Тому до мікропроцесорного блоку висувуються вимоги щодо сумісності з бортовим комп'ютером, наявності цифрових входів і аналогових виходів для забезпечення автоматизації роботи системи та зворотного зв'язку.

Система живлення регулятора формується від штатних акумуляторів постійного струму транспортного засобу з запобіжниками, що захищають від перевищення напруги. Для автотракторних дизелів напруга живлення становить 12 В або 24 В постійного струму.

Виконавчі механізми, що переміщують рейку ПНВТ, можуть бути електромагнітними або електрогідравлічними. В електромагнітних механізмах переміщення рейки здійснюється силою електромагніту. Такі механізми можуть бути представлені у вигляді поступального пропорційного електромагніту (вихідний важіль підключено безпосередньо до рейки ПНВТ) або обертового пропорційного електромагніту (вихідний вал електромагніту через важіль зв'язаний із рейкою ПНВТ).

В електрогідравлічних механізмах рух рейки ПНВТ забезпечується тиском робочої рідини (паливо або олива), керованої електрично-контрольованими перепускними клапанами. Виконавчі механізми оснащено датчиками зворотного зв'язку за положенням рейки.

Аналіз сучасних систем виконавчих механізмів показав, що швидкохідні багатополосні електродвигуни постійного струму у складі сервоприводу можуть ефективно застосовуватися в мікропроцесорних регуляторах частоти обертання колінчастого вала дизеля.

## **Висновки до розділу 1**

1. Проведений аналіз різних типів автоматичних систем регулювання дизельних двигунів показав доцільність застосування електронних регуляторів. Встановлено, що електронні регулятори мають ряд переваг порівняно з механічними, гідравлічними та пневматичними системами: вони є регуляторами

непрямої дії, що дозволяє уникнути зміни кута нахилу регуляторної гільки залежно від швидкісного режиму. Відсутність прямої залежності корегуючої сили від частоти обертання колінчастого вала забезпечує більш стабільну роботу двигуна на низьких швидкостях. Крім того, електронні регулятори дозволяють без конструктивних ускладнень вводити інтегральну та диференціальну складові в закон регулювання.

2. Для теоретичних і експериментальних досліджень обрана мікропроцесорна система регулювання, яка відповідає наступним вимогам: забезпечує всережимний алгоритм керування дизелем та реалізує ПІД-алгоритм регулювання. Система складається з мікропроцесорного блоку, виконавчого механізму та цифрової педалі управління.

3. Аналіз наявних досліджень показав, що складові електронної САРЧ повинні відповідати таким технічним характеристикам:

- Мікропроцесорний блок оснащений необхідною кількістю аналогових і цифрових входів та виходів (мінімум: аналогових входів – 5, цифрових входів – 5, аналогових виходів – 1, цифрових виходів – 1);
- Виконавчий механізм призначений для керування рейкою рядного паливного насоса і обладнаний зворотним зв'язком щодо положення рейки;
- Педаль управління транспортного засобу формує електричний аналоговий сигнал як вихідну координату;
- Система регулювання оснащена цифровими входами і виходами для реалізації автоматизації робочих процесів автотранспортного засобу;
- Присутній інтерфейс для підключення діагностичних комплексів і індикація режимів роботи.

4. Основним завданням дослідження є визначення впливу ПІД-параметрів регулювання на роботу автотракторного дизеля, обладнаного електронним всережимним регулятором частоти обертання. Мета полягає у встановленні рекомендованих значень ПІД-параметрів для різних швидкісних та навантажувальних режимів з метою оптимізації роботи двигуна як у статичних, так і в динамічних режимах.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ ВСЕРЕЖИМНОЇ САРЧ ДИЗЕЛЯ З ПІД-ЗАКОНОМ УПРАВЛІННЯ

#### 2.1. Розробка структурної схеми

На основі аналізу узагальненої функціональної схеми електронного регулятора дизеля (п. 1.3, рис. 1.1) були виділені основні компоненти структурної схеми.

До аналогових сигналів, що надходять на обробку мікропроцесорного блоку, віднесено: сигнал від задатчика частоти обертання колінчастого вала (цифрова педаль управління), датчик частоти обертання колінчастого вала дизеля, датчик зворотного зв'язку за положенням виконавчого механізму, датчик температури двигуна та датчик тиску оливи.

Цифрові сигнали, що обробляються мікропроцесорним блоком, включають: сигнал дозволу роботи, сигнал від аварійного датчика температури охолоджуючої рідини та сигнал від аварійного датчика тиску оливи. Сигнал керування виконавчим механізмом є аналоговим і формується на виході мікропроцесорного блоку.

На основі узагальненої функціональної схеми (рис. 1.6) була розроблена деталізована структурна схема всережимного електронного регулятора САРЧ дизеля, яка наведена на рис. 2.1. Аналіз цієї схеми дозволив визначити необхідні складові елементи системи регулювання.

Встановлення електронної САРЧ на колісному транспортному засобі дає можливість використовувати штатні датчики аварійних ситуацій за температурою охолоджуючої рідини та тиском оливи двигуна. Джерелом живлення для електронних компонентів системи служать штатні акумулятори транспортного засобу, при цьому напруга живлення системи регулювання становить 12 В. Для інтеграції САРЧ у загальну систему контролю та автоматизації транспортного засобу передбачені цифрові сигнали дозволу роботи регулятора та індикації його стану.

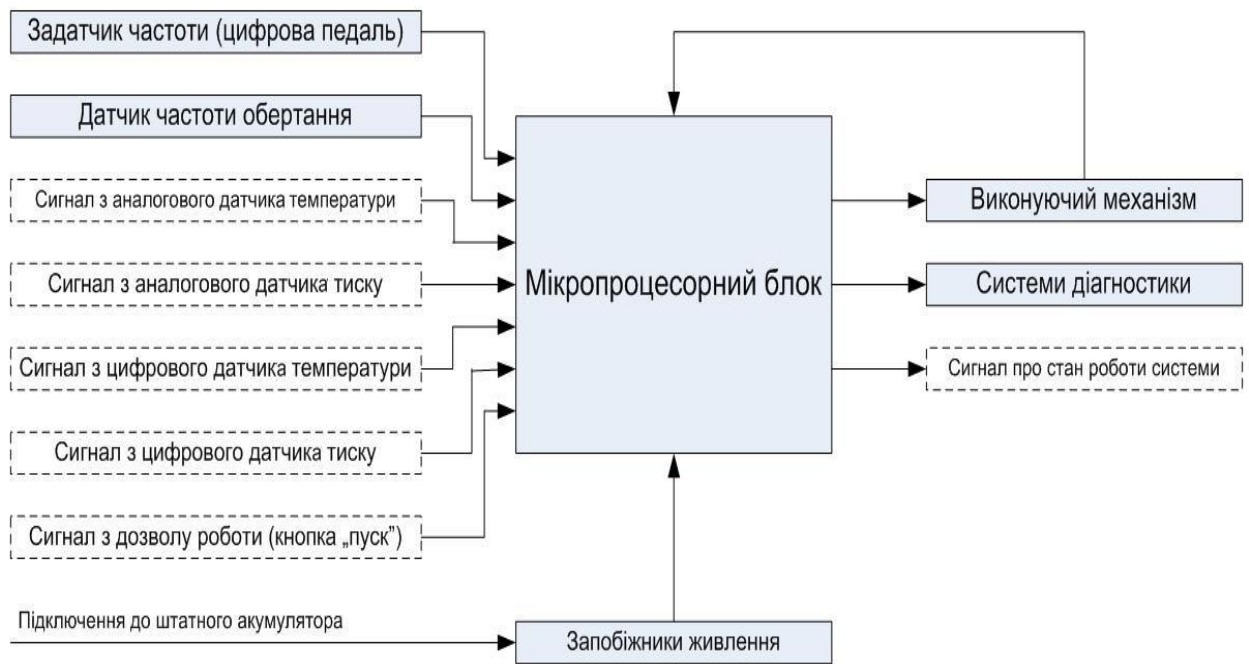


Рисунок 2.1 – Структурна схема електронного всережимного регулятора САРЧ дизеля

До складу електронної САРЧ, призначеної для установки на автотранспортному засобі, входять такі компоненти: мікропроцесорний блок, задавач частоти обертання (електронна педаль), датчик частоти обертання колінчастого вала двигуна, запобіжник живлення системи енергопостачання та виконавчий механізм.

## 2.2. Обґрунтування введення ПД-закону управління в електронну САРЧ дизеля

Аналіз структурної схеми (рис. 2.1) показав, що електронна САРЧ є регулятором непрямої дії. Єдина механічна складова системи – це виконавчий механізм (ВМ) та його механічне з'єднання з рейкою паливного насоса високого тиску (ПНВТ). У розділі 1 було обґрунтовано вибір електромагнітного ВМ. Для зменшення тривалості перехідних процесів доцільно застосовувати ПД-регулювання не по частоті обертання колінчастого вала, а за положенням рейки ВМ.

Дизельна установка є сильно інерційною ланкою САРЧ: зміни циклової подачі палива призводять до змін частоти обертання колінчастого вала з затримкою в секунди, тоді як зміни струму живлення ВМ впливають на положення рейки ПНВТ за долі секунди. Таким чином, час відгуку у ланці «мікропроцесорний блок – ВМ» значно менший за час відгуку у ланці «ПНВТ – дизель». Це дозволяє застосовувати високі значення пропорційної складової без ризику виникнення автоколиваний у системі.

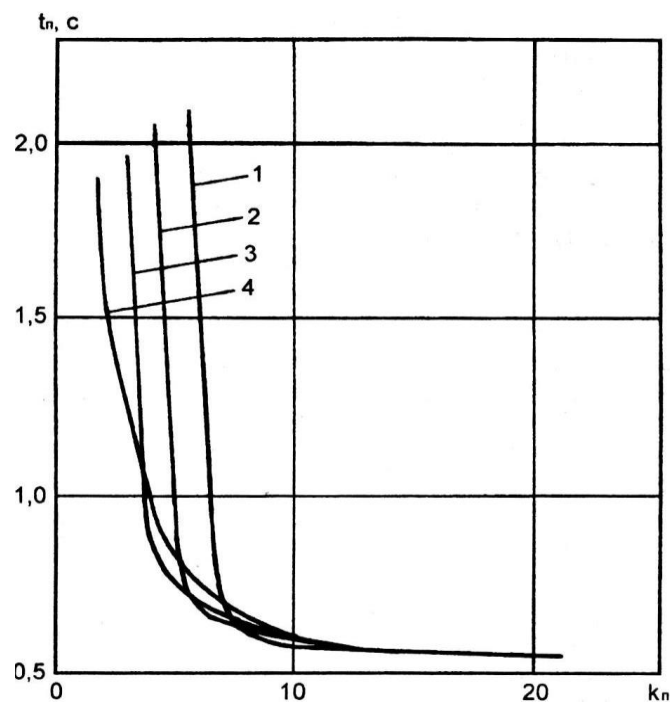


Рисунок 2.2 – Залежність часу переходного процесу дизеля 6ЧН15/18 від коефіцієнта  $k_n$  при:

$$1 - k_n = 0; 2 - k_n = 0,5; 3 - k_n = 1; 4 - k_n = 2.$$

### 2.3. Виконавчий механізм і зворотній зв'язок

У пункті 1.3 обґрунтовано вибір електромагнітного виконавчого механізму (ВМ) для електронної САРЧ. Значення коефіцієнта  $k_{Pk\_PkP}$  визначає швидкодію ВМ, причому параметром, що обмежує швидкодійність, є максимальна потужність ВМ. Згідно з проведеними дослідженнями, потужність електродвигуна ВМ була обрана таким чином, щоб забезпечити прикладання до рейки ПНВТ мінімального зусилля не менше 0,4 Н на одну секцію ПНВТ.

Встановлення датчика зворотного зв'язку безпосередньо на рейку штатного

ПНВТ вважається недоцільним. Зворотний зв'язок інтегровано безпосередньо у конструкцію ВМ, що дозволяє уникнути значних змін у конструкції паливної апаратури існуючих транспортних засобів та спрощує проведення діагностичних процедур на неробочому двигуні. Конструкція ВМ із вбудованим датчиком зворотного зв'язку представлена на рис. 2.3.

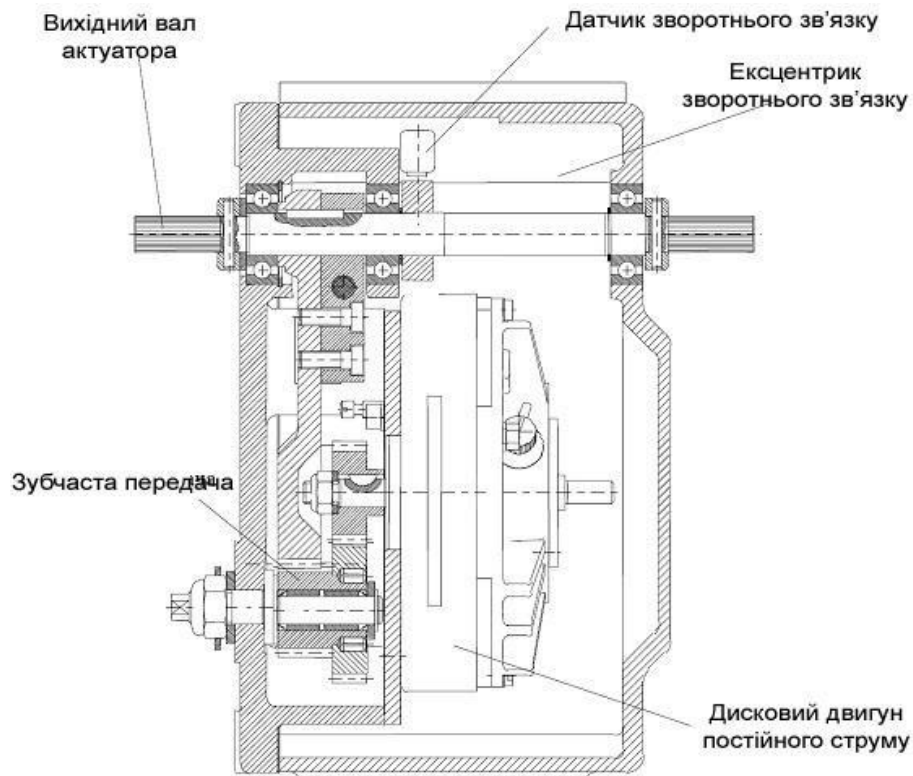


Рисунок 2.3 – Конструкція ВМ з встановленим датчиком зворотного зв'язку

Виконавчий механізм розміщено в алюмінієвому корпусі з захистом від пилу та бруду. Він побудований на основі дискового двигуна постійного струму, який через редукційну шестеренну передачу обертає вихідний вал. На валу встановлена ексцентрична пластина, обертання якої змінює відстань до датчика зворотного зв'язку, що, у свою чергу, викликає зміну вихідного сигналу датчика.

#### **2.4. Технічні параметри та конструкція експериментальної всережимної САРЧ дизеля**

Розроблено експериментальний варіант електронної всережимної системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчастого вала (САРЧ) для автомобільного дизеля 4СН12/14. Основні структурні елементи цього мікропроцесорного регулятора базуються на компонентах фірми Heinzmann, що

було обрано з огляду на їх відповідність завданням дослідження. Серія електронних регуляторів Pandaros від Heinzmann призначена для контролю частоти обертання двигуна. Додаткові функції регулятора включають: налаштування стартової подачі палива, регулювання швидкості зміни частоти обертання, всережимне управління частотою обертання, встановлення діапазону обертів, захист від перевищення обертів, корекцію ПІД-параметрів, обмеження подачі палива залежно від частоти колінчастого вала, регулювання частоти холостого ходу за температурою охолоджуючої рідини, а також діагностику та перегляд помилок.

Налаштування стартової подачі палива: дозволяє встановлювати мінімальне та максимальне значення циклової подачі. При потребі стартова подача може залежати від температури двигуна. Доступний режим автоматичного збільшення стартової подачі під час запуску дизеля.

Регулювання темпу зміни частоти обертання: передбачає можливість обмеження швидкості зміни частоти при зміні задаючих значень, що особливо важливо для транспортних засобів. Для запуску двигуна можна задати окремий темп, що забезпечить повільне збільшення частоти обертання.

Всережимне управління частотою обертання з регульованою зоною пропорційного регулювання (ЗПР): дозволяє отримати астатичну регуляторну характеристику при налаштуванні ЗПР на 0.

Установка діапазону частоти обертання: мінімальна і максимальна частоти обертання задаються зовнішнім пристроєм у цифровій формі.

Захист від перевищення частоти обертання: контролюється електронним блоком; при перевищенні допустимих значень система видає сигнал тривоги та переводить актуатор у положення зупинки.

Корекція ПІД-параметрів: забезпечує оптимізацію динамічних характеристик дизеля та перехідних процесів. Параметри ПІД можна корегувати для кожної робочої точки залежно від частоти обертання та навантаження.

Обмеження подачі палива за частотою колінчастого вала: дозволяє запрограмувати криві обмеження подачі палива для всього діапазону частот відповідно до режиму роботи дизеля.

Регулювання холостого ходу за температурою охолоджуючої рідини: при низьких температурах дизель може стартувати на вищій частоті холостого ходу, а після прогрівання двигуна вона зменшується до номінального значення. Криві обмеження подачі палива також корегуються залежно від температури.

Діагностика та перегляд помилок: у випадку несправності датчиків або ВМ, система переходить на аварійний режим або зупиняє дизель. Всі внутрішні та зовнішні помилки зберігаються і можуть переглядатися за допомогою ручного програматора, вбудованого програматора або персонального комп'ютера через спеціальне програмне забезпечення.

Для проведення безмоторних випробувань експериментальна САРЧ включала: датчик частоти вала ПНВТ, мікроконтролер з програмним забезпеченням для реалізації алгоритму управління та електромеханічний виконуючий механізм (ВМ).

В якості мікроконтролера використано електронний блок Pandaros (рис. 2.4), а для ВМ – актуатор StG 2010-01. Датчик частоти вала ПНВТ представлений сенсором Холла серії IA 03-102.

Виконавчий механізм StG 2010-01 побудований на базі електродвигуна постійного струму в герметичному корпусі. У конструкції не застосовано редуктор; вал двигуна одночасно є валом ВМ. На валу закріплена металева пластина, яка під час обертання змінює положення щодо датчика зворотного зв'язку, формуючи сигнал про позицію рейки.

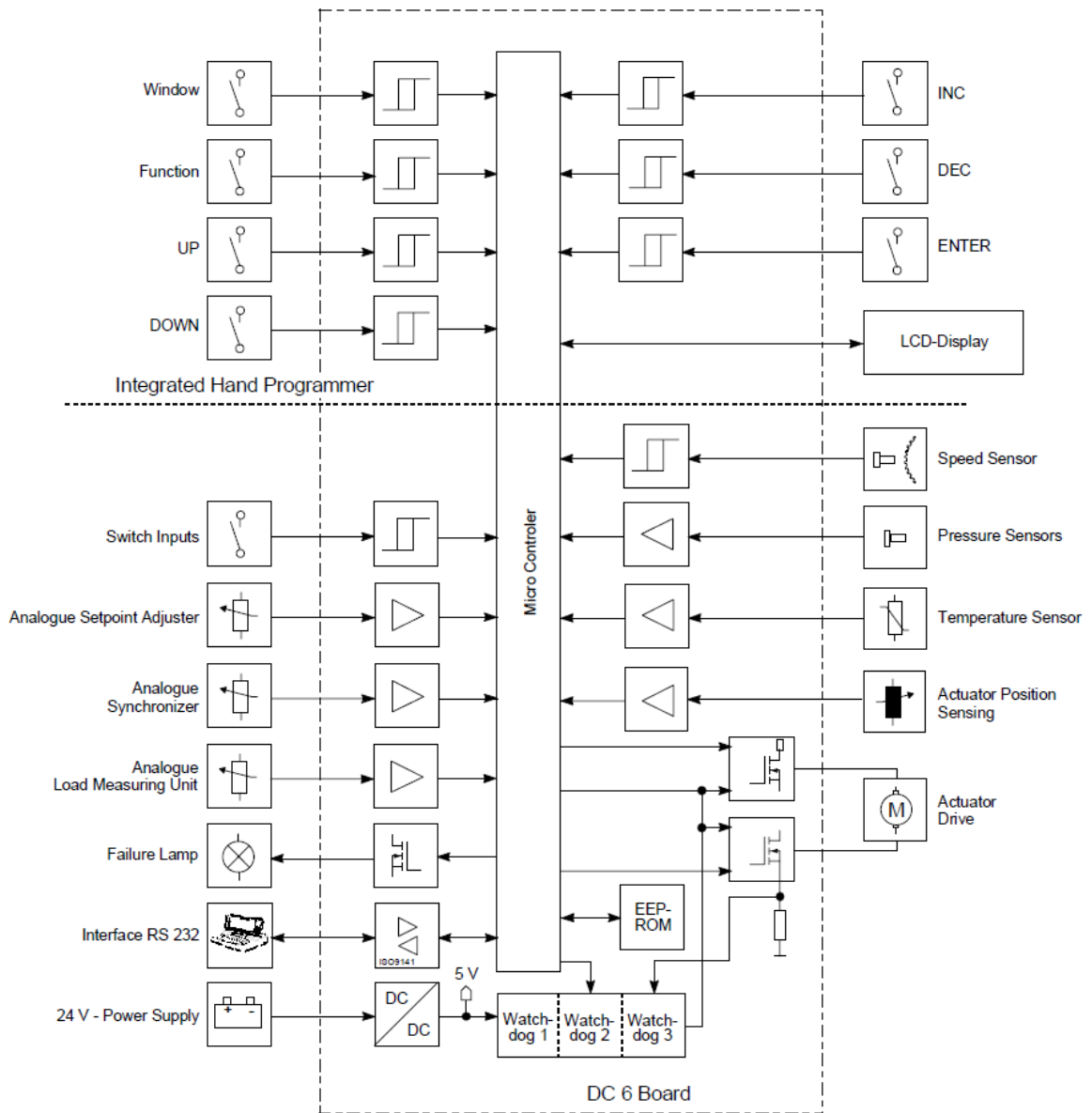


Рисунок 2.4 – Структурна схема електронного блоку керування Pandaros

На корпусі виконуючого механізму (ВМ) встановлено індуктивний датчик, який реагує на відстань до рухомої пластини. Форма цієї пластини підібрана так, щоб при рівномірному обертанні вала ВМ зміна відстані між пластинною та індуктивним датчиком відбувалася лінійно. Сигнал, що формується індуктивним датчиком, використовується як сигнал зворотного зв'язку для визначення положення вала ВМ. Керування електродвигуном здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) струму живлення.

