

*О.Ю. Лінков, О.С. Шевченко*

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІоТ В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

Визначення параметрів роботи систем двигуна є дуже важливим для забезпечення його тривалої надійності. У сучасних енергетичних установках використовується велика кількість сучасних електронних компонентів (датчиків, контролерів та інших). Всі системи генерують величезний об'єм даних, які треба відслідковувати, обробляти та аналізувати, що в свою чергу створює виклики до шлюзів та серверів. Однак сучасний стан розвитку мікроконтролерів та їх потужність дозволяють використовувати туманні обчислювання, що може привести до більш ефективного використання, як енергетичної установки, так і систем передавання даних. Також використання сучасних мікроконтролерів та туманних обчислень дозволяє модернізувати старі енергетичні установки з мінімальними зусиллями та створювати нові інформаційні вузли моніторингу стану вузлів та систем двигуна та з легкістю поєднувати їх з вже існуючими на двигуні системами. Розглянуто вибір мікроконтролера та обґрунтування його типу для модернізації паливної системи дизельного двигуна. В паливній системі високого тиску дизельних двигунів відбуваються швидкоплинні процеси, які можна визначати по зміні тиску палива. Для детального вимірювання процесів в паливній системі вимірювання треба проводити з частотою не менше ніж 24 кГц, тобто: якщо частота обертання колінчастого валу буде  $4000 \text{ хв}^{-1}$ , то треба проводити 24 000 вимірювань кожну секунду (при реєстрації даних через 1 градус повороту колінчастого валу). Інший показник, що накладає свої вимоги це розрядність аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що залежить від діапазону значень що реєструють. Наприклад, АЦП, що має розрядність 8 бітів, здатний видати 256 дискретних значень (0...255). Тобто чим вище розрядність тим більш чутливий до змін сигналу перетворювач і 8 бітів може бути недостатньо. Таким чином навіть невелика кількість датчиків може створювати величезний об'єм даних. Передавання великих об'ємів даних є нераціональним і може призводити до втрати даних і «засмічення» каналів передавання, що стає викликом до обчислювальних характеристик мікропроцесора.

**Ключові слова:** двигун внутрішнього згоряння; вимірювання; моніторинг; промисловий інтернет речей; параметри надійності; прогнозне технічне обслуговування.

### Вступ

Сучасна енергетична установка неможлива без сучасної електроніки. Електронні компоненти дозволяють визначати параметри роботи усіх систем, встановлювати на базі отриманих даних керуючі параметри, збирати дані для їх аналізу та передбачати вихід системи з ладу. Розвиток електронних компонентів та комунікацій дозволяє використовувати їх у все більших колах завдань. Тобто не тільки отримувати дані від різноманітних датчиків, а і проводити їх аналіз, як на самому об'єкті (граничні та туманні обчислення), так і у хмарі із застосуванням штучного інтелекту. Прогнозне технічне обслуговування є одним із завдань для системи промислового інтернету речей (ІоТ). Використання систем ІоТ можливе, як для сучасних об'єктів, що вже обладнані комплексами для моніторингу та діагностики, так і для старих об'єктів, які можна доукомплектувати таким обладнанням. Під'єднати об'єкти до таких систем можна, як рухомі (транспорт), так і стаціонарні (генерація).

Отже саме прогнозне технічне обслуговування є актуальним застосуванням для ІоТ у сфері енергетичних установок, оскільки воно застосовне до існуючих активів і систем керування. Інтелектуальні системи техобслуговування можуть скоротити непередбачені простої та підвищити продуктивність,

що за деякими дослідженнями [1, 2] дозволить заощадити порівняно з плановими ремонтами, зменшивши загальні витрати на технічне обслуговування та усунення поломок.

### Аналіз публікацій та постановка задач дослідження

Сучасну схему ІоТ [1] у сфері енергетичних установок можна представити у вигляді наведеному на рис. 1.

