

О. В. Триньов, Д. Г. Сівих

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО БАГАТОКОНТУРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

Представлені результати проміжного етапу дослідження теплового стану окремих теплонапружених деталей та вузлів форсованого автотракторного дизеля за умов їх локального повітряного охолодження (ЛПО), яке регулюється в автоматичному режимі. Розглядаються і оцінюються можливості практичної реалізації на основі мікропроцесорних систем керування багатоконтурного локального охолодження деталей клапанного випускного вузла, підшипникового вузла турбокомпресора, при необхідності, додаткового охолодження повітрям верхньої частини блоків циліндрів в зоні розміщення циліндрових гільз. Перелічені деталі, як засвідчують результати багатьох моторних випробувань, відрізняються значеннями максимальних критичних температур, що в свою чергу залежать від протікання теплообмінних процесів у відповідних спряженнях, вузлах. При цьому, в умовах експлуатації з використанням системи ЛПО на дизелі виникають додаткові проблеми, пов'язані з ускладненням алгоритму керування охолодженням, необхідністю переходу саме до багатоконтурних варіантів зі своїми значеннями критичних температур і необхідними витратами охолоджуючого повітря. На даному етапі дослідження було проведено перевірку в тестовому режимі алгоритму керування подачею і відключенням подачі охолоджувача, відповідних схемних рішень для його реалізації. В безмоторному експерименті були використані раніше спеціально розроблені та препаровані термопарами вузли, які підігрівалися окремо до заданих тестових температур, а також вузол серійного виробництва, який входить до складу газобалонного обладнання (ГБО) 4-го покоління сучасних двигунів. Вузол складається з чотирьох секцій з електромагнітними клапанами, які дозують за заданим алгоритмом подачу газу до форсунок (Valtek Type 30). В вході безмоторного експерименту за допомогою цього вузла здійснювалося включення-відключення подачі стиснутого охолоджуючого повітря по окремим контурам (від 2-х до 4-х). Моменти спрацювання клапанів (відкриття-закриття) відповідали заданим тестовим температурам. Крім динаміки зміни температур в контрольних точках дослідних вузлів в процесі охолодження контролювалися також тиск, температура, витрати охолоджувача по окремим контурам. Проведений безмоторний експеримент підтвердив правильність прийнятих схемних рішень, а також доводить можливість в подальшому застосовувати в системах ЛПО серійні вузли ГБО.

Ключові слова: автотракторний дизель; багатоконтурне локальне охолодження; автоматичне керування тепловим станом; вузли газобалонного обладнання.

Вступ

Поліпшення показників економічності та надійності сучасних дизелів автотракторного типу є комплексною проблемою, яка вирішується на етапах розробки, виготовлення, експлуатації конструкції двигуна. Обов'язковими умовами вирішення такої проблеми є використання прогресивних технологій в процесі виробництва, розробка на основі мікропроцесорної техніки електронних блоків керування основними процесами в двигунах під час експлуатації в залежності від режимів навантаження. До таких процесів, безумовно, можна віднести процеси теплообміну в спряженнях деталей та вузлів. Підтримання оптимального температурного стану деталей досягається на всіх експлуатаційних режимах за рахунок керованого в автоматичному режимі охолодження, зокрема локального, яке застосовується до найбільш теплонапружених деталей.

Дослідження теплонапруженого стану (ТНС) клапанного вузла, циліндрових гільз, підшипникового вузла малорозмірних турбокомпресорів за умови застосування для його поліпшення локального повітряного охолодження підтвердили високу ефективність таких заходів, доцільність їхньої

практичної реалізації на автотракторних дизелях з високим рівнем форсування. При цьому дозоване охолодження перелічених деталей стисненим повітрям на окремих критичних режимах дозволяє поліпшити їхній напружений стан, що збільшує моторесурс, а також, зокрема, для циліндрових гільз, за рахунок підтримання оптимальних температур по висоті робочої поверхні, зменшує витрати на тертя, покращує паливну економічність.