Технічні характеристики основних структурних елементів мікропроцесорного регулятора наведено в таблицях 2.1–2.3.

Таблиця 2.1. – Технічні характеристики електронного блоку Pandaros

Параметр	Значення
Напруга живлення, В (пост.)	12 чи 24
Мінімальна напруга, В (пост.)	9
Максимальна напруга, В (пост.)	33
Мінімальна напруга пульсацій	Макс. 10 % на 100 Гц
Споживання струму	Макс. 7 А та макс. 11 А на 60 сек
Допустиме падіння напруги при максимальному струмі споживання	Макс. 10 %
Навколишня температура при роботі, °С	-40...+80
Вологість, % при 55°С	до 98
Динамічна міцність	Макс. 2 мм при частоті від 10 до 20 Гц. Макс. 0,24 м/с при частоті від 21 до 63 Гц. Макс 7 g при частоті від 64 до 2 000 Гц
Удар	50 g, 11 мс від половини синус. хвилі
Опір ізоляції	>1 МОм при 48 В пост. струму
Тип захисту	IP00
Вага, кг	0,5

Таблиця 2.2. – Технічні характеристики виконавчого механізму StG 2010-01

Параметр	Значення
Кут повороту вихідного вала, град.	36
Макс. момент на вихідному валу, Нм	1,4
Утримуючий момент при обмеженні струму, Нм	0,7
Час реакції 0-100 % без навантаження, мс	45
Загальне споживання струму регулятора, А: в усталеному режимі при зміні навантаження макс. струм при обмеженні струму	~1 ~3...4 ~4,5 ~2,5
Навколишня температура при роботі, °С	-25 ... +90
Вологість, % при 55°С	до 100
Тип захисту корпус роз'єми	IP65 IP00/ IP65
Вага, кг	2,2

Таблиця 2.3. – Технічні характеристики датчика частоти IA 03-102

Параметр	Значення
Метод вимірювання	Індуктивний, активний
Діапазон вимірювання, Гц	50 ... 9000
Діапазон вихідного сигналу, В	0...10 (змінн. )
Опір, Ом	52
Форма сигналу	Синусоїдальний (в залежності від профілю зуба)
Навколишня температура при роботі, °С	-55 ... +120
Тип захисту	IP 55
Вібрації	< 10 g, 10...100 Гц
Удар	< 50 g, 11 мс від половини синус. хвилі

Зовнішній вид електронного блоку Pandaros та виконавчий механізм StG 2010-01 показано на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вид електронного блоку та виконавчого механізму

САРЧ

Для кріплення виконуючого механізму (ВМ) на паливному насосі високого тиску (ПНВТ) розроблено спеціальну монтажну конструкцію, яка встановлюється на місце штатного механічного регулятора частоти. Зовнішній вигляд датчика частоти обертання, змонтованого на двигуні, наведено на рис. 2.6, а вигляд виконуючого механізму, встановленого на ПНВТ, показано на рис. 2.7.



Рисунок 2.6 – Датчик частоти обертання на дизелі

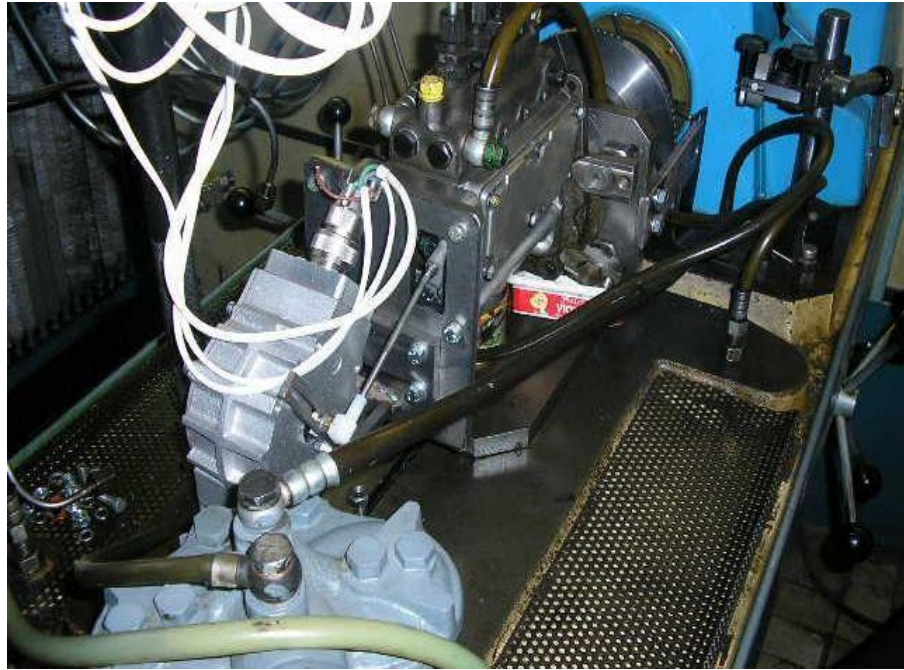


Рисунок 2.7 – Виконуючий механізм, встановлений на ПНВТ в ході безмоторних випробувань

Блок керування може бути розміщений як у підкапотному просторі, так і в кабіні транспортного засобу. На рис. 2.8 показано приклад встановлення блоку керування під час дорожніх випробувань на тракторі Т150-К. В даному випадку блок розташований у кабіні трактора під панеллю керування.

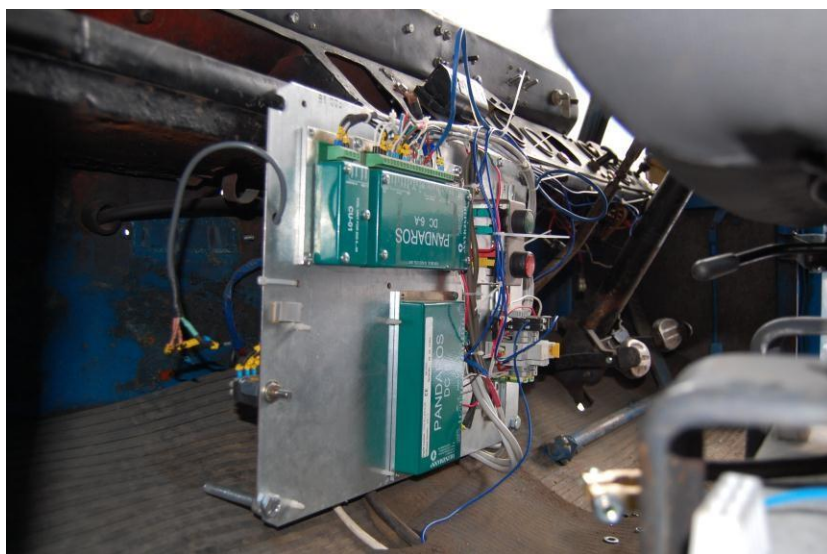


Рисунок 2.8 – Встановлення блоку керування в кабіні транспортного засобу

На рис. 2.9. зображено встановлення блоку керування в ході моторних випробувань дизеля 6Ч13/14.



Рисунок 2.9 – Блок керування в ході моторних випробувань дизеля 6Ч13/14

На рис. 2.10. зображено схему встановлення датчика частоти обертання дизеля на маховик колінчастого вала.

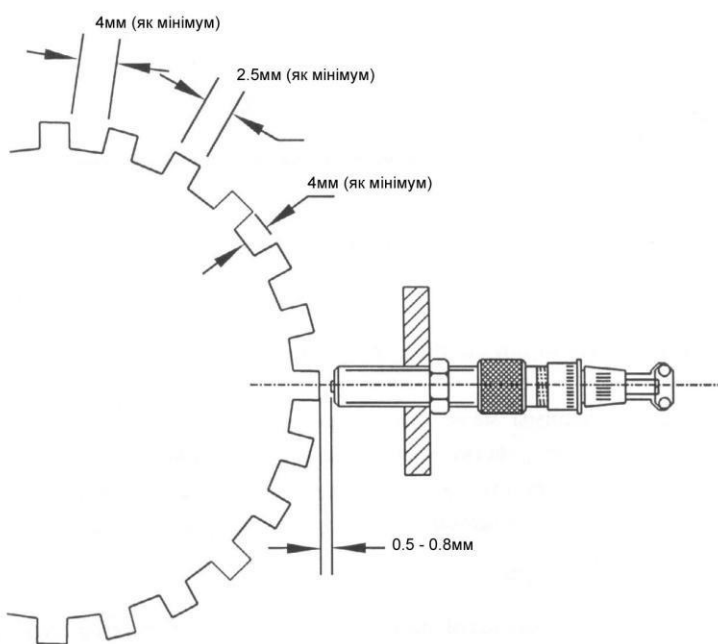


Рисунок 2.10 – Схема встановлення датчика частоти обертів

На рис. 2.12. зображено електричну схему підключення електронного блоку управління до обладнання дизеля.

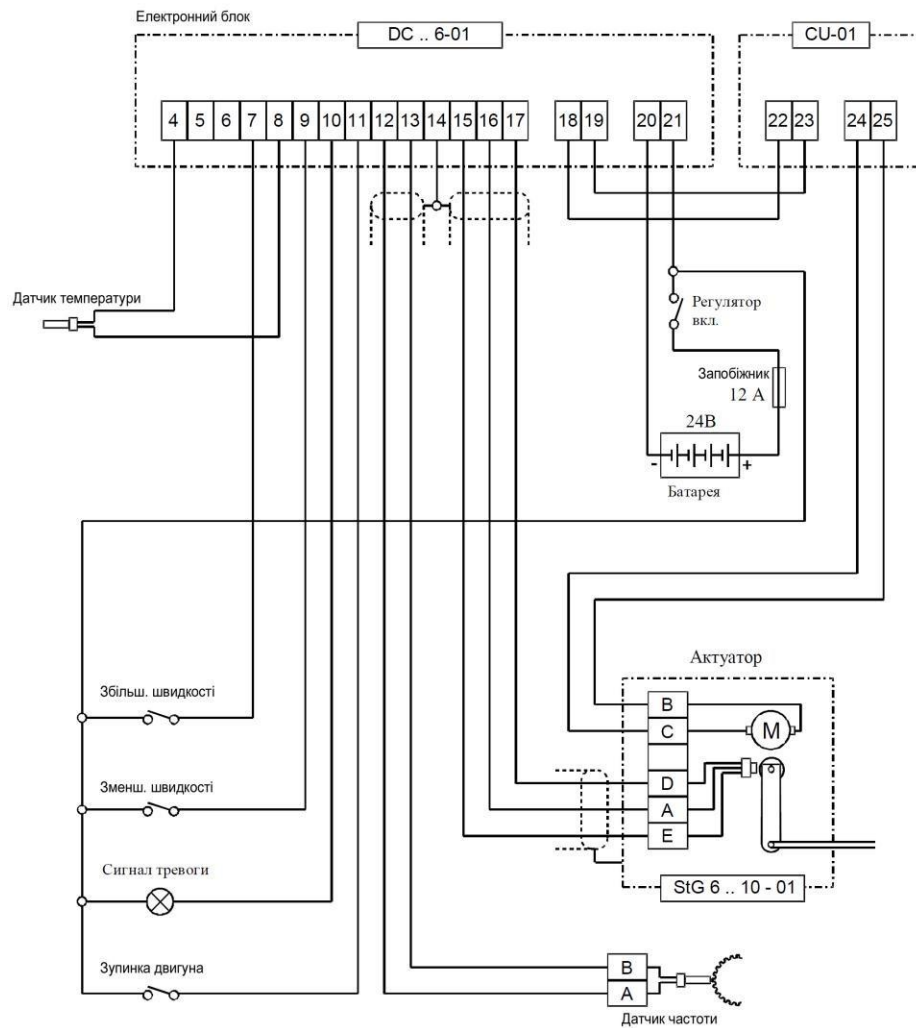


Рисунок 2.12 – Електрична схема підключення електронного блоку управління

## Висновки до розділу 2

Розроблено структурну схему експериментальної електронної всережимної САРЧ для дизеля. Обґрунтовано та визначено необхідні елементи системи регулювання, до яких входять: електронний блок керування, виконавчий механізм та датчик частоти обертання колінчастого вала. Виконавчий механізм обрано на основі електродвигуна постійного струму без знижувального редуктора та обладнано зворотним зв'язком за положенням вала. Електронний блок має 9 цифрових та 6 аналогових входів. Для контролю частоти обертання застосовано індуктивний активний датчик, який монтується на маховику дизеля.

Проведено аналіз впливу параметрів ПД-регулювання на процес контролю частоти обертання. За результатами аналізу обрана функціональна схема, яка дозволяє регулювати ПД-параметри на основі частоти обертання колінчастого вала.

Встановлено, що розроблена електронна САРЧ є регулятором непрямої дії. Єдиною механічною складовою є виконавчий механізм та його механічний зв'язок з паливним насосом високого тиску (ПНВТ).

Потужність електродвигуна виконавчого механізму визначена виходячи з необхідності створення зусилля на рейці ПНВТ не менше 0,4 Н на одну секцію. Для чотирициліндрового двигуна 12/14 сумарна потужність двигуна ВМ експериментальної САРЧ становила 1,4 Н.

Розроблено конструкцію монтажного кріплення виконавчого механізму на ПНВТ.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЯ З ЕЛЕКТРОННОЮ ВСЕРЕЖИМНОЮ САРЧ З ПІД-РЕГУЛЮВАННЯМ

#### 3.1. Базова модель САРЧ дизеля для дослідження

Для розробки електронної САРЧ з всережимним регулятором частоти обертання колінчастого вала взято за основу математичну модель САРЧ дизеля з дворежимним регулятором, яка була створена на кафедрі «Тракторів, автомобілів та енергетичних засобів» ЗВО «ПДУ».

Програмні розрахунки виконувалися з використанням програмного комплексу MatLab. Загальна модель САРЧ була структурно розділена на такі логічні блоки:

- блок регулювання частоти обертання колінчастого вала,
- блок паливного насоса високого тиску (ПНВТ),
- блок наддуву дизеля,
- блок зовнішнього навантаження.

Верхній ієрархічний рівень моделі наведений на рис. 3.1.

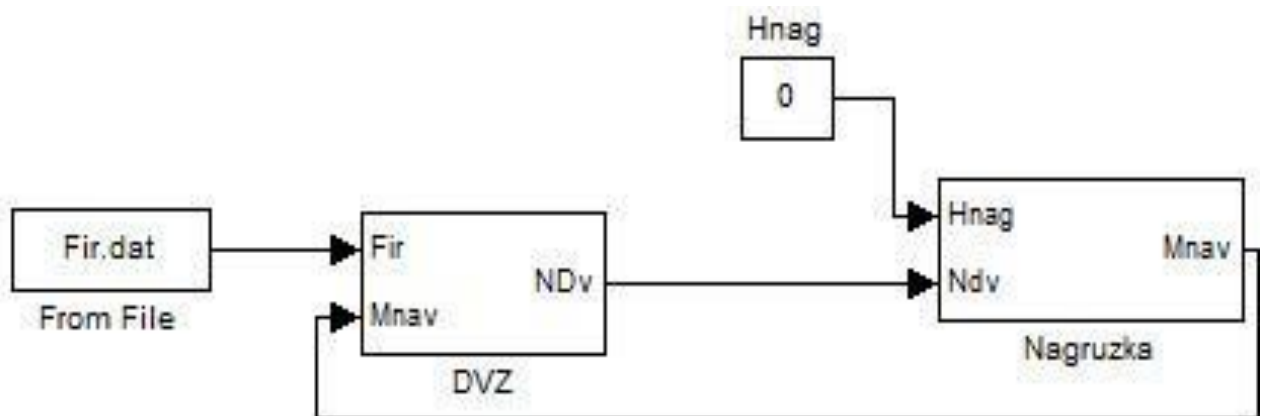


Рисунок 3.1 – Верхній ієрархічний рівень моделі дизеля обладнаного електронною САРЧ, в програмному комплексі MatLab:

Fir - переміщення цифрової педалі газу;  $ND_v$  – частота обертання колінчастого вала. ;  $M_{nav}$  – момент навантаження на колінчастому валу дизеля;  $H_{nag}$  – початкове значення навантаження; DVZ – розрахунковий блок дизеля зі встановленою САРЧ; Nagruzka – розрахунковий блок зовнішнього навантаження.

Блок зовнішнього навантаження, що відтворює роботу гальмівного стенду, було задано рівнянням:

$$M_{\text{НГ}} = A_{\text{НГ}} \cdot n_{\text{д}} + H_{\text{НГ}}, \quad (3.1)$$

де:  $M_{\text{НГ}}$  – момент зовнішнього навантаження;

$n_{\text{д}}$  - частота обертання колінчастого вала дизеля;

$A_{\text{НГ}}$  та  $H_{\text{НГ}}$  - коефіцієнти апроксимації.

Блок (DVZ), змонтований на двигуні, інтегрує моделювання алгоритмів роботи дизеля, ПНВТ, системи турбонаддуву та електронного регулятора. Математична модель цього блоку представлена на рис. 3.2.

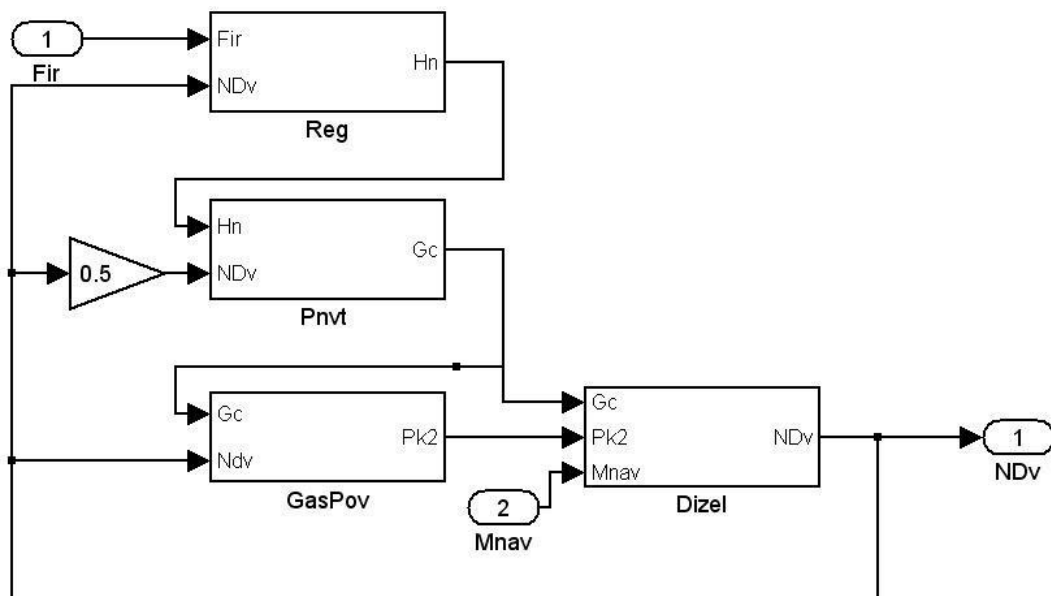


Рисунок 3.2 – Математична модель блоку DVZ:

Reg – блок електронного регулятора; Pnvt – блок ПНВТ; GasPov - блок турбонаддуву; Dizel – блок дизеля; Hn – переміщення рейки ПНВТ; Gc – циклова подача палива, Pk2 – тиск у впускному колекторі.

Динамічна математична модель дизеля (Dizel) базується на диференціальному рівнянні руху двигуна в умовах неусталених режимів роботи, яке сформульоване за принципом д'Аламбера: усі діючі сили врівноважуються силою інерції. Рівняння у стандартній формі має вигляд

$$\frac{dn_d}{dt} = \frac{30}{\pi \cdot J_{\pi}} [M_i(q_{\text{ц}}, p_{\text{к2}}, n_d) - M_{\text{м}}(n_d) - M_{\text{нр}}(n_d)], \quad (3.2)$$

де:  $J_{\pi}$  - приведений до колінчастого вала сумарний момент інерції рухомих мас дизеля;

$M_i$  - індикаторний крутний момент;

$q_{\text{ц}}$  - циклова подача палива;

$p_{\text{к2}}$  - тиск повітря наддуву після проміжного охолоджувача;

$M_{\text{м}}$  - момент механічних втрат;

$M_{\text{нр}}$  - момент зовнішнього навантаження.