Промислові об'єкти, особливо такі, як енергетичні установки, продукують великі об'єми даних. Навіть сучасні мережі передавання даних можуть бути не готовими для таких об'ємів інформації. Частота вимірювань залежить від того, що це за дані. Наприклад, температура повітря на впуску до двигуна може контролюватись раз за секунду, а тиск палива або тиск робочого тіла повинні контролюватись сотню разів за робочий цикл.

В роботі [3] пропонується здійснювати діагностику ДВЗ за допомогою датчика тиску в циліндрі (індикаторна діаграма) і вібродатчиків. Обидва типи датчиків генерують великі обсяги даних і потребують попередньої обробки. Обробити ці дані і пов'язати їх для здійснення аналізу у реальному часі можливо тільки на самому об'єкті.

Процес зняття індикаторної діаграми двигуна потребує не тільки реєстрації значень тиску, а і її си-

нхронізації з кутом повороту колінчастого валу. Робота [4] показує, що при знятті індикаторної діаграми необхідною є обробка сигналу від датчика і це потребує наявності обчислювальних потужностей у приладі реєстрації.

#### Викладення основного матеріалу

Отже при побудові системи важливо визначити рівні даних на яких необхідні ти чи інші дані, що дозволить значно зменшити трафік. Частина великого об'єму даних може бути необхідна лише для поточного керування параметрами об'єкта і її можна залишати на рівні попередньої обробки даних. Так саме аналіз даних можна перенести на рівень самого об'єкта завдяки потужним платам на базі ARM процесорів. Слід зазначити що сучасні процесори вже починають мати модуль для штучного інтелекту, що дозволить значно спростити обробку та аналіз даних. Зберігати у хмарі результати аналізу даних та необхідні вибірки даних значно доцільніше, ніж зберігати увесь масив даних.

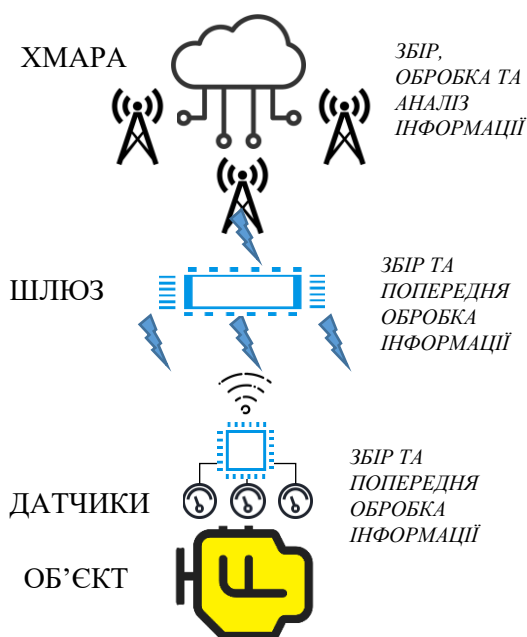


Рис. 1. Схема збирання та обробки даних ІоТ

Вірно обрати мікропроцесор для вимірювання параметрів двигуна не просте завдання. На ринку присутні пристрої з різними параметрами при близькій вартості. На початковому етапі важливо визначитись з тим, які параметри необхідно вимірювати. Відповідно до цього і слід обирати пристрій реєстрації та аналізу даних. У роботі розглянемо це на прикладі відслідковування тиску палива в паливній магістралі високого тиску дизельного двигуна.

Основними вимогами до вимірювання є:

- частота вимірювання,
- чутливість приладів.

**Частота вимірювання.** В паливній магістралі високого тиску дизеля зміна тиску відбувається дуже швидко, наприклад, є системи *Common Rail* до магістралі яких може під'єднуватись 4 і більше форсунок та зміна тиску відбувається в залежності від часу і швидкості підняття голки форсунку, тому вимірювання тиску повинно відбуватись з частотою більшою за 1 градус повороту колінчастого валу. При знятті показників тиску кожен 1 градус повороту колінчастого валу при частоті обертання 4000 хв<sup>-1</sup> треба виконати 24 тисячі вимірювань що секунди тобто частота складе 24КГц. Цей параметр відноситься до динамічної характеристики вимірювання.