В кожному з розглянутих випадків охолодження, як зазначалося, здійснюється лише в автоматичному режимі. Для одночасного контролю та керування теплообмінними процесами в перелічених вузлах за рахунок подачі охолоджуючого повітря необхідна розробка багатоконтурної (багатоваріантної) системи ЛПО. Для прискорення запровадження систем ЛПО на двигунах серійного виробництва важливим є використання для комплектації таких систем окремих вузлів, які вже виготовляються та відзначаються надійністю в умовах експлуатації.

У проведеному дослідженні зроблена попередня експериментальна оцінка можливостей практичного застосування в якості одного з основних елементів системи багатоконтурного ЛПО вузла

електромагнітних клапанів, який входить до складу ГБО 4-го покоління. Також розглядаються окремі питання, пов'язані з розробкою алгоритму керування подачею охолоджуючого повітря та відповідні схемні рішення. Представлені результати можна розглядати як початковий етап розробки та практичного запровадження багатоконтурного ЛПО на форсованих ДВЗ автотракторного типу.

Аналіз літератури

В публікаціях [1, 2] представлено більшість результатів розрахунково-експериментальних досліджень, які проводилися на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП» з метою оцінки ефективності ЛПО для поліпшення ТНС деталей клапанного вузла, підшипникового вузла малорозмірного турбокомпресора, циліндрових гільз автотракторних ДВЗ.

З точки зору термічної напруженості, необхідності її зниження найбільш проблемними є деталі випускного клапанного вузла, зокрема сідло клапана та сам випускний клапан. Результати моторних випробувань, проведених на дизелі 4ЧН12/14 з термометрією випускних клапанів в чотирьох контрольних точках, доводять ефективність ЛПО та практичну доцільність його застосування. Так на режимах $z_n=1600$ хв⁻¹, близьких до номінального, зниження температури в контрольних точках 1 і 2, розміщених на тарілці клапана, склало 114–157 °С від максимальних температур (500–550 °С) на зазначених режимах. Тиск охолоджуючого повітря $p_n=0,10\text{--}0,15$ МПа [2]. При моторних випробуваннях дизеля 4ЧН12/14 ($N_e=117$ кВт, $n=2000$ хв⁻¹) з дослідною системою ЛПО сідла випускного клапана зниження температури сидла в 3-х контрольних точках при підведенні охолоджувача з $p_n=0,15\text{--}0,20$ МПа досягало 50–75 °С від максимальних 210–260 °С. При цьому витрати охолоджувача в залежності від надлишкового тиску $p_n=0,1\text{--}0,3$ МПа становили 3,5–5,2 м³/год. В роботі [2] також наведені результати моторних випробувань дизеля 4ЧН12/14 з термометрією випускного клапана та напрямної втулки. Зазначені дослідження мали комплексний характер, мали за мету уточнення розрахункової скінченоелементної моделі (ММ) клапанного вузла тракторного дизеля 4ЧН12/14 при використанні декількох контурів охолодження (сідло, клапан, напрямна втулка). В даному випадку оцінювалася ефективність ЛО напрямної втулки, верхньої частини стрижня клапана та комбінований варіант. На всіх дослідних випускних клапанах були встановлені по чотири термопари, три з яких були рознесені по висоті стрижня, на напрямних втулках температурний стан контролювався за допомогою 3-х термопар. За результатами проведеної термометрії,

зокрема на режимі максимального крутного моменту, були зроблені наступні висновки [2].

Використання ЛО стрижня клапана (варіант охолоджуваний клапан –серійна втулка) суттєво впливає лише на тепловий стан стрижня, зниження температур складає 80–125 °С (значення $p_n=0,1$ МПа). Витрати повітря 6,4–7,6 м³/год.

Охолодження по зовнішній поверхні напрямної втулки при роботі з серійним неохолоджуванним клапаном на режимах з $p_n=0,1$ МПа і максимальним навантаженням майже не впливає на тепловий стан клапана, зниження температур втулки – в межах 30–40 °С. Витрати повітря – від 2,3 до 3,2 м³/год.