Залежність  $M_i(q_{\text{ц}}, p_{\text{к2}}, n_d)$  було описано поліномом:

$$M_i = a_{\text{д1}} + a_{\text{д2}} \cdot q_{\text{ц}} + a_{\text{д3}} \cdot p_{\text{к2}} + a_{\text{д4}} \cdot n_d + a_{\text{д5}} \cdot q_{\text{ц}}^2 + a_{\text{д6}} \cdot p_{\text{к2}}^2 + a_{\text{д7}} \cdot n_d^2 + a_{\text{д8}} \cdot q_{\text{ц}} \cdot p_{\text{к2}} + a_{\text{д9}} \cdot q_{\text{ц}} \cdot n_d + a_{\text{д10}} \cdot p_{\text{к2}} \cdot n_d, \quad (3.3)$$

де  $a_{\text{д1}}, a_{\text{д2}}, \dots, a_{\text{д10}}$  – сталі коефіцієнти апроксимації.

Коефіцієнти апроксимації визначалися за методикою планування багатофакторних експериментів, описаною в роботах [98–100]. Блок «GasPov» моделює тиск повітря на вході в дизель і враховує роботу інерційних елементів турбокомпресора, впускного трубопроводу, випускного колектора, а також безінерційної ланки охолоджувача повітря. Інерційні складові блоку «GasPov» описуються трьома диференціальними рівняннями, що враховують: турбокомпресор

$$\frac{dn_{\text{тк}}}{dt} = (M_{\text{т}} - M_{\text{к}} - M_{\text{мтк}}) \frac{30}{\pi j_{\text{тк}}}, \quad (3.4)$$

де:  $n_{\text{тк}}$  - частота обертання ротора турбокомпресора;

$M_{\text{мтк}}$  - момент механічних втрат в турбокомпресорі;

$M_{\text{к}}$  - момент опору колеса компресора;

$M_{\text{т}}$  - крутний момент турбіни;

$J_{TK}$  - приведений момент інерції турбокомпресора;

- впускний трубопровід (входить в склад блока GasPov)

$$\frac{dp_{к1}}{dt} = (G_{к} - G_{д}) \frac{n_{вп} \cdot p_{к1}}{V_{вп} \cdot \rho_{к1}}, \quad (3.5)$$

де:  $p_{к1}$  - тиск повітря після компресора;

$G_{к}$  - маса повітря, що подається компресором у впускний трубопровід;

$G_{д}$  - маса повітря, що надходить до циліндрів двигуна;

$V_{вп}$  - об'єм впускного колектора;

$n_{вп}$  - показник політропи стискання повітря;

$\rho_{к1}$  - густина повітря після компресора;

- випускний колектор (входить в склад блока GasPov)

$$\frac{dp_{тг}}{dt} = (G_{г} - G_{т}) \frac{n_{вип} \cdot p_{тг}}{V_{вип} \cdot \rho_{тг}}, \quad (3.6)$$

де:  $n_{вип}$  - показник політропи розширення ВГ;

$V_{вип}$  - об'єм випускного колектора;

$G_{г}$  - маса відпрацьованих газів на виході з циліндра дизеля;

$G_{т}$  - маса відпрацьованих газів на вході в турбіну;

$\rho_{тг}$  - густина ВГ.

- охолоджувач повітря (безінерційна ланка, входить в склад блока GasPov)

$$T_{к2} = T_{к1} - \Delta T_{ох}, \quad (3.7)$$

де:  $T_{к1}, T_{к2}$  - температури повітря на вході в радіатор і на виході з нього;

$\Delta T_{ох}$  - зниження температури повітря наддуву в радіаторі.

В математичній моделі охолодник повітря представили безінерційною структурною ланкою. В моделі прийняли, що

$$p_{к2} = p_{к1} - a_{ох} \cdot G_{д}^2, \quad (3.8)$$

де:  $p_{к1}, p_{к2}$  - тиски наддуву до і після охолоджувача повітря.

$$\Delta T_{ох} = A_T (T_{к1} - T_{пов}), \quad (3.9)$$

де:  $A_T = 0,6$  – постійний коефіцієнт;

$T_{пов}$  – температура повітря на вході в компресор.

Виходячи з даних, наведених в праці, прийняли, що за номінального режиму перепад тисків дорівнює 10 кПа. За цієї умови підбрали коефіцієнт апроксимації  $a_{ох}$  для рівняння тиску.

Під час створення математичної моделі ПНВТ, високого тиску трубопроводів та форсунок приймалося припущення про безінерційний характер протікаючих у цих системах процесів. Модель ПНВТ подана у вигляді тривимірної матриці і буде детально описана далі.

### **3.2. Математична модель електронної всережимної САРЧ з ПД- регулятором**

У базову модель були внесені зміни в алгоритм роботи регулятора (блок Reg на рис. 3.2) швидкості, замінивши дворежимне регулювання на всережимне. Відповідно до принципової схеми дизеля розроблено принципову схему всережимного регулятора, наведеної на рис. 3.3.

У базовій моделі педаль управління представлена параметром Fir. Електронний блок керування та виконавчий механізм описані в блоці Reg, ПНВТ – у блоці Pnvt, а двигун із турбокомпресором – у блоках GasPov та Dizel (згідно з позначеннями на рис. 3.2)

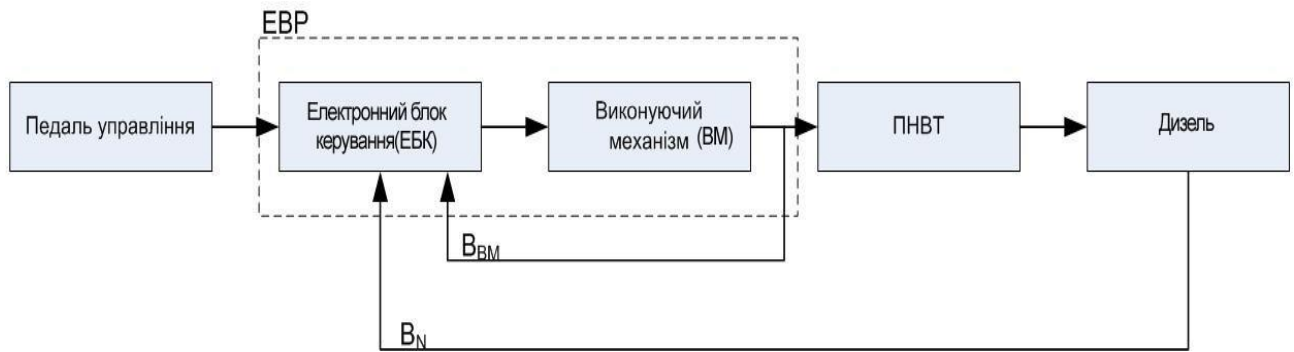


Рисунок 3.3 – Узагальнена схема експериментальної електронної САРЧ дизеля з всережимним алгоритмом регулювання:

$V_N$  - сигнал частоти обертання колінчастого вала дизеля;  $V_{VM}$  – сигнал положення вала ВМ.

У розрахунковому блоці Reg створено модель електронного блоку керування (ЕБК), що забезпечує всережимне регулювання. Крім того, інтегровано опис альтернативного виконавчого механізму та уточнено зворотні зв'язки між ЕБК і ВМ.

На основі узагальненої схеми, наведеної на рис. 3.3, та враховуючи вимоги до САРЧ, визначені в розділі 2, розроблено детальну функціональну схему експериментальної САРЧ (рис. 3.4). Деталізація передбачала введення алгоритмів, що враховують:

- корекцію кута нахилу регуляторної гілки;
- принципи фізичної моделі роботи ВМ;
- сили, які діють на рейку ПНВТ.

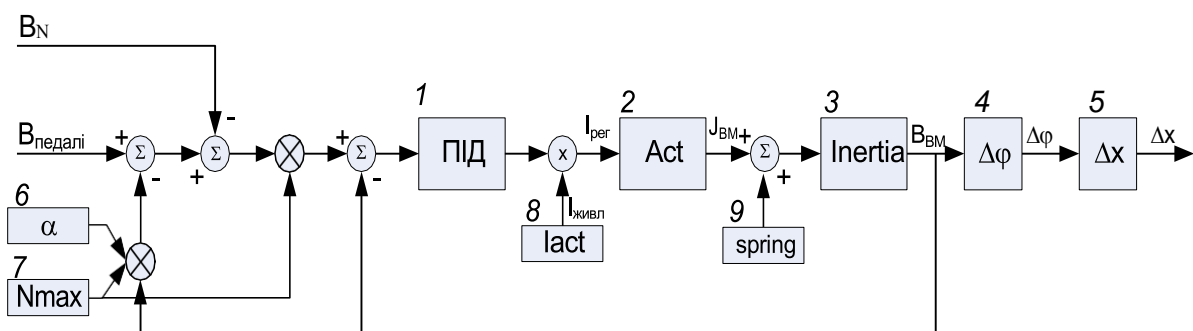


Рисунок 3.4 – Детальна функціональна схема експериментальної САРЧ дизеля з всережимним алгоритмом регулювання:

На рис. 3.4 позначено:

1 – ПІД-регулятор; 2 – електромагнітна частина ВМ ( $A_{ct}$ ); 3 – вплив сил інерції рухомих частин виконавчого механізму та ПНВТ ( $Inertia$ ); 4 – модуль перетворення зусилля на валу ВМ на зміну кута обертання вала ( $\Delta\phi$ ); 5 – перетворення кута обертання вала ВМ на лінійний рух рейки ПНВТ ( $\Delta x$ ). 6 – кут нахилу регульованої гілки ( $\alpha$ ); 7 – максимальна частота обертання дизеля ( $N_{max}$ ); 8 – максимальний струм живлення двигуна ВМ ( $I_{act}$ ); 9 – зусилля зворотної пружини ВМ ( $spring$ );  $V_{педалі}$  – сигнал з електронної педалі керування;  $I_{рег}$  – струм регулювання ВМ;  $I_{живл}$  – струм живлення ЕБК;  $J_{ВМ}$  – момент навантаження на валу ВМ.

На основі функціональної схеми (рис. 3.4) у програмному середовищі MatLab була створена модель всережимного електронного регулятора швидкості дизеля разом із ПНВТ, що наведена на рис. 3.5. Усі складові математичної моделі реалізовані в середовищі Matlab/Simulink.

Модель відтворює роботу електронного блоку керування, електронної педалі та виконавчого механізму, який переміщує рейку ПНВТ, незалежно від обраної архітектури впровадження ПІД-параметрів. Вона дозволяє досліджувати вплив зовнішніх збурень, таких як вібрації двигуна або нерівномірність циклової подачі по циліндрах дизеля. Вхідними параметрами моделі є положення електронної педалі ( $F_{ir1}$ ) та частота обертання колінчастого вала дизеля ( $ND_{v1}$ ), а вихідною – циклова подача палива ( $G_c$ ).

На рис. 3.5 зазначено: A1–A5 – функціональні блоки, що відтворюють роботу блоку Reg (рис. 3.2); A6 – блок, який описує роботу ПНВТ (рис. 3.2); f1–f15 – зв'язки між функціональними блоками моделі.

Функціональний блок A1 реалізує електронний блок керування з механізмом ПІД-регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля. Блок A2 моделює роботу виконавчого механізму та його кінематичне з'єднання з рейкою ПНВТ. Блок A3 забезпечує можливість зміни кута нахилу регуляторних гілок.

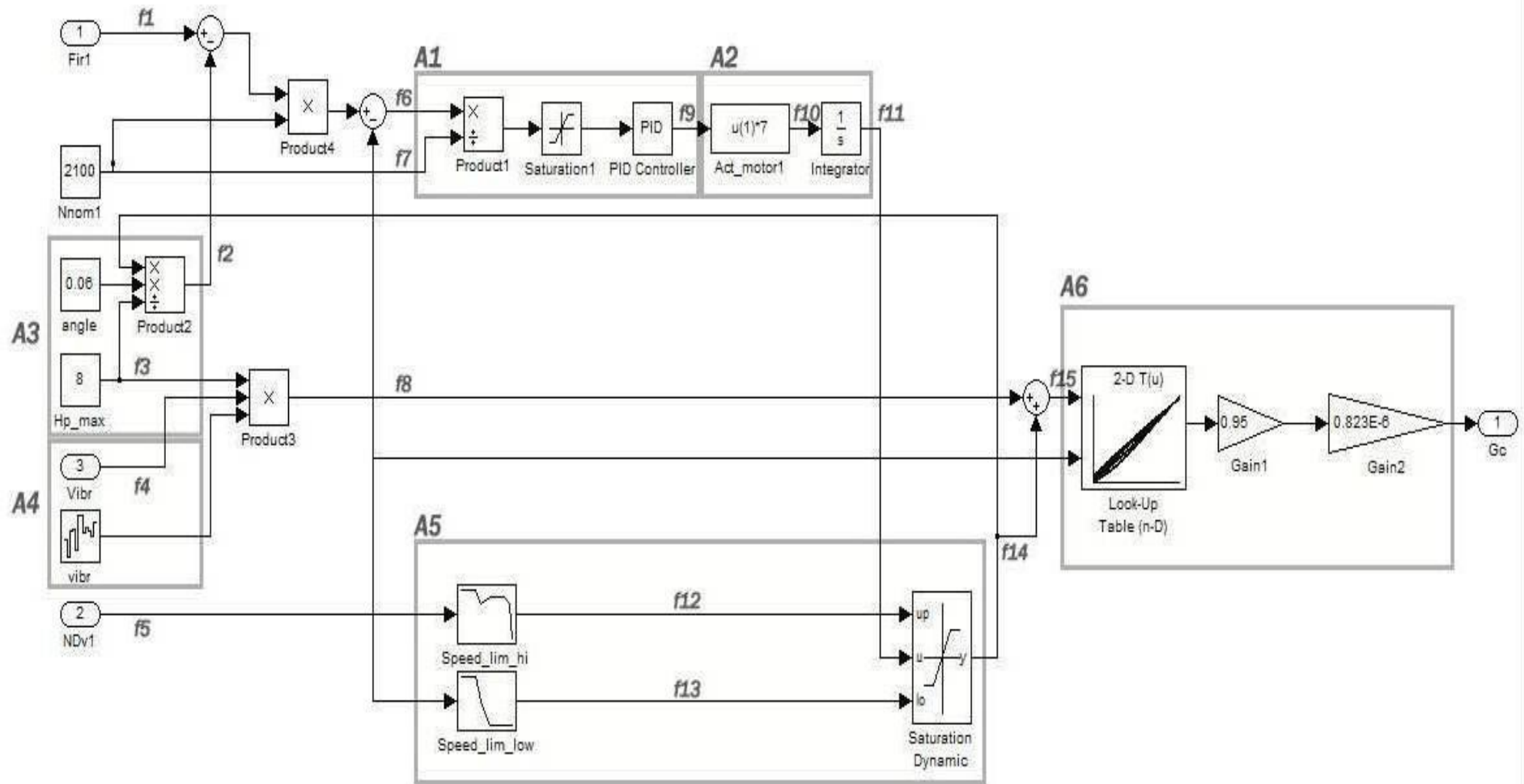


Рисунок 3.5 – Математична модель електронної САРЧ з ПНВТ дизеля

Функціональний блок А4 введений для моделювання впливу вібрацій дизеля на електронну САРЧ та на сам дизель. Блок А5 відповідає за обмеження верхніх та нижніх граничних значень циклової подачі палива, що відповідає крайнім положенням рейки ПНВТ при формуванні зовнішньої швидкісної характеристики конкретного дизеля та характеристик холостого ходу. Блок А6 відтворює роботу безінерційної ланки «PNVT», що включає ПНВТ, форсунки та трубопроводи високого тиску.

Характеристики ПНВТ задавалися графічно-матричним методом на основі результатів безмоторних випробувань.

У разі перерегулювання система досягає необхідного положення швидше, ніж при менших коефіцієнтах, проте після досягнення цільового рівня сигнал продовжує змінюватися під дією інерції, що призводить до збільшення амплітуди та кількості коливань у процесі регулювання.

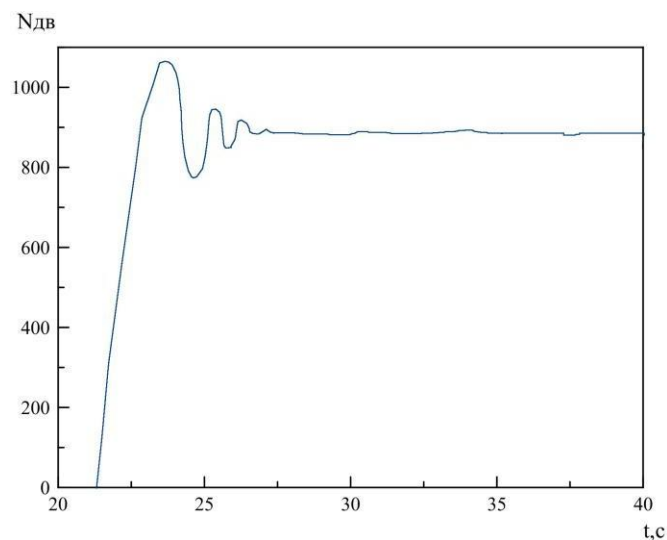


Рисунок 3.6 – Робота дизеля з завищеними значеннями  $K_p$  у випадку перерегулювання

Коли продовжити збільшувати коефіцієнт  $K_p$ , то досягнемо ситуації, коли система входить в режим автоколивань і стає нестійкою (рис. 3.7).

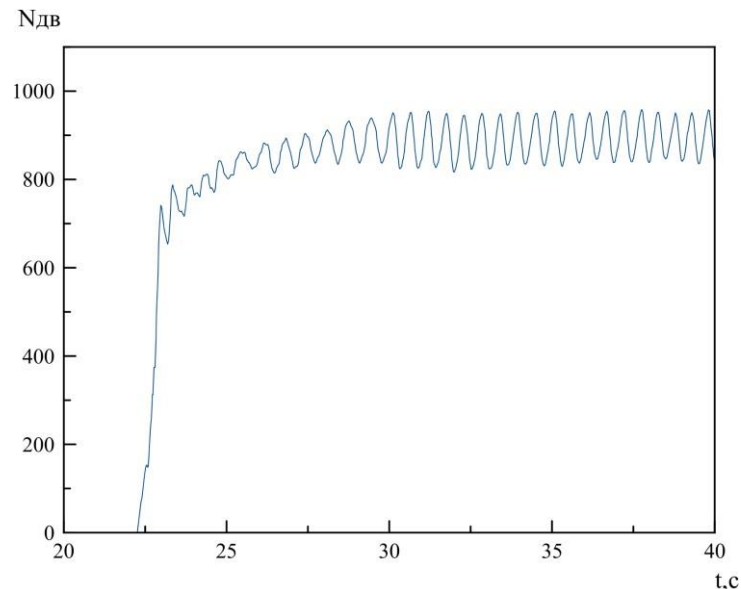


Рисунок 3.7 – Робота дизеля з завищеними значеннями  $K_p$  у випадку виникнення автоколивань

За малих значень інтегрального коефіцієнта  $K_I$  система взагалі не стабілізується. Амплітуда коливань продовжує збільшуватися до моменту досягнення фізичного обмеження коливальних процесів. Диференціальна складова має суттєвий вплив на якість перехідних процесів системи, проте для її ефективного використання необхідно забезпечити своєчасне отримання даних електронним блоком у режимі реального часу. Якщо частота збору даних нерегулярна, а також присутні шуми та високочастотні коливання в сигналі датчика швидкості, точне коригування диференціальної складової стає недоцільним.

Вихідний керуючий сигнал повинен пропорційно відображати зміну вхідної координати, поділену на інтервал часу між ітераціями регулюючого циклу. Якщо стан системи змінюється з постійною швидкістю, а час між виконанням керуючих ітерацій варіює, виникає неточність у визначенні значення  $n_d$ . Крім того, необхідно враховувати шуми, що виникають через вібрації рейки ПНВТ.

При високих значеннях коефіцієнта  $K_d$  система реагує на помилкові сигнали, викликаючи зайві коливання регулюючих органів (ВМ). Натомість низьке значення  $K_d$  збільшує час виходу системи на усталений режим.

### 3.3. Моделювання принципу роботи ЕБК

Частота обертання колінчастого вала дизеля визначається за допомогою датчика Холла, який підключений до електронного блоку керування (А1). На схемі (рис. 3.5) цей вхід позначено як «NDv1». Управління режимом роботи дизеля здійснюється електронною педаллю керування «Fir1».

Електронний блок А1 обробляє сигнали від електронної педалі Fir1, датчика зворотного зв'язку виконавчого механізму (f11) та датчика частоти обертання NDv1. На основі заданої програми в блоках А1–А3 і з урахуванням обмежень блоку А5, розраховується положення виконавчого механізму, яке передається блоку А6. Зміна положення виконавчого механізму переміщує рейку ПНВТ, що впливає на циклову подачу палива  $G_c$  та частоту обертання колінчастого вала дизеля.