**Чутливість приладів.** Фізичні параметри датчику тиску змінюються в залежності від тиску. У датчику тиск вимірюваного середовища перетворюється на електричний аналоговий сигнал. Далі цей сигнал потрібно цифрувати за допомогою аналого цифрового перетворювача (АЦП). АЦП – це обладнання, що приймає вхідні аналогові сигнали с датчиків та перетворює їх на відповідні їм цифрові сигнали, що придатні для обробки мікропроцесорами та іншими цифровими пристроями. Процедура аналого-цифрового перетворення безперервних сигналів у цифрову форму – є перетворення безперервної функції часу  $U(t)$ , що описує вхідний сигнал у послідовність чисел  $\{U'(t_j)\}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots$ , що віднесені до деяких фіксованих моментів часу. Цю процедуру можна розділити на дві самостійні операції. Перша з них називається дискретизацією і є перетворенням безперервної функції часу у безперервну послідовність  $\{U(t_j)\}$ . Друга – називається квантуванням і є перетворенням безперервної послідовності у дискретну  $\{U'(t_j)\}$ .

Роздільна здатність – це величина, яка є оберненою до максимальної кількості кодових комбінацій на виході АЦП. Вона вимірюється у відсотках, розрядах або децибелах і відображає потенціал АЦП щодо забезпечення точності вимірювань. Наприклад, дванадцятирозрядний АЦП має роздільну здатність:

$$\frac{1}{2^n} = \frac{1}{2^{12}} = \frac{1}{4096}$$

Раніше 8-бітові АЦП були звичайними, тоді як сьогодні стандартом для більшості систем збору даних, призначених для динамічних вимірювань, стали 24-бітові АЦП. При цьому 16-бітові АЦП вважаються мінімальною роздільною здатністю для робочих сигналів загалом. Бюджетні системи здебільшого використовують 12-бітові АЦП.

Кожен додатковий біт роздільної здатності подвоює точність перетворення, тож системи з 24-бітними АЦП забезпечують  $2^{24} = 16\,777\,216$  рівнів. Це дозволяє розділити вхідний сигнал у 1В на понад 16 мільйонів кроків по осі У.

16 777 216 кроків для 24-бітного АЦП набагато перевершують максимальні теоретичні 65 536 кроків для 16-бітного АЦП. Таким чином, вища роздільна здатність покращує форму та точність хвилювих функцій, що також стосується осі часу (рис. 2).

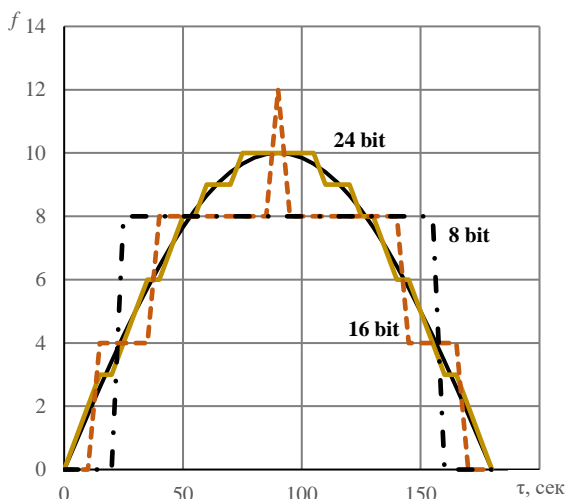


Рис. 2. Порівняння роздільної здатності АЦП (східчаста траєкторія)

Основними параметрами АЦП є: роздільна здатність; точність; швидкодія.

Таким чином вимоги до обладнання параметрів вимірювання породжують шалені об'єми даних.

Одне цифрове значення після перетворювання з аналогового сигналу в цифровий дорівнює 16 бітам.

Наприклад якщо буде потрібно аналізувати данні с 2 датчиків з частотою 25 кГц то потрібен канал що буде забезпечувати мінімум 1 Мбіт за сек. Якщо дані для аналізу потрібно накопичувати, то за 10 хв дослідження буде сформовано файл розміром 60 Мб.

При такому потоці даних є сенс виконувати обчислення в місці їх збору і не передавати увесь об'єм на сервер (туманні обчислення). В такому випадку потрібно мати достатньо обчислювальної потужності.