Нова частота обертання, обчислена в моделі Matlab/Simulink, повертається до моделі електронної САРЧ як сигнал датчика NDv1.

Вхідні координати положення педалі Fir1 та коефіцієнта вібрацій Vibr є безрозмірними величинами в діапазоні 0–1, а частота обертання NDv1 задається у  $\text{хв}^{-1}$ . Вихідна координата циклової подачі  $G_c$  вимірюється в грамах на цикл.

Для налаштування моделі під різні двигуни введено ряд констант:

**Nnom1** – максимальна частота обертання дизеля;

**Angle** – кут нахилу регуляторної гілки;

**Hp\_max** – максимальне переміщення рейки ПНВТ.

Блок **Look-up table** задає характеристику ПНВТ у графічно-матричній формі. Граничні положення рейки за швидкісною характеристикою встановлюються блоками **Speed\_limit\_hi** та **Speed\_limit\_low**.

У суматорі до значення Fir1 додається поправка на кут нахилу регуляторної гілки (f2), яка розраховується на основі поточного та максимального положення рейки ПНВТ і має безрозмірний діапазон від 0 до 1.

Завдяки константі Nnom1 значення Fir1 перераховується в оберти за хвилину та порівнюється з поточною частотою обертання. Різниця (f6), з урахуванням опорного значення (f7), перетворюється на безрозмірну величину, обмежену від -1 до 1, і подається на блок ПД-регулятора А1. Вихідний сигнал (f9)

подається на виконавчий механізм у вигляді напруги від  $-4,5$  до  $+4,5$  В.

Блок **Act\_motor1** перетворює струм у крутний момент ( $f_{10}$ ) на валу ВМ. Після інтеграції крутного моменту визначається переміщення рейки ПНВТ ( $f_{11}$ ) в міліметрах (робочий діапазон 7 мм без пускової циклової подачі). Положення рейки обмежується залежно від поточної частоти обертання колінчастого вала.

Моторні випробування показали, що вібрації рейки ПНВТ суттєво впливають на стабільність частоти обертання при високих швидкісних режимах. Тому в модель введено коефіцієнт вібрацій **Vibr**, який через константу **Hp\_max** і зв'язок  $f_3$  формує коливання рейки ПНВТ. Зовнішні збурення, враховані через зв'язок  $f_8$ , додаються до визначеного положення рейки  $f_{14}$ .

Далі в блоці А6 за допомогою графічно-матричної програми Look-up table розраховується циклова подача  $G_c$  палива дизеля. Графічна матриця циклової подачі палива наведена на рис 3.8.

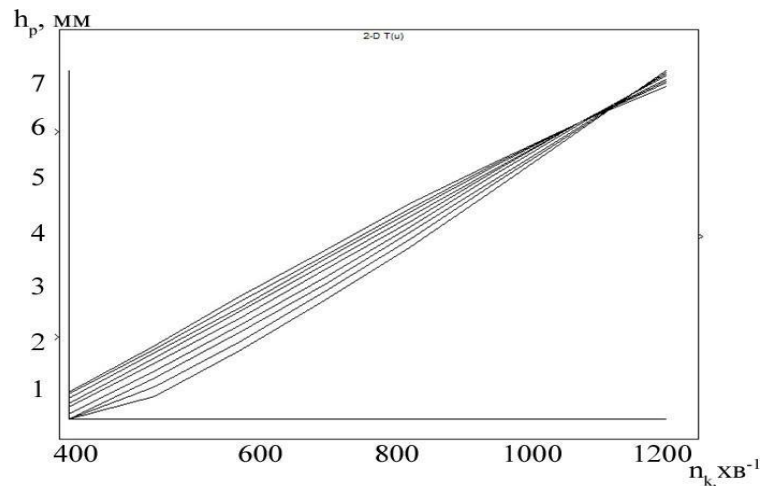


Рисунок 3.8 – Графічна матриця циклової подачі палива

На рис 3.9 наведено графічну інтерпретацію вибору системою положення рейки ПНВТ, тобто ілюстрацію алгоритму розрахунку циклової подачі палива при всережимному регулюванні.

Поточне положення рейки  $h_{p0}$  обчислюється блоками А1 та А2, представленими на рис. 3.4. Криві **Speed\_limit\_hi** та **Speed\_limit\_low** задають граничні значення максимального та мінімального положення рейки. Блок **Saturation Dynamic** забезпечує обмеження за максимально допустимою частотою обертання, враховуючи при цьому кут нахилу регуляторної гілки. Якщо на валу дизеля збільшується навантаження, значення  $h_{p0}$  зростає. З урахуванням корекції кута нахилу регуляторної гілки (блок А3 на рис. 3.4) робоча точка системи

переходить в положення  $h_{p+}$ . У випадку зменшення навантаження на валу, значення положення рейки зменшується і система переходить в точку  $h_{p-}$ .

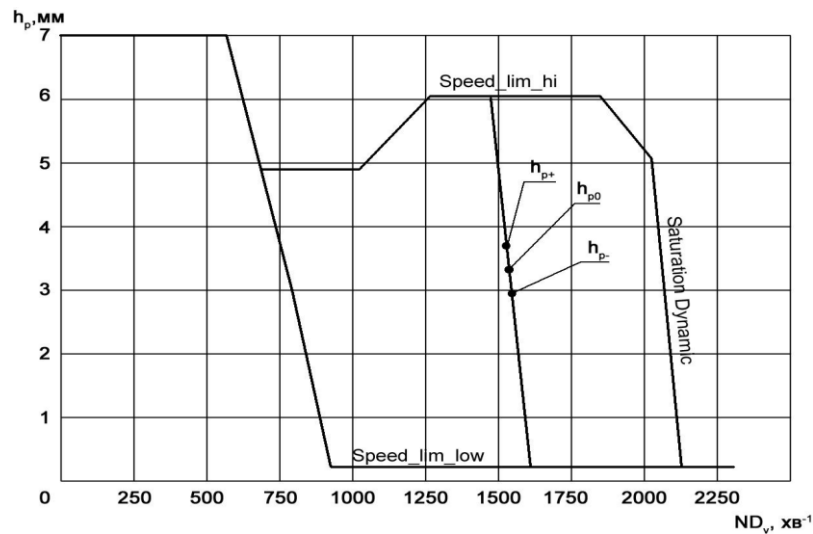


Рисунок 3.9 – Графічна інтерпретація алгоритму вибору системою положення рейки ПНВТ

Зміни положення рейки ПНВТ приводять до зміни циклової подачі палива в дизель, і як наслідок – до зміни частоти обертання вала.

### 3.4. Математична модель підпрограми електромеханічного виконавчого механізму

Електромеханічний виконавчий механізм моделюється блоком А2 (рис. 3.5). Завдяки наявності зворотного зв'язку по положенню вала ВМ немає потреби в детальному включенні математичних моделей самого виконавчого механізму та систем тяг у електронний блок керування.

Математична модель ВМ розробляється для використання як модель нижчого ієрархічного рівня у складі моделі САРЧ дизеля з турбонаддувом. Сигнал від індуктивного датчика слугує зворотним зв'язком за положенням вала ВМ, а управління електродвигуном здійснюється зміною струму живлення у межах від 0 до 2,5 А.

Функціональна схема математичної моделі ВМ показана на рис. 3.10.

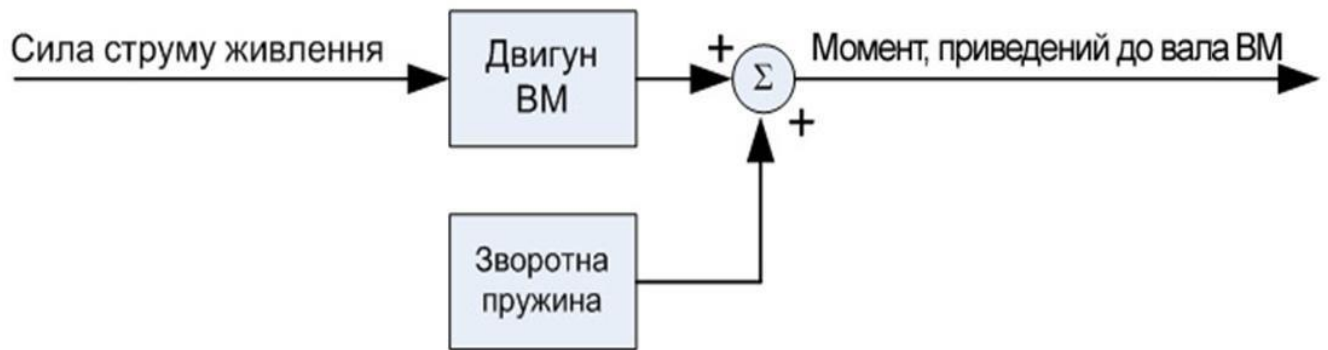


Рисунок 3.10 – Функціональна схема математичної моделі ВМ

Математична модель виконавчого механізму (ВМ) включає моделювання перетворення електричного струму, що подається на двигун ВМ, у механічне зусилля на валу ВМ, а також перетворення цього зусилля у обертальний рух вала. Залежність моменту, приведенного до вала ВМ, від струму живлення визначалась експериментально.

Оскільки ВМ оснащено зворотним зв'язком за положенням вала, для проведення вимірювань було створено спеціальний стенд. На вихідному валу ВМ закріпили горизонтальний важіль. До важеля, на відстані 75 мм від осі обертання, приєднувались калібровані тягарці, що створювали силу перпендикулярно до важеля.

Випробування проводили при положеннях вала ВМ, що відповідали 10 %, 50 % та 90 % від максимального кута обертання в  $36^\circ$ . Електронний блок керування підтримував встановлене положення вала, регулюючи струм, що подавався на обмотки електродвигуна ВМ.

Під час досліджень визначали силу струму, яку споживав виконавчий механізм. На кожному етапі величину навантаження на важіль змінювали тягарцями, а положення важеля по валу ВМ варіювали для врахування випадків, коли навантаження від тягарців і пружини ВМ діяли в одному напрямі (пряме навантаження) або у протилежних напрямках (зворотне навантаження).

За результатами цих безмоторних досліджень на експериментальному стенді побудовано графік залежності струму керування ВМ від навантаження на валу, що наведено на рис. 3.11.

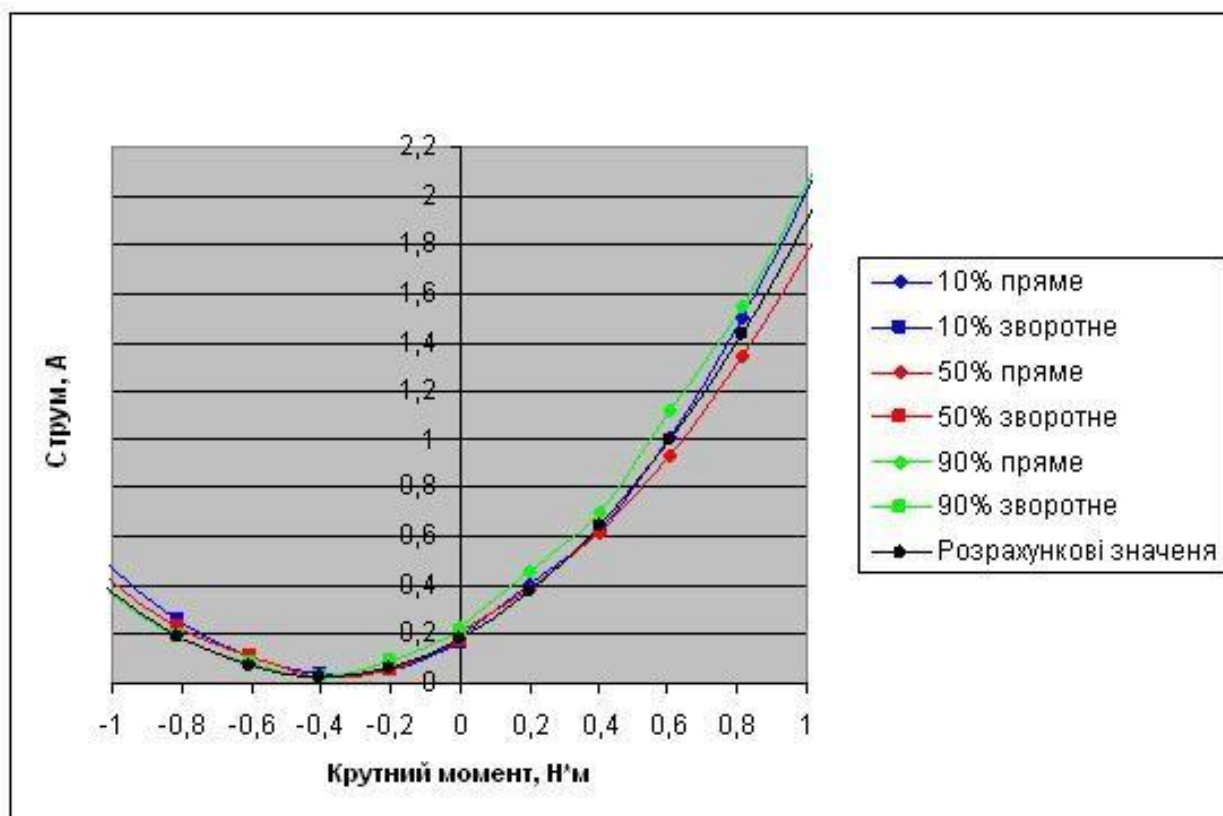


Рисунок 3.11 – Залежність сили струму ВМ від навантаження на валу

### Висновки до розділу 3

- Розроблено узагальнену та функціональну схему автотракторного дизеля, оснащеного експериментальною електронною САРЧ з всережимним регулюванням, де детально відображено зворотні зв'язки за частотою обертання колінчастого вала та за положенням виконавчого механізму (ВМ).

- Створено алгоритм розрахунку циклової подачі палива для всережимного регулювання в математичній моделі електронної САРЧ дизеля. Цей алгоритм дозволяє визначати витрату палива залежно від частоти обертання та навантаження на колінчастий вал, з урахуванням впливу вібрацій двигуна на роботу системи, що є нововведенням моделі.

- Розроблено математичну модель виконавчого механізму, яка включає перетворення сили струму живлення двигуна ВМ у обертальний рух його вала.

- Створено детальну математичну модель всережимного електронного регулятора частоти обертання дизеля з реалізацією ПД-алгоритму управління, підтриманням кута нахилу регуляторної гілки незалежно від частоти обертання колінчастого вала та відтворенням впливу вібрацій дизеля на роботу системи.

- Динамічна модель електромеханічного виконавчого механізму інтегрована з моделлю приводу рейки ПНВТ, що дозволяє розраховувати переміщення рейки в залежності від сили струму живлення ВМ. Параметри ПНВТ задаються у вигляді графічної матриці.

## РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ  
АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ**4.1. Обґрунтування необхідності вибору раціональних параметрів.****Програма досліджень**

Встановлення електронних систем регулювання на двигуни з різними конструктивними особливостями та використання дизелів в різноманітних експлуатаційних умовах робить неможливим застосування однакових ПД-параметрів для всіх двигунів. На вибір значень ПД-параметрів впливає механічна складова системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля, а також механічні елементи, що входять до складу виконавчого механізму та перехідного вузла між ВМ і рейкою ПНВТ. Механічні компоненти характеризуються певною інерційністю, наявністю сухого та в'язкого тертя, і реагують на зовнішні збурення з певною чутливістю. Крім того, відрізняються гідравлічні опори елементів паливної системи дизеля. Значний вплив на динаміку системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) мають рухомі частини двигуна, тобто інерційність дизеля як об'єкта регулювання, а також нерівномірність крутного моменту.

ПД-регулятори зарекомендували себе як ефективні засоби регулювання частоти обертання колінчастого вала дизельних електростанцій. Особливість роботи таких електростанцій полягає в необхідності підтримання стабільної частоти обертання при змінних навантаженнях двигуна. На відміну від колісних транспортних засобів, швидкісний режим роботи електростанцій постійний і практично не змінюється протягом експлуатації.

Для налаштування ПД-параметрів у дизель-електростанціях застосовувалась наступна методика: дизель працював у номінальному швидкісному режимі (1500 об/хв для електростанцій з чотирьополісними генераторами), після чого виконувались серії випробувань при різних значеннях навантаження (5–7 точок). У кожному режимі визначались значення ПД-параметрів, які забезпечували мінімальні коливання частоти обертання колінчастого вала на номінальному режимі.

Для застосування ПД-регуляторів на дизелях КТЗ зазначена методика є недостатньою. Необхідно визначати ПД-параметри для широкого діапазону швидкісних режимів (від 800 до 3000 об/хв) і забезпечувати якісні перехідні процеси для всього швидкісного діапазону, враховуючи зміну швидкості обертання. Виконання цього завдання потребує додаткових досліджень.

До цього часу налаштування ПД-параметрів здійснювалось у ручному режимі. Одним із завдань науково-практичного дослідження є розробка універсальних рекомендацій для налаштування ПД-параметрів електронного регулятора частоти обертання колінчастого вала автотракторного дизеля.

Для досягнення цієї мети розроблена така програма досліджень:

1. Обґрунтування та визначення впливу ПД-параметрів на зв'язок ВМ–ПНВТ під час безмоторних випробувань та на дизелі;
2. Перевірка адекватності математичної моделі САРЧ дизеля;
3. Проведення теоретичних досліджень на математичній моделі для оцінки впливу ПД-параметрів на роботу дизеля в різних швидкісних та навантажувальних режимах;
4. Визначення впливу ПД-параметрів на роботу автотракторного дизеля в усталеному швидкісному режимі та під час перехідних процесів.

Об'єктом експериментальних досліджень обрана мікропроцесорна система регулювання автомобільного дизеля, оснащеного газотурбінним наддувом. Паливна система дизеля виконана з використанням рядного ПНВТ. Для дослідної бази обрано дизель 4ЧН12/14.

Для реалізації першого етапу досліджень була створена експериментальна установка на основі безмоторного стенду NS-108 для перевірки паливної апаратури. На ПНВТ типу ЛСТН-410012 було встановлено мікропроцесорний регулятор. Зовнішній вигляд дослідної установки представлено на рис. 2.7.

При створенні експериментальної установки з ПНВТ серійний механічний регулятор частоти був демонтований. Рейку паливного насоса з'єднали з віссю виконавчого механізму за допомогою важеля та тяги.

Технічні характеристики елементів мікропроцесорного регулятора наведені в таблицях 4.1–4.3.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристик елементів МР при безмоторних дослідженнях

Параметр	Значення
Напруга живлення, В пост.	12
Мінімальна напруга, В пост.	10,7
Мінімальна напруга пульсацій	Макс. 10 % при 100 Гц
Споживання струму, А	5,7
Допустиме падіння напруги при максимальному струмі споживання	до 10 %
Запобіжник регулятора	12 А
Навколишня температура при роботі, °С	+14...+24

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики виконуючого механізму StG 2010-01 при безмоторних дослідженнях

Параметр	Значення
Кут повороту вихідного вала, град.	2...26
Макс. момент на вихідному валу, Нм	1,4 ±5 %
Утримуючий момент при обмеженні струму, Нм	0,7
Час зміни положення вала 0-100 % без навантаження, мсек	45
Навколишня температура при роботі, °С	+14...+24

Таблиця 4.3 – Характеристики датчика частоти ІА 03-102 при безмоторних дослідженнях

Параметр	Значення
Метод вимірювання	Індуктивний, активний
Діапазон вимірювання, Гц	50 ... 9 000
Діапазон вихідного сигналу, В	0...10 змінний
Опір, Ом	52
Форма сигналу	Синусоподібна
Навколишня температура при роботі, °С	+14...+24
Тип захисту	IP 55

#### 4.2. Методика і результати досліджень МР на ПНВТ

У ході безмоторних досліджень було визначено оптимальні ПД-параметри закону управління виконавчого механізму (ВМ). При підключенні до рейки ПНВТ та, відповідно, до паливоподачі за різних вихідних умов це дозволило отримати дані щодо перехідних процесів, що виникають при переміщенні рейки ПНВТ. Величина струму живлення ВМ надала можливість визначити сили, які виникають під час роботи ВМ з ПНВТ. Отримані на цьому етапі значення ПД-параметрів полегшили подальше налаштування системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) при роботі дизеля.

У процесі безмоторних випробувань здійснювалися зміни:

- маси важеля на вихідному валу ВМ без під'єднання до ПНВТ;
- маси деталей, що з'єднують вал ВМ з рейкою ПНВТ;
- опору при переміщенні рейки.

Серії безмоторних випробувань включали цифрові записи 3–4 перехідних процесів для різних значень ПД-параметрів. Вимірювання виконували при вимкненому електродвигуні стенда та з частотою обертання 800 об/хв, при різних положеннях важеля цифрової педалі управління.

Електронний регулятор, використаний у дослідженні, являє собою замкнену систему автоматичного управління. У якості регулюючих параметрів розглядали

пропорційну, інтегральну та диференціальну складові, значення яких змінювали та фіксували у відносних величинах від 0 до 100 %.

Виконавчий механізм оснащено датчиками зворотного зв'язку за положенням вихідного вала ВМ та за силою струму управління ВМ, що забезпечує високу точність визначення перехідних процесів САРЧ. Приклад цифрового запису перехідних процесів наведено на рис. 4.1.

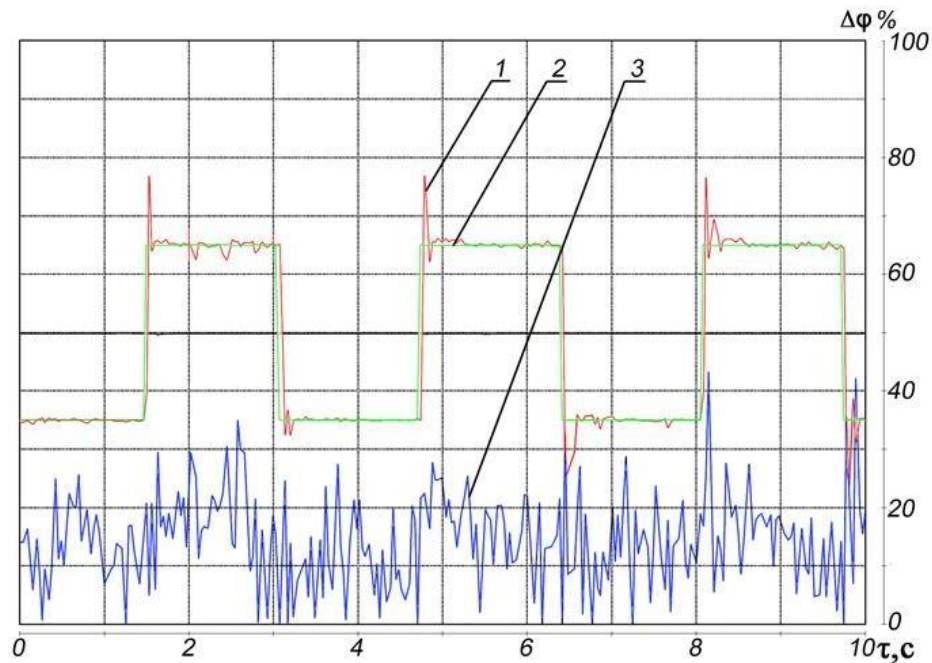


Рисунок 4.1. – Цифровий запис перехідних процесів при:

$$П = 3,0 \% ; I = 20,0 \% ; Д = 4,0 \%$$

1-положення вихідного вала ВМ; 2 – тестовий сигнал; 3 – струм управління ВМ.

Вибір оптимальних ПІД-параметрів проводили за такою послідовністю: встановлювали швидкісний режим ПНВТ у діапазоні від 400 до 1100 об/хв із кроком 100 об/хв. У систему регулювання мікропроцесорного регулятора (МР) подавали тестовий електричний сигнал, який змінював величину циклової подачі палива. Тестовий сигнал представляв собою прямокутний імпульс із періодом 1,5 с (рис. 4.2)

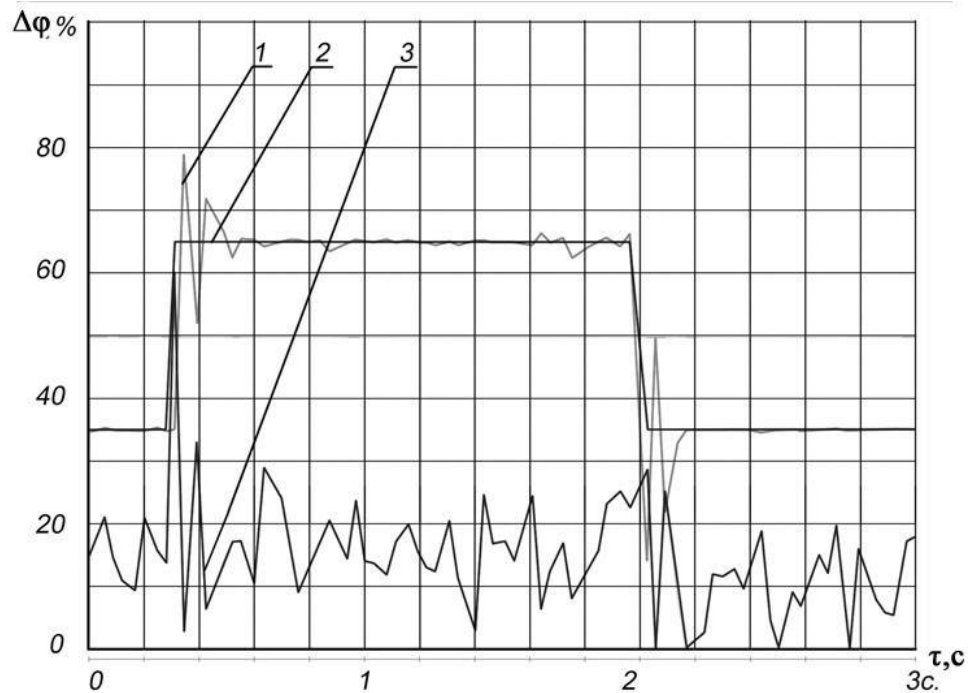


Рисунок 4.2 – Перехідний процес ВМ ПНВТ при подачі тестового електричного сигналу у вигляді прямокутного імпульсу:

1 – положення вихідного вала ВМ; 2 – тестовий сигнал; 3 – струм управління ВМ.

Величину циклової подачі палива змінювали в діапазоні 35–65 %. Такий інтервал коливань був обраний на основі амплітуд коливань подачі палива, отриманих у попередніх дослідженнях. У кожному з встановлених режимів послідовно змінювали пропорційну (П), інтегральну (І) та диференціальну (Д) складові ПД-регулятора. Результати випробувань автоматично фіксувалися у текстовому файлі та оброблялися на екрані персонального комп'ютера в режимі реального часу.

При визначенні оптимальних ПД-параметрів враховували якісні характеристики переходних процесів: тривалість переходного процесу, максимальне відхилення в періоді переходу та навантаження на виконавчий механізм (коливання струму управління).

Після серії вимірювань з пропорційною складовою обирали таке її значення, яке забезпечувало найкращі якісні показники переходних процесів. Вимірювання інтегральної складової проводили при раціональному значенні П, визначаючи оптимальне значення І за показниками переходних процесів.

Аналогічним чином підбирали значення диференціальної складової Д.

Результати випробувань ВМ, під'єданого до рейки ПНВТ при частоті обертання вала ПНВТ 800 об/хв, наведені в таблиці 4.4. Отримані дані свідчать про те, що потужності ВМ достатньо для створення необхідного зусилля на пересування рейки ПНВТ. Про це свідчить незначна різниця у значеннях П та Д складових.

Таблиця 4.4. – Результати вимірювань якості перехідних процесів при ВМ підключеному до ПНВТ та за частоти обертання вала ПНВТ = 800 хв<sup>-1</sup>

Значення ПД параметрів, %	Максимальна амплітуда відхилення, %	Час перехідних процесів, с
П – змінна, І та Д - постійні		
П=2; І=10; Д=4	7,69	1,5
П=3; І=10; Д=4	11,53	3,0
П=4; І=10; Д=4	12,69	1,8
<b>П=5; І=10; Д=4</b>	<b>13,84</b>	<b>0,7</b>
П=6; І=10; Д=4	18,46	0,6
П=7; І=10; Д=4	23,07	0,5
І – змінна, П та Д - постійні		
П=5; І=5; Д=4	6,92	1,5
П=5; І=10; Д=4	13,84	0,7
П=5; І=20; Д=4	26,15	0,4
П=5; І=40; Д=4	33,84	0,3
П=5; І=80; Д=4	30,76	0,5
Д – змінна, І та П - постійні		
П=5; І=10; Д=0,5	20,05	6,0
П=5; І=10; Д=2	18,46	0,3
П=5; І=10; Д=4	13,84	0,7
П=5; І=10; Д=6	18,46	0,5
П=5; І=10; Д=8	3,84	1,2
П=5; І=10; Д=12	5,38	0,6

Результати вимірювань показали, що найчутливішою до якості перехідних процесів є пропорційна (П) складова. Зміни цієї складової суттєво впливали на форму перехідного процесу по всьому діапазону вимірювань. Інтегральна (І) та диференціальна (Д) складові значно впливали на якість перехідних процесів лише при виході за критичні межі.

Раціональним значенням П складової обрали середнє значення діапазону, у

якому максимальна амплітуда коливань і тривалість перехідних процесів відповідали оптимальним параметрам.

Аналіз отриманих даних дозволив визначити:

- раціональні значення ПД-параметрів для ВМ, від'єданого від ПНВТ:  $\Pi = 3,0 \%$ ;  $I = 10 \%$ ;  $D = 3 \%$ ;
- раціональні значення ПД-параметрів для ВМ, підключеного до ПНВТ:  $\Pi = 4,0 \%$ ;  $I = 15 \%$ ;  $D = 4 \%$ ;
- раціональні значення ПД-параметрів для ВМ, підключеного до ПНВТ при частоті обертання вала ПНВТ 800 об/хв:  $\Pi = 5,0 \%$ ;  $I = 10 \%$ ;  $D = 4 \%$ .

Для подальших досліджень як робочі значення приймаються:  $\Pi = 5,0 \%$ ;  $I = 20 \%$ ;  $D = 4 \%$ .

#### **4.3. Методика визначення і значення вихідних параметрів для математичної моделі електронної САРЧ**

Для уточнення вихідних параметрів математичної моделі та визначення впливу ПД-параметрів у усталеному швидкісному режимі було проведено серію випробувань на дизель-електричному агрегаті за методикою, описаною раніше в п. 4.1.

Моторні дослідження виконували на дизелі ЯМЗ-238М2, який входив до складу дизель-електричного агрегату. На рис. 4.3 наведено дизельну електростанцію АГП-100С-Т400-1Р з дизелем ЯМЗ-238М2. На двигуні була встановлена дослідна система мікропроцесорного регулювання (МР).

Під час досліджень вимірювали значення параметрів регулювання в усталених режимах роботи дизеля при різних швидкісних і навантажувальних режимах.

При проведенні моторних випробувань на дизель-генераторі використовували ту ж методику поетапного вибору пропорційної ( $\Pi$ ), інтегральної ( $I$ ) та диференціальної ( $D$ ) складових, що й при безмоторних дослідженнях (п. 4.2).

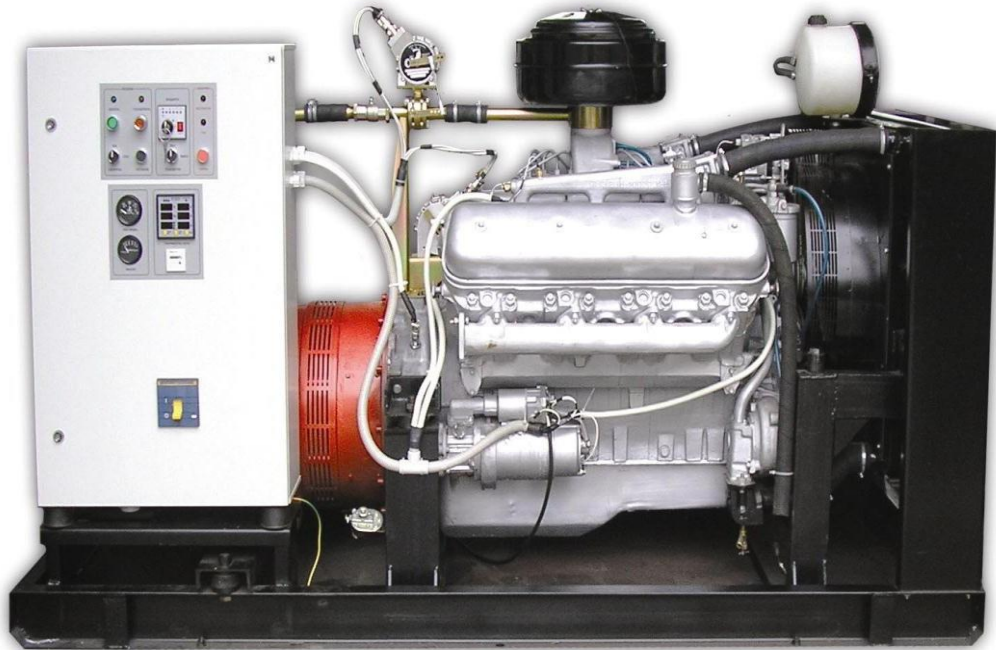


Рисунок 4.3. – Експериментальна установка на базі дизельної електростанції АГП-100С-Т400-1Р

Технічні характеристики дизеля ЯМЗ-238М2, встановленого на електростанції наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. - Технічні характеристики дизеля ЯМЗ-238М2, встановленого на електростанції АГП-100С-Т400-1Р

Кількість і положення циліндрів	8, V-подібне
Діаметр циліндрів, мм	130
Хід поршня, мм	140
Робочий об'єм всіх циліндрів, л	14,86
Ступінь стискання	16,5
Номінальна потужність, кВт	100

Продовження табл. 4.5

Частота обертання вала при номінальній потужності, $\text{хв}^{-1}$	1500
Максимальний крутний момент, Н.м. (кгс·м)	883 (90)
Частота обертання при максимальному крутному моменті, $\text{хв}^{-1}$	1250-1450

У процесі встановлення мікропроцесорного регулятора (МР), відрегульованого під час безмоторних випробувань, на двигун ЯМЗ-238М2 під навантаженням було виявлено недостатню потужність виконавчого механізму (ВМ). ВМ переміщував рейку 8-секційного паливного насосу, проте при збільшенні навантаження на двигун швидкість перехідних процесів значно зменшувалася, що призводило до незадовільної роботи регулятора у складі дизель-електричного агрегату. Це підтвердило необхідність індивідуального підбору ВМ і ПД-параметрів для кожного типу двигунів із урахуванням їх експлуатаційного призначення.

Виконавчий механізм марки StG 2010-01 було замінено на більш потужний StG 2020, після чого моторні дослідження продовжилися з метою визначення раціональних ПД-параметрів МР при різних зовнішніх навантаженнях та частотах обертання колінчастого вала.

Дослідження проводили за наступною програмою:

- вибір ПД-параметрів для зупиненого дизеля;
- вибір ПД-параметрів для дизеля, що працює на холостому ході;
- вибір ПД-параметрів для дизеля, що працює на номінальній частоті обертання колінчастого вала;
- серія вимірювань (3–4) на проміжних частотах між холостим ходом і номінальною частотою.

У кожному режимі вимірювання виконувалися при різних навантаженнях. Навантаження змінювали від 0 до 100 % із кроком 25 %. МР забезпечував

всерезимне регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля. Нахил регуляторної гільки становив 0 % (астатична характеристика).

Результати моторних досліджень на дизелі ЯМЗ-238М2 показали залежність ПД-параметрів від навантаження при частоті  $n = 1500$  об/хв. При зміні П-складової прямо пропорційно змінювалися І та Д складові і навпаки. Це дозволило визначити ПД-параметри для роботи при номінальному навантаженні та частоті  $n = 1500$  об/хв і пропорційно коригувати всі складові за допомогою змінної, названої комплексним корегуючим коефіцієнтом  $K_{\Sigma}$ .

На основі аналізу результатів було розраховано тривимірний масив значень комплексного корегуючого коефіцієнта в залежності від частоти обертання колінчастого вала та навантаження на двигун. Результати випробувань, на основі яких побудовано цей масив, наведені в таблиці 4.6. Візуальне відображення масиву показано на рис. 4.4.

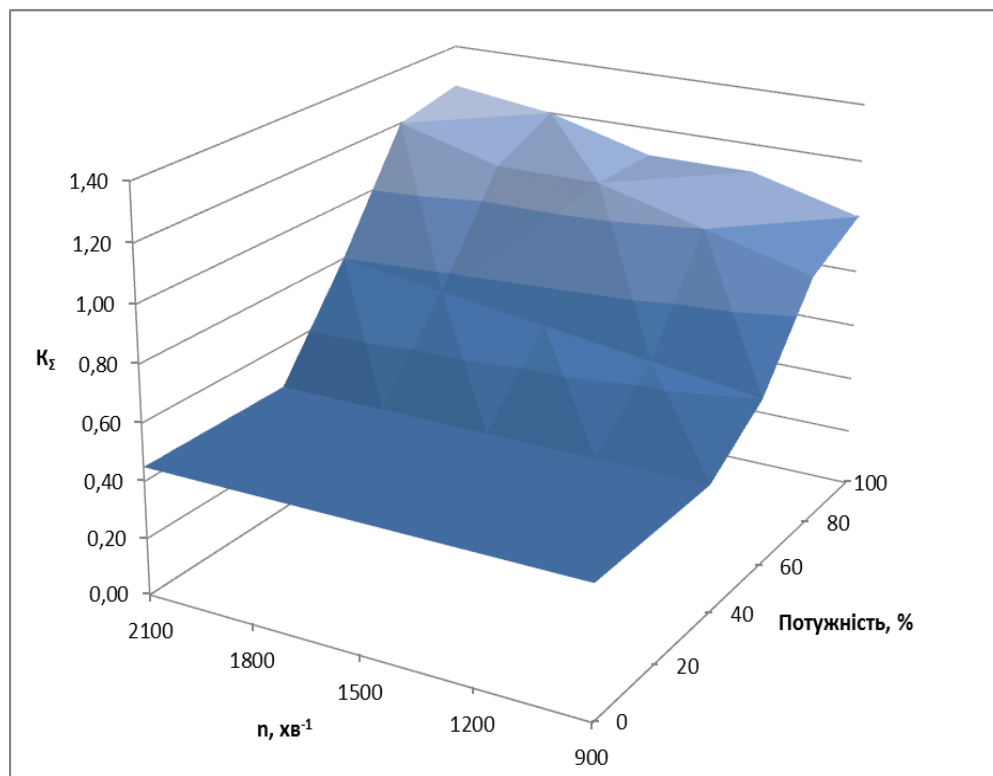


Рисунок 4.4. – Масив значень комплексного корегуючого коефіцієнта  $k_{\Sigma}$

Таблиця 4.6. – Значення комплексного коригуючого коефіцієнта при різних швидкісних та навантажувальних режимах

	Частота обертання колінчастого вала, хв. <sup>-1</sup>					
		900	1200	1500	1800	2100
Потужність, %		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	20	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	60	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
	80	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2
	100	1,0	1,1	1,1	1,2	1,25

Для третього етапу програми досліджень, що передбачав визначення вихідних даних для створення математичної моделі двигуна з електронним вузлом регулювання (ЕВР), який реалізує алгоритм ПІД-регулювання, була проведена серія випробувань на двигуні 4ЧН12/14 (СМД-23.07) у лабораторії кафедри.

#### 4.4. Дослідження ПІД-параметрів ЕВР на вплив вібрацій двигуна

Під час проведення моторних досліджень спостерігалось збільшення коливань вала виконавчого механізму (ВМ), що свідчило про некеровані коливання рейки ПНВТ. Зростання амплітуди коливань пов'язано з підвищенням вібрацій корпусу дизеля через збільшення швидкісного режиму. При переході частоти обертання колінчастого вала від холостого ходу до значень, близьких до номінальних, амплітуда коливань рейки ПНВТ зростає у 6–8 разів.

Збільшення амплітуди коливань може свідчити про недостатню потужність електродвигуна ВМ. Для оцінки допустимого рівня коливань рейки ПНВТ та їх впливу на раціональні ПІД-параметри була розроблена наступна програма досліджень на математичній моделі:

1. Провести оцінку абсолютних значень коливань вала ВМ під час моторних випробувань при різних режимах роботи дизеля.
2. Моделювати роботу дизеля на номінальній частоті обертання із

вібраціями, зафіксованими під час моторних випробувань, та визначити вплив ПД-параметрів регулятора на витрату палива.

3. Змоделювати роботу дизеля при збільшенні частоти обертання від холостого ходу до номінальної, визначаючи витрати палива за різних значень ПД-параметрів і рівнів вібрацій.

4. Проаналізувати отримані результати.

Для виконання першого пункту програми досліджень значення коливань рейки ПНВТ визначали наступним чином: під час стендових випробувань дизель-електричного агрегату (двигуни ЯМЗ-238М2 та СМД-23.07) вимірювали кут повороту вала ВМ, що дозволяло оцінити переміщення рейки ПНВТ під час роботи. На рис. 4.5 наведено коливання рейки ПНВТ під час стендових випробувань.

Дослідження, виконані при амплітуді коливань 3 мм, було додано для визначення загальних тенденцій впливу ПД-параметрів у випадках неоптимально відрегульованих дизелів або при неправильно обраній потужності ВМ.