Виходячи з мінімальних вимог можна сформулювати мінімальні вимоги до аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Вимоги до АЦП

Параметр	Мінімальне значення
Частота АЦП	25 кГц
Роздільна здатність	16 біт
Швидкість інтерфейсу передачі даних	1 Мбіт за сек

Розглянемо найбільш поширені на ринку плати з АЦП:

1. STM32 (STMicroelectronics)

STM32F4: Високопродуктивні мікроконтролери з ядром Cortex-M4, частота до 180 МГц, великий об'єм пам'яті, підтримка DSP інструкцій, вбудовані АЦП і ЦАП [5].

STM32H7: Високопродуктивні мікроконтролери з ядром Cortex-M7, частота до 480 МГц, підвищена продуктивність і велика кількість периферійних інтерфейсів [6].

2. ESP32 (Espressif Systems)

Мікроконтролер з двоядерним процесором (Xtensa LX6), Wi-Fi і Bluetooth, частота до 240 МГц. Підходить для IoT-проектів, де потрібне бездротове з'єднання [7].

3. ATmega328P (Microchip Technology).

Популярний 8-бітний мікроконтролер, широко відомий завдяки використанню в Arduino. Має достатньо обчислювальної потужності для простих сенсорних задач, добре підходить для початківців.

4. Raspberry Pi Pico (RP2040) [8].

Двоядерний мікроконтролер на основі власного чипа RP2040, Cortex-M0+, частота до 133 МГц. Має достатньо обчислювальної потужності та периферії для обробки сенсорних даних. [9]

Порівняння основних параметрів плат з АЦП зведені до табл. 2.

Таблиця 2. Порівняння мікроконтролерів

Мікроконтролер	Розрядність АЦП, біт	Швидкість АЦП (кількість семплів/сек)	Продуктивність (DMIPS)	Частота процесора, МГц
STM32F4	12	До 2.4 MSPS	До 210	До 180
STM32H7	16 (опція 12)	До 3.6 MSPS	До 2020	До 480
ESP32	12	До 1.1 MSPS	До 600	До 240
ATmega328P	10	До 15 kSPS	До 20	До 20
Raspberry Pi Pico	12	До 500 kSPS	До 133	До 133

З даних, що наведені у табл. 2, можна визначити, що найбільш потужними є мікроконтролери на базі STM32H7. Саме їх і можна порекомендувати до використання при побудові апаратних комплексів для досліджень процесів, що швидко змінюються.

Також слід відмітити наявність зовнішніх АЦП які мають більш кращі параметри і менші значення погрішностей вимірювання. Однак з їх використанням системи стають складнішими, дорожчими, прив'язаними до програмного забезпечення АЦП. В разі побудови складної системи вимірювань потребують підключення професіоналів у галузі мікроелектроніки.

### Висновки

Виконання постійно зростаючих вимог до енергетичних установок не можливо без використання сучасних мікроконтролерів. Мікроконтролери розвиваються дуже швидко і їх обчислювальна потужність на сьогоднішній день дозволяє використовувати мікроконтролери, як проміжні обчислювальні вузли в великих системах або використовувати для старих об'єктів, які можна доукомплектувати таким обладнанням.

В роботі сформовано мінімальні вимоги до параметрів мікроконтролера, що може використовуватись при реєстрації швидкоплинних процесів, зокрема в ДВЗ. Можна зазначити, що мікроконтролери на базі STM32H7 мають набір параметрів, які відповідають вимогам вимірювання навіть для швидкоплинних процесів у системах двигунів таких, як паливна система високого тиску.