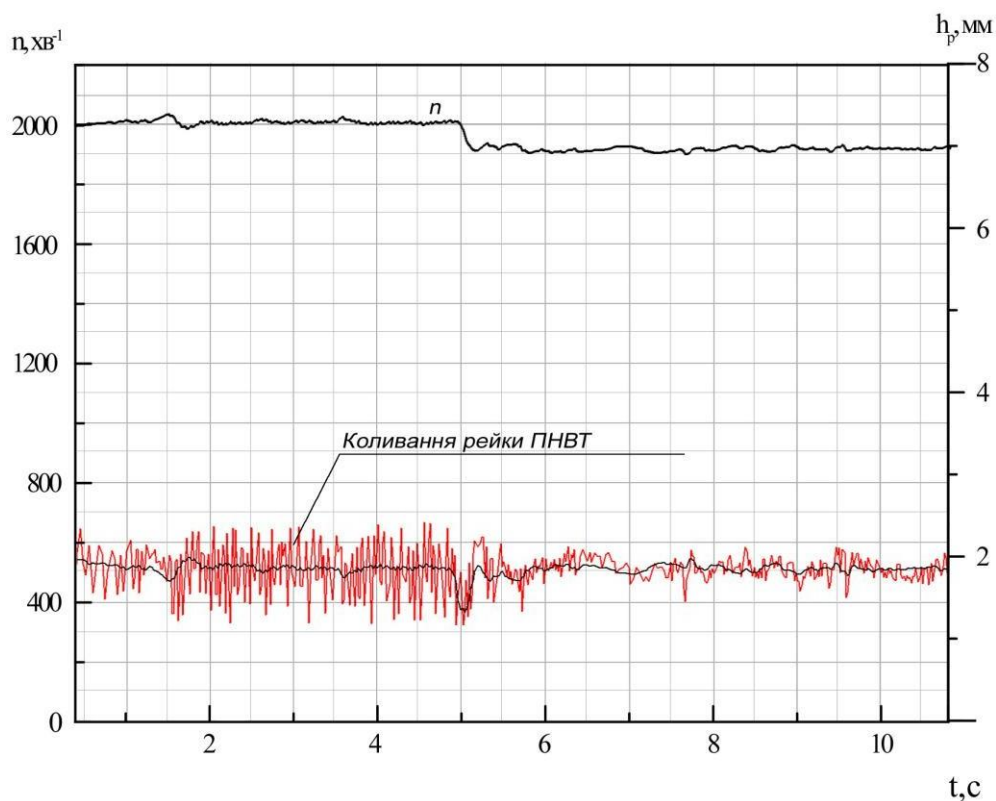


Рисунок 4.5 – Коливання рейки ПНВТ під час проведення стендових випробувань

Під час першого етапу досліджень почергово змінювали значення П, І та Д складових у діапазоні, що забезпечував стабільну роботу дизеля. Для П-складової обирали значення 2, 5 та 13, для І-складової — 2, 10 та 20, а для Д-складової відповідно — 2 та 12.

Це дозволило визначити вплив окремих складових на вплив вібрацій на роботу двигуна. Вимірювання проводили при максимальному значенні амплітуди вібрацій — 3 мм.

На другому етапі досліджень виконали серію випробувань на математичній моделі. Випробування проводилися при частоті обертання 1850 об/хв, час вимірювання витрат палива складав 12 с. Значення ПД-параметрів обирали за раціональними, визначеними під час моторних випробувань: П = 5 %, І = 10 %, Д = 12 %. Ці значення використовували як еталонні.

Під час другого етапу досліджень усі три складові ПД змінювали одночасно. Вимірювання виконувалися за трьома наборами параметрів: П = 1 %, І = 2,5 %, Д = 3 %; П = 5 %, І = 10 %, Д = 12 %; П = 10 %, І = 20 %, Д = 25 %.

Це дозволило оцінити вплив сумарного корегуючого коефіцієнта підсилення на роботу дизеля за наявності вібрацій. Отримані результати випробувань наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. – Результати досліджень впливу ПД-параметрів на роботу дизеля за наявності вібрацій при частоті обертання в 1850 хв<sup>-1</sup>

Значення ПД-параметрів	Витрати палива під час випробувань, г	Відхилення у витратах палива від еталонного випробування, %
П=5, І=10, Д=12 (еталонне)	44,1	0
П=2, І=10, Д=12	44,1	0

Продовження табл.4.7

П=13, I=10, Д=12	44,13	0,07
П=5, I=2, Д=12	44,73	1,43
П=5, I=20, Д=12	45,04	1,44
П=5, I=10, Д=2	44,16	0,14
П=5, I=10, Д=12	44,13	0,07
П=1, I=2,5, Д=3	44,1	0
П=10, I=20, Д=25	44,07	-0,07

З результатів, наведених у таблиці 4.7, видно, що вплив налаштувань ПД-параметрів на зміну витрати палива дизелем є незначним. Зміни сумарного корегуючого коефіцієнта підсилення практично не впливають на економію палива. Найбільший ефект на збільшення витрат палива може спричиняти неправильне налаштування інтегральної (I) складової.

Наступним етапом досліджень було визначення впливу ПД-налаштувань на витрату палива при різних рівнях вібрацій двигуна під час різкого збільшення частоти обертання від холостого ходу до 1850 об/хв.

**Вплив раціональних параметрів ПД-регулятора на витрату палива дизеля представлений у додатку А.**

#### **Висновки до розділу 4**

Для дизелів КТЗ визначено необхідність встановлення значень ПД-параметрів у широкому діапазоні швидкісних режимів (від 800 до 3000 об/хв) та забезпечення якісних перехідних процесів для цього інтервалу. Для виконання цієї задачі була розроблена методика досліджень для визначення оптимальних ПД-параметрів у всьому швидкісному та навантажувальному діапазоні.

Запропоновано використання комплексного корегуючого коефіцієнта  $k_{\Sigma}$ , який пропорційно змінює П, I та Д-складові. На основі експериментальних даних отримано тривимірний масив значень  $k_{\Sigma}$  у залежності від частоти обертання колінчастого вала та навантаження на дизель.

Встановлено необхідність індивідуального підбору виконавчого механізму (ВМ) і ПД-параметрів для кожного типу двигунів з урахуванням їх

експлуатаційного призначення.

Отримано вихідні дані для створення математичної моделі дизеля, обладнаного електронним вузлом регулювання (ЕВР), та проведена перевірка адекватності моделі в статичі та динаміці.

Виявлено, що збільшення амплітуди коливань може свідчити про недостатню потужність ВМ. Для оцінки допустимого рівня коливань рейки ПНВТ та визначення їх впливу на раціональні ПД-параметри розроблено методику та програму досліджень на математичній моделі.

Результати моторних випробувань підтвердили зростання вібрацій дизеля при частотах обертання, близьких до номінальних (для дизеля 4ЧН12/14 — 1850 об/хв і вище). Дані підтверджують необхідність дослідження впливу зовнішніх вібрацій на роботу САРЧ. Встановлено, що залежність циклової подачі палива від положення рейки ПНВТ є нелінійною, а вібрації рейки у бік збільшення або зменшення подачі не компенсують одна одну, що призводить до зміни витрат палива.

Визначено, що зростання витрат палива зі збільшенням зовнішніх вібрацій відбувається нелінійно. При рівні вібрацій до 1 мм (включно) перевитрат палива не спостерігається. Встановлено, що вплив налаштування ПД-параметрів на витрату палива дизелем у усталених режимах є незначним.

З'ясовано, що за малих (до 1 мм) і великих (понад 3 мм) рівнів вібрацій зміна інтегральної (І) складової не впливає на витрату палива. Проте при вібраціях у межах 1–3 мм зменшення І-складової призводить до зниження витрат палива. За результатами моделювання перехідних процесів встановлена економія палива на рівні 2,25 %.

## РОЗДІЛ 5

ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПІД-МОДЕЛЮВАННЯ В МОТОРНИХ І  
ДОРОЖНІХ ВИПРОБУВАННЯХ**1.1. Додаткове уточнення процесів запуску і зупинки на дизелі**

На рис. 5.1–5.2 наведено цифровий запис пуску, роботи дизеля в режимі мінімального холостого ходу та його зупинки з використанням ПІД-параметрів, налаштованих для режиму холостого ходу. Значення пропорційної (П) складової у 2 % забезпечує стабільну роботу двигуна на холостому ходу та відсутність перерегулювання під час пуску.

Стабільність процесів пуску та зупинки дизеля підтверджує правильність обраних ПІД-параметрів. Коректність вибору П-складової підтверджується невеликим відхиленням фактичного положення рейки ПНВТ від значення, встановленого регулятором (рис. 5.3).

Перевірка пуску і зупинки є обов'язковою при налаштуванні мікропроцесорного регулятора, оскільки в математичній моделі ці режими не враховувалися.

Під час стендових випробувань, хоча дизель СМД успішно запускався та працював стабільно на середніх і високих частотах, на низьких частотах спостерігалось входження системи в режим автоколивань з амплітудою до 20 %. Це підтверджує необхідність використання комплексного корегуючого коефіцієнта, значення якого було визначене під час попередніх досліджень на математичній моделі.

Для уточнення значень комплексного корегуючого коефіцієнту  $K_{\Sigma}$  були проведені серії вимірювань на мінімальних, робочих та перехідних частотах колінчастого вала. Підбирали значення ПІД-параметрів, що задовольняють мінімальним та максимальним значенням частоти обертання.

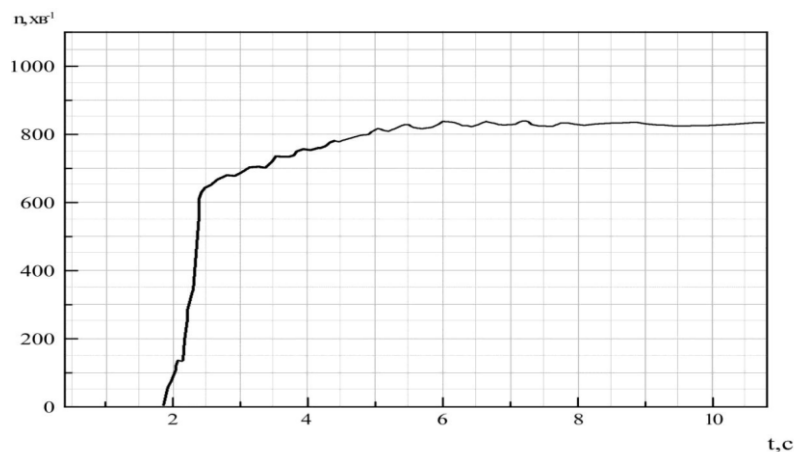


Рисунок 5.1 – Пуск дизеля при:  $\Pi=2,0\%$ ;  $I=10,0\%$ ;  $D=12,0\%$ .

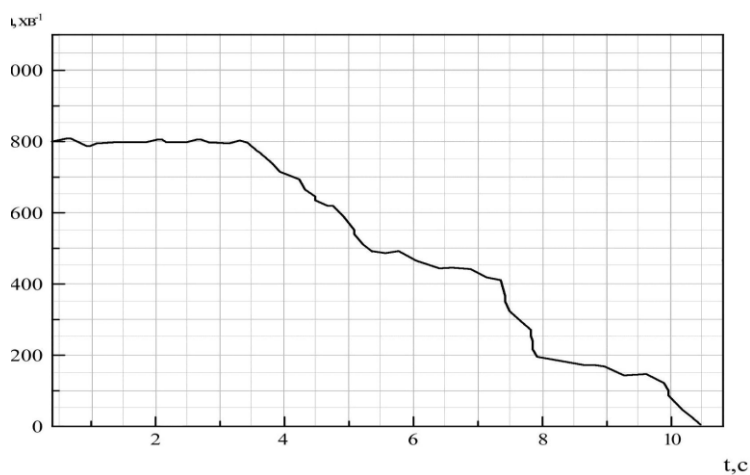


Рисунок 5.2 – Зупинка дизеля при:  $\Pi=2,0\%$ ;  $I=10,0\%$ ;  $D=12,0\%$ .

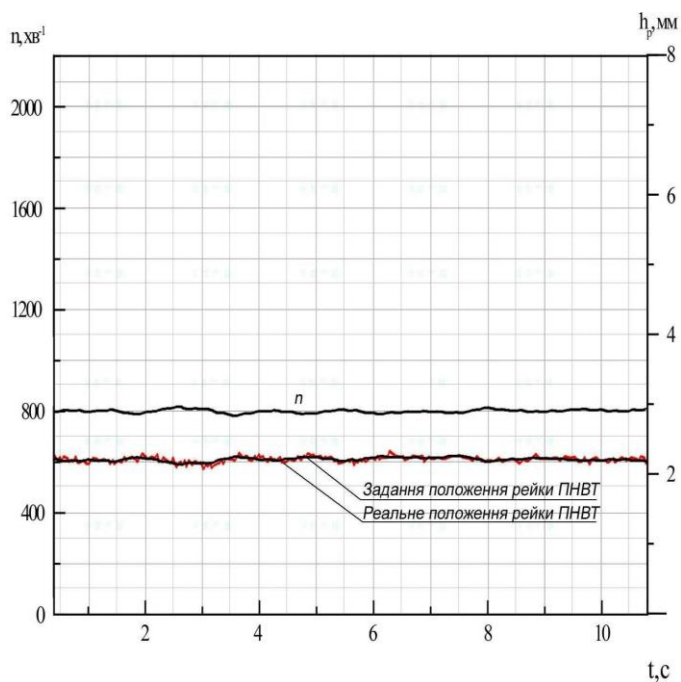


Рисунок 5.3 – Робота дизеля в режимі мінімального холостого ходу:  $\Pi=2,0\%$ ;  $I=10,0\%$ ;  $D=12,0\%$ .

## 1.2. Перевірка раціональних налаштувань ПД-параметрів дизеля при зміні швидкісних режимів

На рис. 5.4 показано роботу дизеля, налаштованого для режиму холостого ходу ( $\Pi = 2,0\%$ ;  $I = 10,0\%$ ;  $D = 12,0\%$ ), під час роботи в номінальному швидкісному режимі. Низьке значення  $\Pi$ -складової виявилось недостатнім для забезпечення стабільної роботи дизеля.

Після налаштування ПД-параметрів для режиму холостого ходу було проведено коригування для роботи дизеля на номінальній частоті обертання (рис. 5.5). Стабільну роботу двигуна вдалося досягти шляхом підвищення  $\Pi$ -складової з  $2\%$  до  $13,5\%$ .

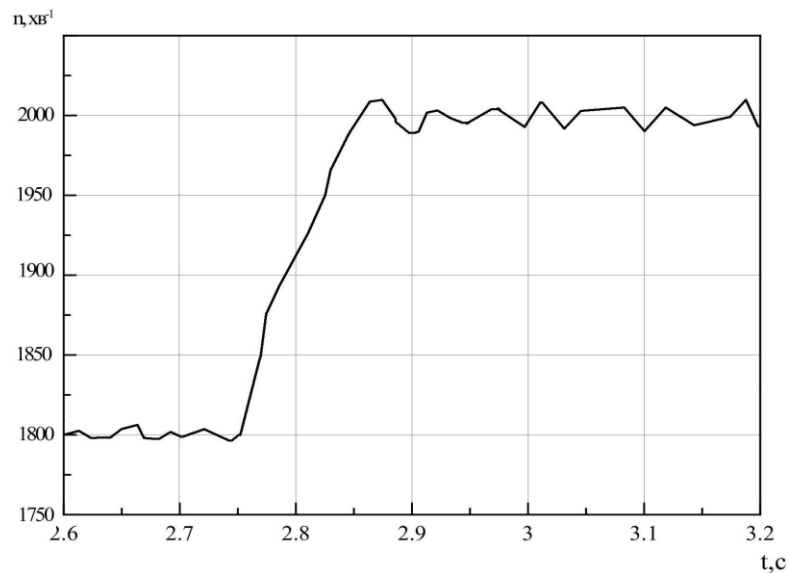


Рисунок 5.4 – Перехідний процес і робота дизеля за частоти обертання  $2000\text{хв}^{-1}$ :  
 $\Pi=2,0\%$ ;  $I=10,0\%$ ;  $D=12,0\%$

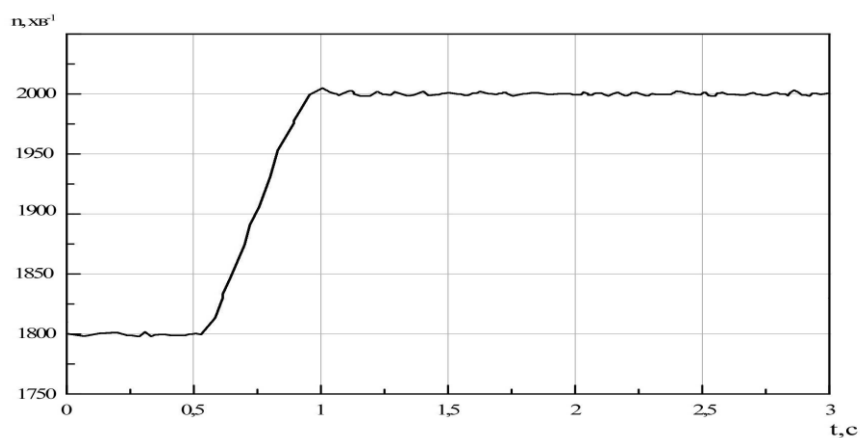


Рисунок 5.5 – Перехідний процес і робота дизеля за частоти обертання  $2000\text{хв}^{-1}$ :  
 $\Pi=13,5\%$ ;  $I=10,0\%$ ;  $D=12,0\%$

Проте, за значення  $\Pi$ -складової в  $13,5\%$  робота дизеля в режимі холостого ходу погіршилася (рис. 5.6).

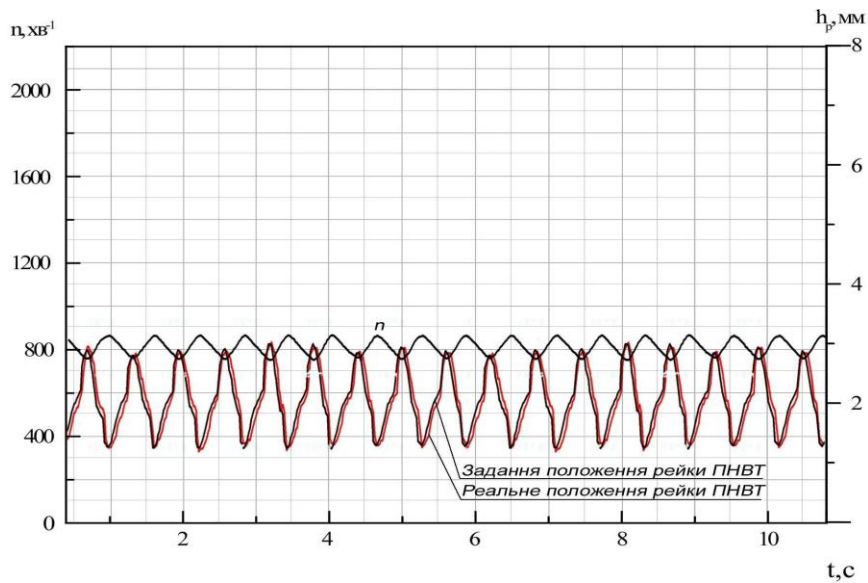


Рис. 5.6. - Робота дизеля в режимі мінімального холостого ходу:  $P=13,5\%$ ;  $I=10,0\%$ ;  
 $D=12,0\%$

Отримані результати підтвердили необхідність переналаштування ПД-параметрів при зміні режиму роботи дизеля.

У блок електронного блоку керування (ЕБК) було внесено комплексний корегуючий коефіцієнт  $K_{\Sigma}$  для ПД-параметрів залежно від швидкісного режиму дизеля. Було проведено серію випробувань, у яких досліджували перехідні процеси при зміні частоти обертання колінчастого вала від холостого ходу до номінального режиму з кроком 200 об/хв. На рис. 5.7–5.12 наведено результати вимірювань, отримані під час цих досліджень.

Аналіз перехідних процесів показав, що перерегулювання не перевищувало 2,5 %, тривалість перехідного процесу не перевищувала 0,5 с, а кількість коливань під час регулювання не перевищувала 2.

При роботі на номінальному швидкісному режимі збільшувалися вібрації корпусу дизеля, що спричиняло коливання рейки ПНВТ та погіршувало стабільність роботи двигуна.