### Список літератури:

1. Prith Banerjee. "Driving Unconventional Growth through the Industrial Internet of Things" (PDF). – 2014. – available at : <https://www.iot-inc.com/wp-content/uploads/2015/11/10-Prith.pdf> 2. Sinclair B. *IoT Inc: How Your Company Can Use the Internet of Things to Win in the Outcome Economy*. USA: McGraw Hill LLC. –2017. ISBN: 9781260025903, 126002590X. 3. Varbanets R. *Diagnostics of fuel equipment, gas-distribution valves train mechanism and cylinder lubrication nozzles of modern two-stroke engines / R.*

*Varbanets, V. Malchevskiy, D. Minchev, V. Zalozh, V. Kyrnats, N. Alexandrovskaya // Aerospace Technic and Technology*. – 2022. – № 4sup2. – P. 92-100. doi: <https://doi.org/10.32620/akt.2022.4sup2.14> 4. Varbanets P. A. *Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Варбанець Р. А., Залож В. І., Тарасенко Т. В., Кучеренко Ю. М., Клименко В. Г. // Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2020. – №. 1. – С. 13-21. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02> 5. *Microcontroller specification STM32F4*. – 2024. – available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html> 6. *Microcontroller specification STM32H7*. – 2024. – available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h7-series.html> 7. *Microcontroller specification esp32*. – 2024. – available at: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> 8. *Microcontroller specification ATmega328P*. – 2024. – available at: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P> 9. *Microcontroller specification raspberry-pi-pico*. – 2024. – available at: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>

### Bibliography (transliterated):

1. Prith Banerjee (2014), "Driving Unconventional Growth through the Industrial Internet of Things" (PDF). available at: <https://www.iot-inc.com/wp-content/uploads/2015/11/10-Prith.pdf> 2. Sinclair, B. (2017), *IoT Inc: How Your Company Can Use the Internet of Things to Win in the Outcome Economy*. USA: McGraw Hill LLC. ISBN: 9781260025903, 126002590X. 3. Varbanets, R., Malchevskiy, V., Minchev, D., Zalozh, V., Kyrnats, V., & Alexandrovskaya, N. (2022), "Diagnostics of fuel equipment, gas-distribution valves train mechanism and cylinder lubrication nozzles of modern two-stroke engines", *Aerospace Technic and Technology*, No4sup2, pp. 92-100. doi: <https://doi.org/10.32620/akt.2022.4sup2.14> 4. Varbanets, R. A., Zalozh, V. I., Tarasenko, T. V., Kucherenko, Yu. M., Klymenko, V. H. (2020), "Features of analytical synchronization of data of working process monitoring in transport diesel engines under operation" [*"Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації"*], *Internal combustion engines*, No1, P. 13-21. 5. *Microcontroller specification STM32F4* (2024), available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html> 6. *Microcontroller specification STM32H7* (2024), available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h7-series.html> 7. *Microcontroller specification esp32* (2024), available at: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> 8. *Microcontroller specification ATmega328P* (2024), available at: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P> 9. *Microcontroller specification raspberry-pi-pico* (2024), available at: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>

Надійшла до редакції 28.06.2024

**Ліньков Олег Юрійович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [Oleh.Linkov@khai.edu.ua](mailto:Oleh.Linkov@khai.edu.ua), [orcid.org/0000-0002-2780-2412](https://orcid.org/0000-0002-2780-2412)

**Шевченко Олексій Сергійович** – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [shevchcross@gmail.com](mailto:shevchcross@gmail.com), [orcid.org/0009-0007-3722-7873](https://orcid.org/0009-0007-3722-7873)

## USE OF IIoT TECHNOLOGIES IN ENGINE MONITORING AND CONTROL SYSTEMS

O.U. Linkov, O.S. Shevchenko

Determining the operating parameters of engine systems is very important to ensure its long-term reliability. Modern power plants use a large number of modern electronic components (sensors, controllers, etc.). All systems generate a huge volume of data that must be tracked, processed and analyzed, which in turn creates calls to gateways and servers. However, the current state of development of microcontrollers and their power allow the use of fog computing, which can lead to more efficient use of both the power plant and data transmission systems. Also, the use of modern microcontrollers and fog computing allows modernizing old power plants with minimal effort and creating new information nodes for monitoring the state of nodes and engine systems and easily combining them with systems already existing on the engine. The selection of a microcontroller and justification of its type for the modernization of the fuel system of a diesel engine are considered. Rapid processes occur in the high-pressure fuel system of diesel engines, which can be determined by changes in fuel pressure. For detailed measurement of processes in the fuel system, measurements should be made with a frequency of at least 24 kHz, i.e.: if the crankshaft rotation frequency is 4000 min<sup>-1</sup>, then 24,000 measurements should be made every second (when registering data after 1 degree of crankshaft rotation). Another indicator that imposes its requirements is the bit rate of the analog-to-digital converter (ADC), which depends on the range of recorded values. For example, an ADC with a resolution of 8 bits is capable of outputting 256 discrete values (0...255). That is, the higher the bit rate, the more sensitive the converter is to signal changes, and 8 bits may not be enough. Thus, even a small number of sensors can generate a huge amount of data. Transmitting large amounts of data is irrational and can lead to data loss and "clogging" of transmission channels, which challenges the computational performance of the microprocessor.

**Keywords:** internal combustion engine; measurement; monitoring; industrial internet of things; reliability parameters; predictive maintenance

УДК 621.435

DOI: 10.20998/0419-8719.2024.2.07

О. В. Триньов, Д. Г. Сівих, А. М. Сергієнко

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОВИХ ВИТРАТ ДВИГУНА  
В СИСТЕМІ ЗМАЩЕННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ

*Представлені результати проміжного етапу дослідження процесів теплообміну в швидкохідних дизелях автотракторного типу на перехідних режимах скидання-накиду навантажень, які є характерними для дизелів цього типу. На таких режимах спостерігаються, як засвідчують результати розрахунків теплонапруженого стану деталей, що формують об'єм камери згоряння, зокрема поршнів, випускних клапанів газорозподільного механізму, значні закиди розтягувальних і стискаючих напружень у порівнянні з роботою на усталених режимах.*

*Саме це є причиною виникнення дефектів у вигляді тріщин на теплообмінних поверхнях зазначених деталей, обмежує моторесурс двигунів автотракторного типу. Для більш детального вивчення перехідних процесів, як основний підхід, пропонується використання загальновідомої методики теплобалансних випробувань швидкохідного дизеля, але з залученням засобів автоматизованої обробки результатів вимірювань в цифровій формі на усталених і перехідних режимах. Основну увагу пропонується зосередити на витратах теплоти – складові теплового балансу в системі змащення та охолодження. Без використання автоматизованої обробки інформації безпосередньо в моменти протікання перехідних режимів скидання-накиду навантаження отримання такої інформації по системам охолодження і змащення є неможливим. Запис перехідних теплообмінних процесів дає можливість відслідковувати вплив режимних параметрів двигуна, динаміки перехідного процесу в залежності від його тривалості, початкового і кінцевого усталеного режимів, між якими досліджується перехід. В цілому, таким чином, можна оцінювати пристосованість систем охолодження та змащення до відведення теплоти при різких змінах навантаження, уникати, або ж хоча б обмежувати зростання термічних напружень. В публікації наведено можливий варіант схемного рішення такої системи автоматизованої обробки результатів теплобалансних випробувань з максимальним залученням обладнання, яке випускається серійно і вже використовувалося раніше при проведенні теплобалансних випробувань.*

**Ключові слова:** автотракторний дизель; теплобалансні випробування; автоматизація обробки інформації на усталених і перехідних режимах

**Вступ**

Сучасні методи розрахунку теплонапруженого стану (ТНС) деталей камери згоряння ДВЗ передбачають, як обов'язкову умову, уточнення математичних моделей, граничних умов задач теплопровідності та механіки шляхом проведення моторних та безмоторних експериментів. Експеримент дозволяє змодельовати розрахунковій математичній моделі дійсний або ж близький до дійсного розподіл теплових потоків в камері згоряння і по двигуну в цілому,

зокрема, в системі змащення та охолодження. Для дизелів автотракторного типу, як відомо, такі потоки відрізняються значною щільністю, нерівномірністю. Для дизелів цього типу для визначення критичних напружень, прогнозування моторесурсу деталей камери згоряння (КЗ) обов'язковим є врахування як усталених форсованих режимів, так і перехідних режимів скидання-накиду навантажень, на які припадає значний відсоток в моделі експлуатації. Тепло-