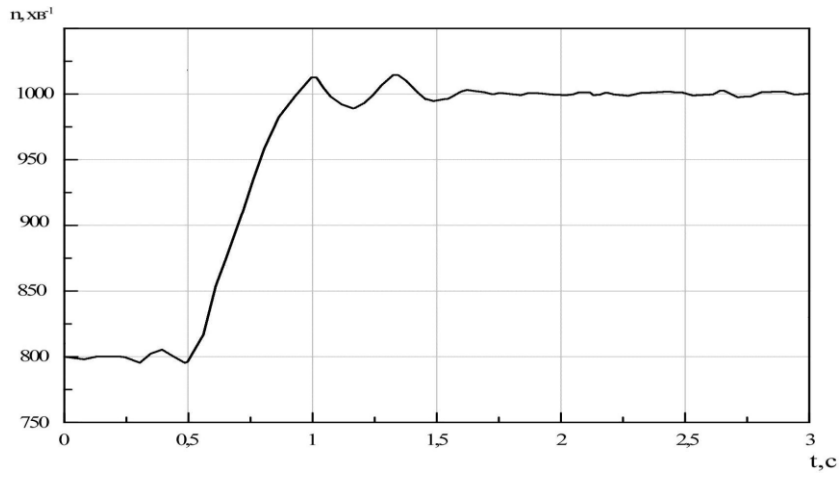


Рисунок 5.7 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 800 до 1000  $\text{хв}^{-1}$

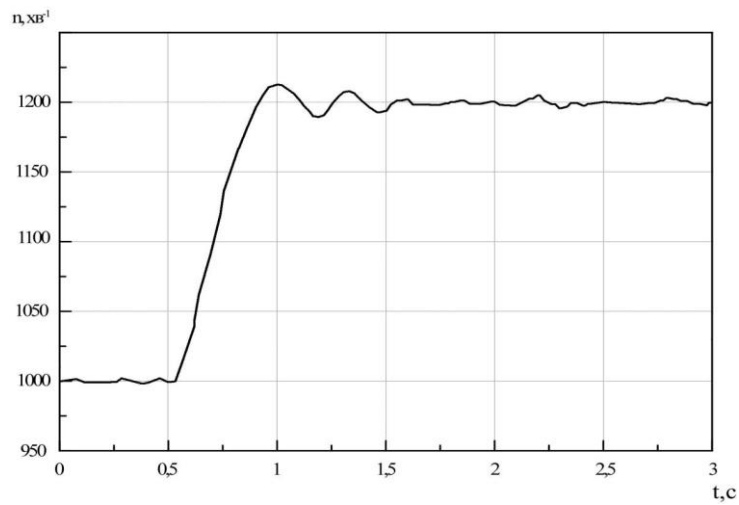


Рисунок 5.8 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1000 до 1200  $\text{хв}^{-1}$

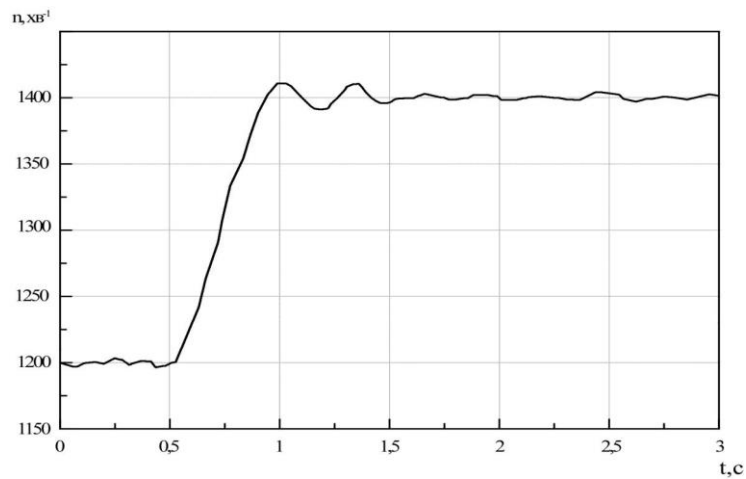


Рисунок 5.9 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1200 до 1400  $\text{хв}^{-1}$

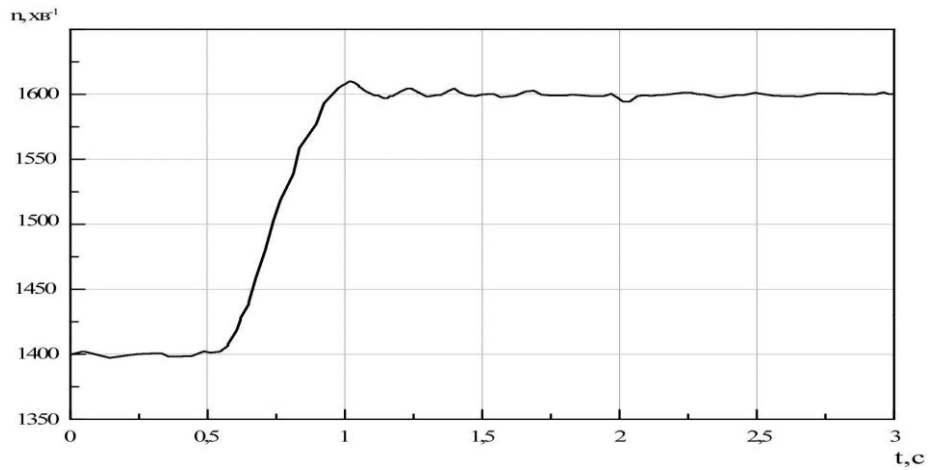


Рисунок 5.10. – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1400 до 1600 хв<sup>-1</sup>

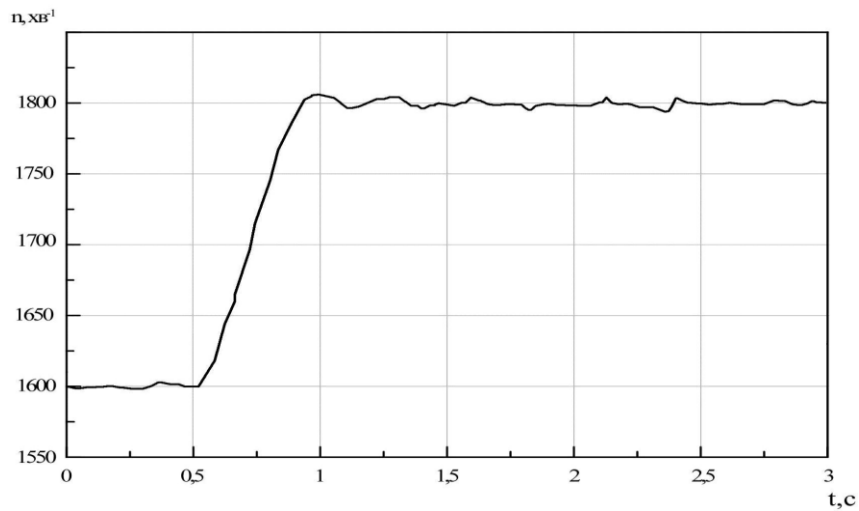


Рисунок 5.11. – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1600 до 1800 хв<sup>-1</sup>

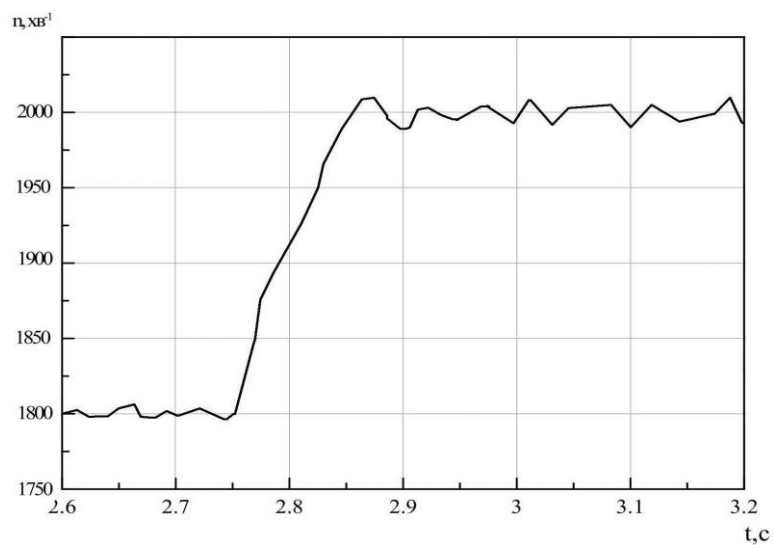


Рисунок 5.12 – Перехідні процеси та робота дизеля при збільшенні частоти обертання з 1800 до 2000 хв<sup>-1</sup>

Було проведено аналіз значень кута повороту вала виконавчого механізму (ВМ), які були перетворені в величини переміщення рейки паливного насосу високого тиску (ПНВТ). На рис. 5.13 та 5.14 наведено перехідні процеси, що виникають при різкому та миттєвому зниженні частоти обертання колінчастого вала з рівня 2000 об/хв з інтервалом по 100 об/хв. На рисунках показані зміни частоти обертання, значення положення рейки ПНВТ, які задавалися електронним блоком керування (ЕБК), а також фактичні значення положення рейки.

На рис. 5.13 видно, що при частоті обертання колінчастого вала 2000 об/хв амплітуда коливань рейки ПНВТ значно зростає. Це пояснюється підвищенням вібрацій корпусу двигуна у високошвидкісному режимі. Отримані дані підтверджують важливість проведених досліджень щодо впливу вібрацій на роботу системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) дизеля.

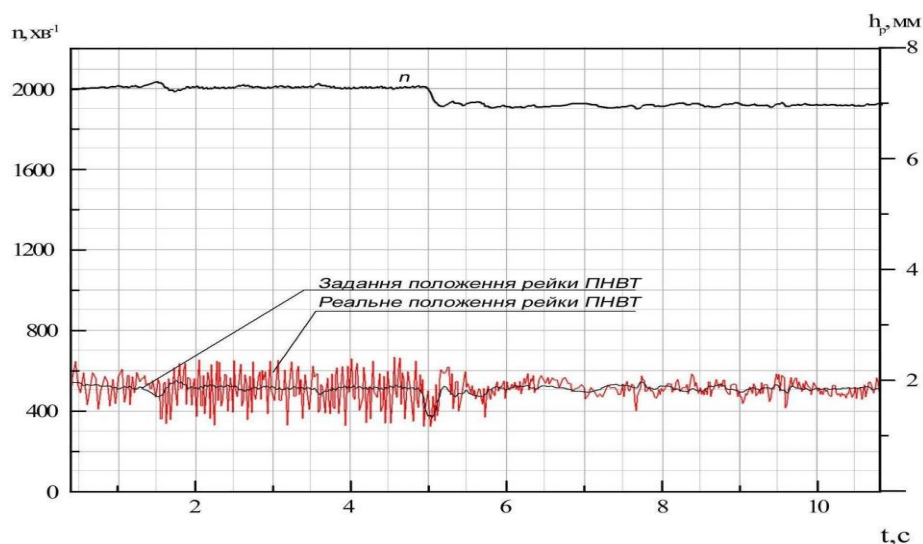


Рисунок 5.13. Робота дизеля при зменшенні частоти обертання з 2000  $\text{хв}^{-1}$  до 1900  $\text{хв}^{-1}$

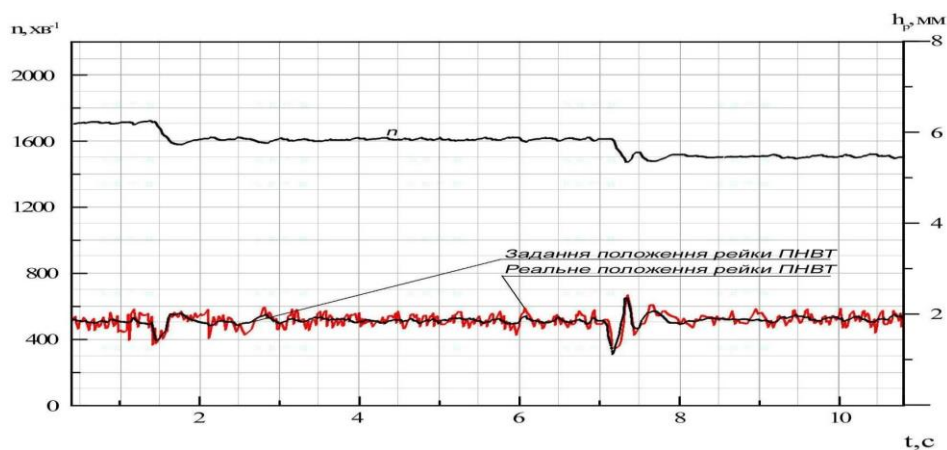


Рисунок 5.14 – Робота дизеля при зменшенні частоти обертання з 1700  $\text{хв}^{-1}$  до 1600  $\text{хв}^{-1}$

### 1.3. Порівняння показників роботи дизеля з різними регуляторами

Для порівняння якості регулювання розробленого ЕВР провели порівняння роботи дизеля 4ЧН12/14 в швидкісних режимах  $800 \text{ хв}^{-1}$  (рис. 5.15),  $1100 \text{ хв}^{-1}$  (рис. 5.16) та  $1800 \text{ хв}^{-1}$  (рис. 5.17) з регуляторами інших типів.

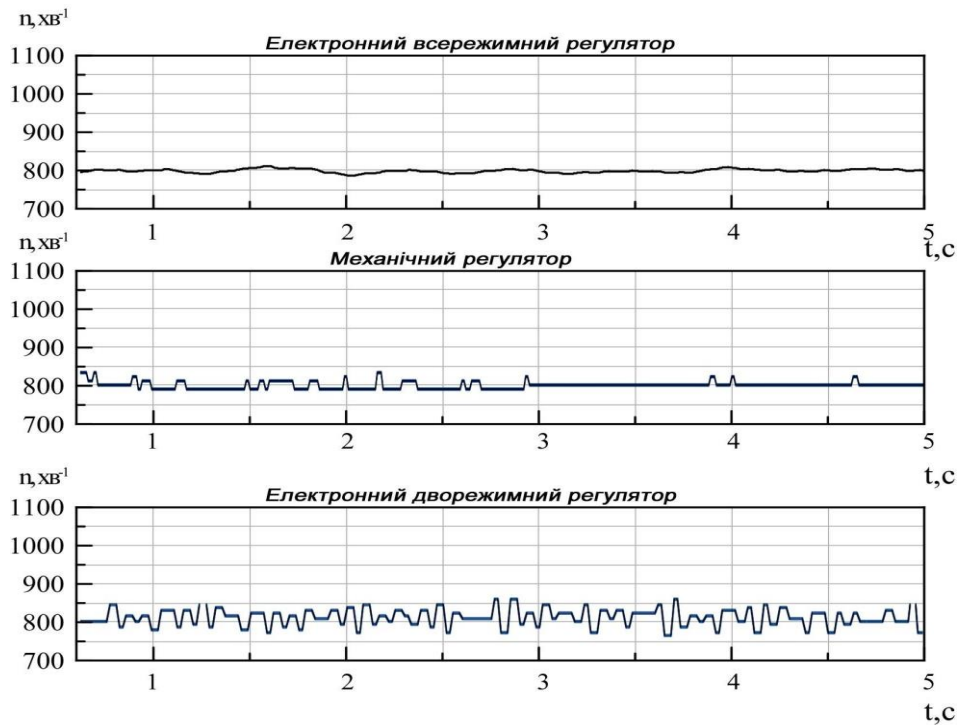


Рисунок 5.15 – Порівняння роботи дизеля 4ЧН12/14 з різними регуляторами при роботі в режимі мінімального холостого ходу  $800 \text{ хв}^{-1}$

Отримані результати показують, що стабільність підтримання частоти обертання  $\delta_{\text{ст}}$  розробленим електронним всережимним регулятором за різних уставлених швидкісних режимах не перевищує 5 % та не гірша, ніж при використанні механічного регулятора та дворежимного електронного регулятора.

Роботу дизеля з електронним всережимним регулятором у перехідних режимах порівнювали з аналогічними перехідними процесами цього ж двигуна, але з механічним дворежимним регулятором. На рис. 5.18 представлено перехідний процес при збільшенні частоти обертання колінчастого вала з 1000 до 1200 об/хв, зафіксований на гальмівному стенді KS-56.

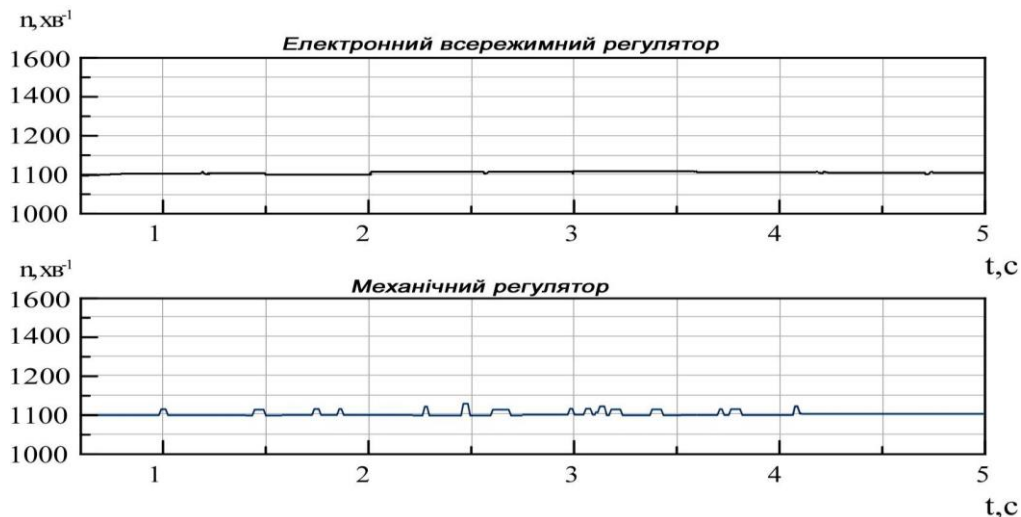


Рисунок 5.16 – Порівняння роботи дизеля з різними регуляторами за частоти обертання колінчастого вала 1100 хв<sup>-1</sup>

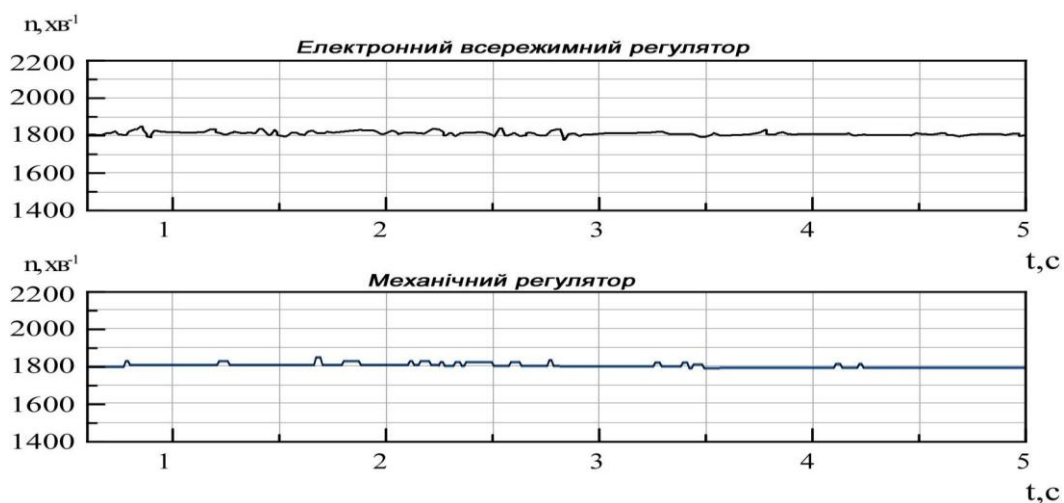


Рисунок 5.17 – Порівняння роботи двигуна з різними регуляторами за частоти обертання колінчастого вала 1800 хв<sup>-1</sup>

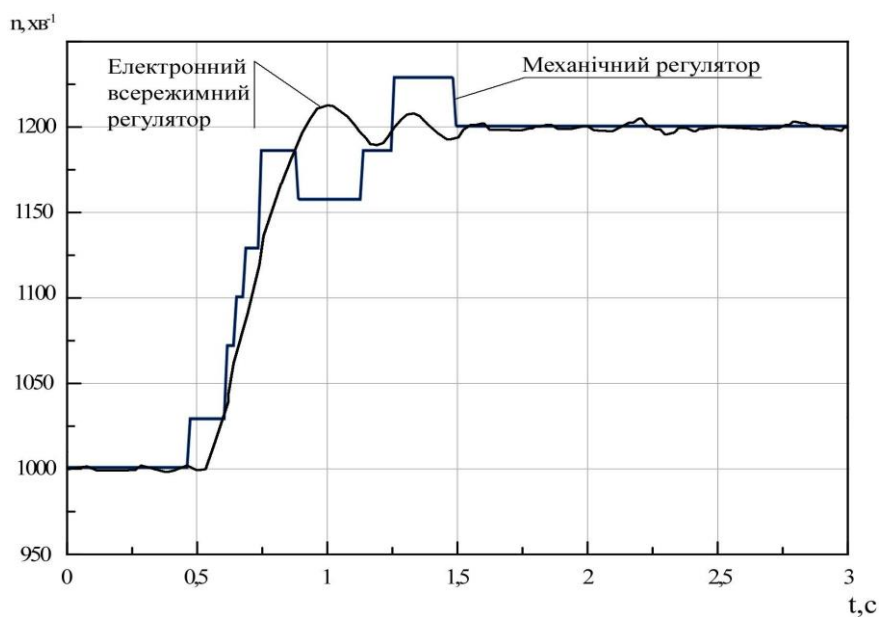


Рисунок 5.18 – Порівняння перехідних процесів двигуна з механічним та електронним регулятором

Низька дискретність сигналу механічного регулятора пояснюється обмеженою розрядністю аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який обробляв сигнали від датчика.

При проведенні порівняльного аналізу перехідних процесів було встановлено, що закидання частоти обертання при роботі електронного всережимного регулятора становило 1,3 %, тоді як на механічному регуляторі цей показник був вищим і дорівнював 2,3 %. Час встановлення частоти обертання у обох випадках склав 0,7 с.

Під час випробувань був відтворений режим вільного прискорення дизеля, коли час різкого збільшення частоти обертання становив 5 с, аналогічно до випробувань із механічним регулятором. У цьому режимі електронний всережимний регулятор (ЕВР) забезпечував стабільний темп переміщення рейки ПНВТ на рівні 0,3 мм/с. На рис. 5.19 наведено порівняння частоти обертання колінчастого вала та переміщення рейки ПНВТ при роботі дизеля з електронним всережимним регулятором.

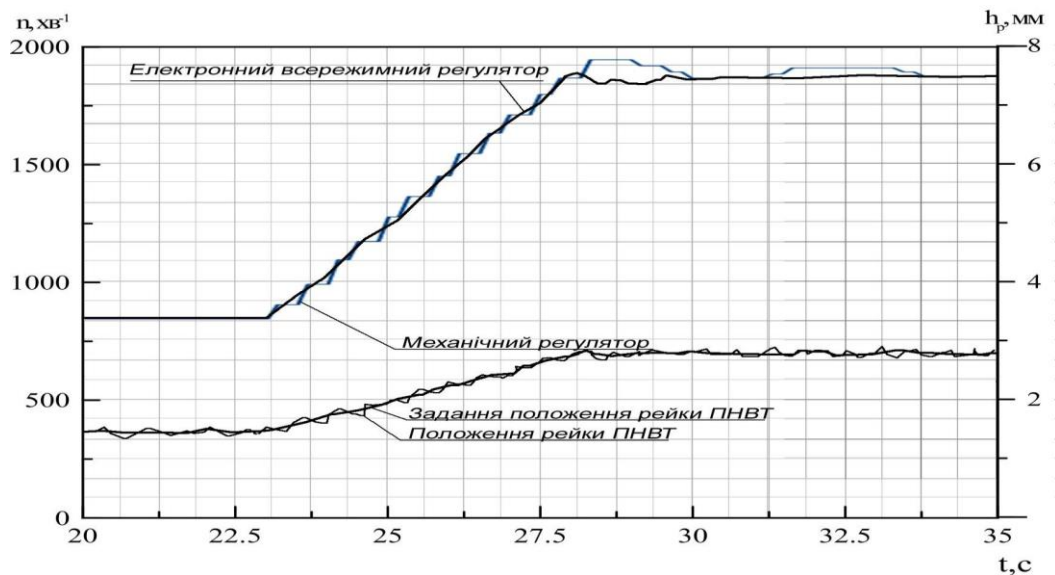


Рисунок 5.19 – Порівняння вільного прискорення двигуна з механічним та електронним регулятором

Отримані результати демонструють стабільну та ефективну роботу електронного всережимного регулятора на різних статичних і динамічних режимах роботи дизеля. Вони також підтверджують необхідність коригування ПД-параметрів залежно від режиму роботи двигуна для забезпечення оптимальної стабільності та швидкодії системи регулювання.

#### **1.4. Підтвердження результатів ПІД-моделювання дорожніми випробуваннями**

Для підтвердження правильності налаштування ПІД-регулятора для дизелів КТЗ були проведені випробування дизеля 8Ч13/14 на тракторі Т150К під час розгонів із переключенням передач. У цих умовах перехідні процеси в системі автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) дизеля виникають не тільки через накидання навантаження, як це відбувається у дизель-електричному агрегаті, а у змішаному режимі — одночасно під час натискання на електронну педаль та передавання навантаження від трансмісії через зчеплення.

На рис. 5.20 показано трактор Т150К, встановлений на бігових барабанах, що дозволяє здійснювати налаштування параметрів регулювання під реальним навантаженням.



Рисунок 5.20 – Трактор Т150К встановлений на бігових барабанах Дизель 8Ч13/14 був відрегульований на номінальну потужність 128 кВт при частоті обертання колінчастого вала 2100 об/хв. На двигуні встановлено паливний насос високого тиску (ПНВТ) типу 80.05-30, оснащений всережимним електронним регулятором частоти обертання. Ступінь нерівномірності роботи зовнішньої та часткових регуляторних гілок була однаковою і становила 6 %.

Повна маса трактора зі встановленою додатковою вагою становила 9400 кг. Габаритні розміри машини були такими: висота — 3,19 м, ширина — 2,4 м.

Коробка передач трактора є механічною з гідравлічним приводом, що забезпечує перемикання без розриву потоку потужності, що дозволяє проводити розгони та навантажувальні випробування без переривання передачі моменту від двигуна до трансмісії.

Випробування проводилися на горизонтальній асфальтованій дорозі, для чого була обрана спеціальна ділянка довжиною 50 м, призначена для розгону трактора. Розгін дизеля на тракторі здійснювався з місця на першій передачі до другої транспортної швидкості з подальшим поетапним переключенням передач до четвертої. На другій передачі досягали максимальної швидкості 12 км/год. Цей режим був обраний з урахуванням того, що частота обертання дизеля досягала 1800–1850 об/хв під час розгону.

Було виконано 11 заїздів в одному напрямі, під час яких здійснювався цифровий запис параметрів САРЧ дизеля та роботи трактора. Для подальшого аналізу було відібрано 5 результатів, при яких розгін трактора до 12 км/год відбувався на ділянці довжиною близько 30 м. На рис. 5.21 представлено цифровий запис зміни частоти обертання колінчастого вала дизеля 8Ч13/14 під час перемикання передач, при цьому обраний графік найбільше відповідає заїзду, під час якого розгін трактора на 30 м був найбільш репрезентативним.

На рис. 5.22 показано фрагмент обробленого цифрового запису перехідних процесів у електронній САРЧ дизеля під час старту та подальшого розгону трактора на першій передачі.

Розраховані криві  $n_{\Pi}$  і  $\varphi_r^I$  - це теж результати цифрового запису, які прораховує мікроконтролер САРЧ без урахування інерційності КТЗ і особливостей переключання передач. Результати зіставлення фактичних і розрахункових значень електронної САРЧ були враховані при математичному моделюванні і увійшли в комплексний корегуючий коефіцієнт  $k_{\Sigma}$ .

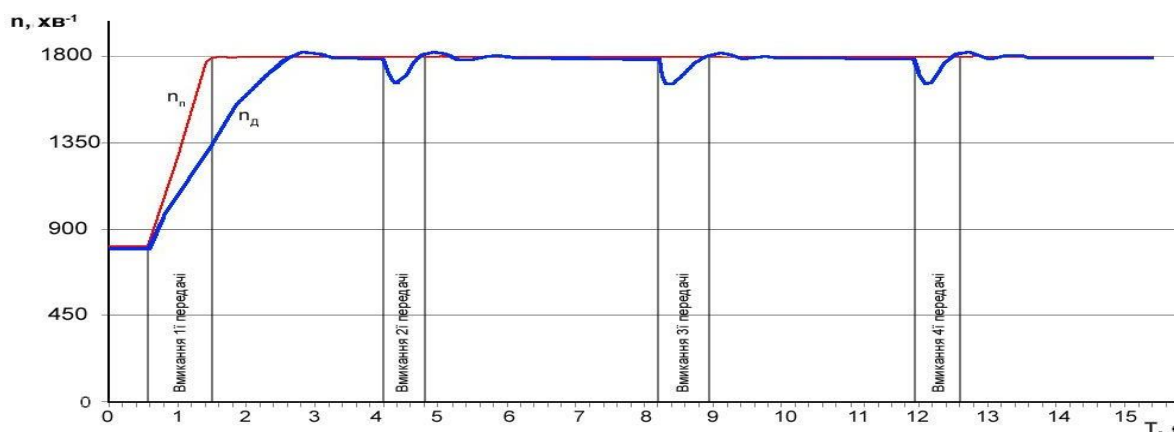


Рисунок 5.21 – Розгони дизеля 8Ч13/14 з переключанням передач на тракторі Т150К:  $n_{\Pi}$  і  $n_{Д}$  - задана і фактична частоти обертання колінчастого вала.

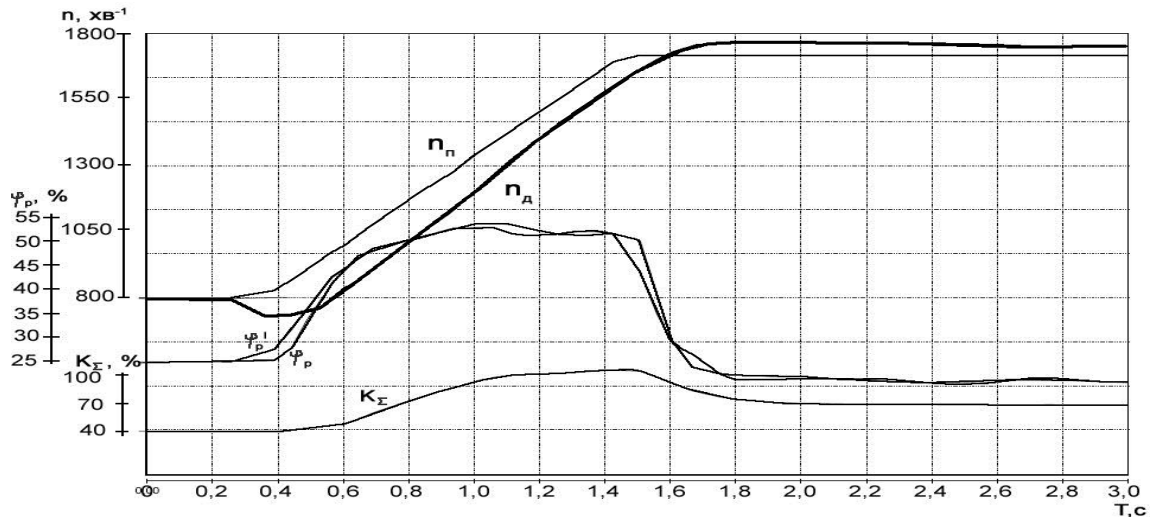


Рисунок 5.22 – Перехідні процеси в САРЧ дизеля 8Ч13/14 на тракторі Т150К при включенні і подальшому розгоні на першій передачі:

$n_p$  і  $n_d$  - задана і фактична частоти обертання колінчастого вала;  $\varphi_p^I$  і  $\varphi_p$  - задане і фактичне положення вала виконавчого механізму у відносних одиницях;  $K_\Sigma$  – сумарний корегуючий коефіцієнт настройки ПД-регулятора.

Показані на рис. 5.21 перехідні процеси САРЧ охоплюють швидкісний діапазон 800...1800 хв<sup>-1</sup>. У цьому робочому діапазоні дизеля величини сумарних коефіцієнтів  $K_\Sigma$  електронний блок визначає методом інтерполяції за значеннями опорних точок, які були наведені в табл. 4.6.

На початковій стадії перехідного процесу незначне падіння частоти обертання пояснюється буксуванням зчеплення упродовж 0,35 с. Натискання на електронну педаль приводить до зростання значення  $n_p$  частоти обертання, що задається. Електронний блок САРЧ реагує на це збільшенням заданого значення  $\varphi_p^I$ , положення вала виконавчого механізму. Під час перехідного процесу положення вала виконавчого механізму у відносних одиницях змінювалося від 20 до 53 %. Тривалість перехідного процесу склала 1,8 с. Сумарний корегуючий коефіцієнт  $K_\Sigma$  змінився від 0,4 до 1,0. Показники якості перехідного процесу відповідають 1-у класу точності САРЧ дизеля за ГОСТ 10511-83.

## Висновки до розділу 5

1. Обґрунтовано необхідність використання різних налаштувань ПІД-параметрів залежно від режиму роботи дизеля. Встановлено, що робота на низьких частотах обертання вимагає малих значень П-складової, тоді як для забезпечення стабільності при номінальному режимі необхідне її збільшення.

2. Результати моторних випробувань підтвердили зростання вібрацій дизеля на частотах обертання, близьких до номінальних. Це свідчить про необхідність врахування впливу вібрацій на роботу системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) при математичному моделюванні та налаштуванні ПІД-параметрів.

3. Проведено порівняльний аналіз результатів моторних випробувань дизеля з механічним регулятором, електронним дворежимним регулятором та електронним всережимним регулятором (ЕВР). Аналіз показав ефективну роботу ЕВР на різних статичних і динамічних режимах, а також підтвердив необхідність налаштування ПІД-параметрів і комплексного коригуючого коефіцієнта КΣ залежно від режиму роботи двигуна. Закидання частоти обертання під час перехідного процесу для ЕВР склало 1,3 %, тоді як для механічного регулятора цей показник був 2,3 %. Час встановлення частоти обертання у обох випадках становив 0,7 с.

4. Встановлено, що стабільність підтримання частоти обертання δс розробленим електронним всережимним регулятором у різних уставлених швидкісних режимах не перевищує 5 %, що відповідає або перевищує показники механічного та дворежимного електронного регулятора.

5. Розроблена методика налаштування ПІД-параметрів підтверджена результатами дорожніх випробувань, що забезпечило ефективну роботу дизеля в умовах реальної експлуатації.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу налаштування електронного всережимного регулятора швидкості автотракторного дизеля. Обґрунтовано вибір раціональних ПІД-складових з урахуванням якості перехідних процесів, паливної економічності та впливу вібраційних збурень.

1. На основі аналізу літературних джерел щодо систем автоматичного регулювання частоти обертання дизелів різних типів проведено порівняльний аналіз їх функціональних переваг та недоліків. Розроблено структурну та функціональну схеми електронного регулятора, який коригує ПІД-параметри залежно від частоти обертання колінчастого вала та положення рейки виконавчого механізму (ВМ).

2. Створено та випробувано експериментальний зразок всережимного мікропроцесорного регулятора (МР) з ПІД-управлінням та електромеханічним ВМ, здатним забезпечувати момент 1,4 Н·м при куті повороту вала  $36^\circ$  без використання редуктора. Встановлено мінімальну конфігурацію аналогових і цифрових входів мікропроцесорного блоку: не менше 4-х аналогових та 4-х цифрових каналів.

3. Розроблено алгоритм розрахунку циклової подачі палива для математичної моделі електронної САРЧ дизеля з всережимним регулюванням. Алгоритм враховує динаміку ВМ, ПІД-алгоритм регулювання подачі палива, підтримання кута нахилу регуляторної гілки та вплив вібрацій дизеля на роботу системи. Адекватність моделі підтверджена у статичі та динаміці.

4. Розроблено експериментально-розрахункову методику визначення раціональних ПІД-параметрів із врахуванням умов експлуатації автотракторного дизеля. Методика підтверджена безмоторними та моторними випробуваннями на дизелі 4ЧН12/14. Результатом стало формування тривимірного масиву значень комплексного коригуючого коефіцієнта  $K\Sigma$  для ПІД-складових МР.

5. В ході досліджень встановлено збільшення вібрацій дизеля на частотах обертання колінчастого вала  $n=0,9\dots 1,06n = 0,9\setminus 1,06n=0,9\dots 1,06$ . У цих умовах необхідне збільшення П-складової для забезпечення стабільності роботи. Для дизеля 4ЧН12/14 П-складову слід збільшити в 2,5 рази при ступені нерівномірності регулятора 0...6 %.

6. Рекомендовано після безмоторних випробувань виконати корекцію ПІД-складових на дизелі у діапазонах  $n=0,5\dots 0,9n = 0,5\setminus 0,9n=0,5\dots 0,9$  та  $n=0,9\dots 1,06n =$

0,9\1,06n=0,9...1,06 відносної частоти обертання колінчастого вала, зменшуючи комплексний коригуючий коефіцієнт КΣ відповідно з 5 % до 2 %. Методика налаштування ПД-параметрів підтверджена результатами дорожніх випробувань.

7. Встановлено, що зростання витрат палива зі збільшенням зовнішніх вібрацій рейки ПНВТ є нелінійним. При амплітуді коливань 1...3 мм зменшення І-складової дозволяє знизити витрати палива. За результатами моделювання перехідних процесів отримано економію палива на рівні 2,25 %.

Розроблений електронний всережимний регулятор забезпечує перший клас точності САРЧ та ефективно підтримує стабільну роботу дизеля у широкому діапазоні частот обертання та умов навантаження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Долганов К.Є. Автоматичне регулювання двигунів внутрішнього згоряння: навч. посібник / К.Є. Долганов, А.А. Лісовал — К.: НТУ, 2003. - 138 с.
2. Mayer Hans W. Перспективы применения дизелей в будущем. Erstickt der Diesel an kunftigen Abgasnormen? Mayer Hans W. AMZ: Auto, Mot., Zubehor. 2006. 94, #10, стр.32.
3. Лісовал А.А. Експериментальний дворезимний мікропроцесорний регулятор для автомобільного дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця // Автошляховик України. Окремий вип. Вісник ЦНЦ ТАУ. - №12. - 2009. — С. 141 — 144.
4. Богаевский А.Б. Метод определения оптимальных характеристик нагружения для микроконтроллерных регуляторов транспортных дизель-электрических установок// Праці Луганського відділення Міжнарод. акад. інформатизації. Науч. журн. №2, 2004.-с. 52-55.
5. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. — №4. - 2009. - С. 23.
6. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизелів (продовження) / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. - №5. - 2009. - С. 18- 20.
7. Настройка электронного регулятора дизеля / Лісовал А.А., Вербовський О.В. // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 19.– Одеса: ОНМА. – С. 49-54.
8. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. - Первомайськ: ППІ НУК, 2009. - С. 231 - 236.
9. Лісовал А.А. Всережимний електронний регулятор дизеля колесного

транспортного средства / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський - Двигуни внутрішнього згоряння, №1, 2012 – С. 49-52.

10. Лісовал А.А. Математична модель електронного всережимного регулятора з ПНВТ дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXVIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. - К: НТУ, 2012р.

11. Лісовал А.А. Безмоторні випробування складових елементів електронного регулятора на базі регулятора фірми Heinzmann/ А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXIV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. - К: НТУ, 2008р.

12. Говорун А.Г. Результати польових випробувань трактора МТЗ-80 з різними способами регулювання дизеля / А.Г. Говорун, А.О. Корпач, М.О. Сельский, П.В. Куций // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту : наук.-вироб. зб. / Автомобільно-дорожній ін-т Донец. нац. техн. ун-ту. – Горлівка: 2010 №1 (10), с. 110-115.

13. Головчук А.Ф. Дослідження універсального регулятора колісних тракторів / А.Ф. Головчук, А.В. Садовников, Р.М. Харак // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ: ЕНЕМ. – 2004.– С. 53-54.

14. Експериментальні дослідження механічного регулятора паливного насосу 4 утн-м, з параметрами, що забезпечують зміну принципу регулювання двигуном / А.Г. Говорун, М.В. Павловський, П.В. Куций // ВІСНИК ЖДТУ. 2014. № 2 (69). – С. 81–84.

15. С.В. Костиця Вибір раціональних параметрів і розробка електронного регулятора частоти обертання дизеля: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03. - Теплові двигуни і енергетичні установки // С.В. Костиця – 2014. – 22 с.

16. Попович О.М. Моделі та методи для комплексного дослідження та проектування електромеханічних систем / О.М. Попович, О.В. Бібік, Ю.В. Шуруб, І.В. Головань // Праці ІЕД НАНУ. – 2006. – № 2(14). – С. 68-71.

17. Лісовал А.А. Обґрунтування необхідності використання електронних

регуляторів на автотракторних дизелях / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський //Тези доповідей LXIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2007р.

18. Лісовал А.А. ПД-параметри мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Вісник КДПУ: Наук. праці, Кременчук, вип. 5/2008(52). Част. 2, 2008. – С. 112-114.

19. Лісовал А.А. Результати моторних досліджень для вибору раціональних параметрів регулювання мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // «Збірник наукових праць 2-ї щорічної міжвузівської науково-технічної конференції» м. Донецьк 2010р.

20. Математична модель електронного всережимного регулятора з ПНВТ дизеля / Лісовал А.А., Вербовський О.В. // Тези доповідей LXVIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету.-К: НТУ, 2012р.

21. Лісовал А.А. Математичне моделювання автоматичної системи управління автотракторним дизелем / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Управління проектами, системний аналіз і логістика, - Наук. журнал: в 2ч. –Ч.1.– Серія «Технічні науки».– К: НТУ.– 2014.– Вип.14. – С.109–114

22. Лісовал А.А. Безмоторні випробування складових елементів електронного регулятора на базі регулятора фірми Heinzmann / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Тези доповідей LXIV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. - К: НТУ, 2008р.

23. Лісовал А.А. Визначення апроксимуючих залежностей характеристик дизеля СМД-23.07 для диференціального рівняння руху двигуна / А.А. Лісовал, М.І. Гуменчук // Вісник Кременчуцького держ. політех. у-ту. – Кременчук: КДПУ. – 2004. – Вип.4/2004 (27). – С. 116–118.

24. Вербовський О.В. Моделювання всережимного електронного

регулятора швидкості дизеля/ Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 58166 від 20.01.2015 р.

25. Лісовал А.А. Корежуючий коефіцієнт ПІД-параметрів мікропроцесорного регулятора дизеля / А.А. Лісовал, О.В. Вербовський // Systems and means of motor transport. Politechnika Rzeszowska, Poland, 2011. С. 167-170.

26. Лісовал А.А. Результати досліджень на математичній моделі дизеля з електронним регулятором / А.А. Лісовал, С.В. Кострица, А.В. Вербовський // LXIX Науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, студентів та структурних підрозділів університету. - К.: НТУ, - 2013. - С. 21.

27. Лісовал А.А. Когенераційна установка з газовим двигуном / Лісовал А.А., Нижник М.Є., Вербовський О.В.. / Водний транспорт: зб. наук. праць – 2013. – Вип. 3 (18).– К.: КДАВТ. – С. 51–55.

Методичні рекомендації до виконання та оформлення дипломних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» / Ю.І. Панцир, А.В. Рудь, В.І. Дуганець, В.І. Дуганець, Л.С. Шелудченко, С.М. Грушецький, С.П. Комарніцький. За ред. В.І. Дуганця. – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ, 2025. - 52с.