При одночасній циркуляції охолоджувача як через стрижень клапана, так і уздовж бічної поверхні напрямної втулки ($p_n=0,3$ МПа) максимальний ефект зниження температури по точкам на стрижні клапана склав від 35 °С до 80 °С. Одночасне підключення до системи ЛПО вже двох контурів збільшило витрати охолоджувача до 8,5–9,2 м³/год., але при цьому температура найбільш теплонапруженої частини тарілки клапана знизилася лише на 15–20 °С [2].

Проведені моторні випробування [1, 2], результати термометрії дозволили уточнити граничні умови (ГУ) задачі теплопровідності для розробленої ММ клапанного вузла, провести розрахунковий порівняльний аналіз ефективності ЛПО з точки зору зниження температури випускного клапана і необхідних для цього енергетичних витрат для можливих варіантів багатоконтурного ЛПО. Аналіз результатів цього дослідження знаходимо в публікації [3].

Розглядалися та аналізувалися наступні варіанти ЛПО: а - базова (одноконтурна) система ЛПО випускного клапана; б - двоконтурна система з одночасним охолодженням тарілки клапана та сидла клапана; в - двоконтурна система охолодження тарілки клапана та стрижня клапана; г - триконтурна система охолодження тарілки клапана, сидла та стрижня клапана.

Можливість практичної реалізації кожного з варіантів підтверджують результати моторних випробувань [1, 2], проведених на дизелі 4ЧН12/14. Розглядається номінальний режим цього дизеля, тиск повітря для всіх варіантів приймався $p_n=0,1$ МПа. Проведений розрахунковий аналіз ТНС доводить високу ефективність ЛПО деталей клапанного вузла, можливість реалізації автоматичного регулювання теплового стану клапана (САРТС) з підключенням-відключенням окремих контурів. Зазначається [3], що найбільш дієвим засобом поліпшення теплового стану тарілки клапана можуть бути ЛПО самого клапана з розширю-

вальною протічною порожниною в тарілці, та охолодження сідла клапана.

В публікації [2] узагальнено також досвід проведених безмоторних випробувань, в яких досліджувався тепловий стан фрагментів головок циліндрів, підшипникового вузла турбокомпресора, клапанного вузла середньообертового дизеля, циліндрової гільзи. Використання безмоторних стендів при дослідженні теплового і напружено-деформованого стану деталей ДВЗ значно прискорює отримання якісних результатів, оцінку ефективності запропонованого конструктивного рішення. Такі випробування дозволяють також відпрацювати алгоритм керування тепловим станом дизелів, схемні рішення по електронним блокам на початкових етапах дослідження. В представленій роботі також застосовується безмоторний стенд, детальний опис якого наведено в [2]. Основними елементами такого стенду, окрім дослідного вузла, препаративного термопарами, є також плавильна електропіч відкритого типу, або ж інше джерело тепла, під'єднане через автотрансформатор до електромережі. Стенд для моделювання ЛПО містить поршневий компресор, повітряний ресивер самого компресора та додатковий ресивер, встановлений безпосередньо перед дослідним вузлом. Контролюється тиск p_n охолоджуючого повітря та його витрата [2].

Безмоторні стенди використовувалися багатьма вітчизняними і зарубіжними дослідниками. Так проф. Г. Б. Розенбліт на безмоторних стендах вивчав вплив параметрів масляного охолодження на тепловий стан поршнів тепловозних ДВЗ [4].

Для нагрівання поршня, препаративного термопарами до експлуатаційних температур він поміщався у соляний розчин з температурою до 900°C. Через поршень прокачувалося мастило, контролювалися його параметри на вході і виході, витрати мастила. Таким чином були отримані залежності теплового стану поршня, кількості відведеної теплоти від швидкості охолоджувача, близькій до реальної на працюючому двигуні. Отримані результати використовувалися при розробці поршнів з циркуляційним охолодженням [4].

На кафедрі ДВЗ НТУ «ХПІ» під керівництвом проф. А. Ф. Шеховцова та проф. Ф. І. Абрамчука розроблено декілька оригінальних безмоторних стендів для фізичного моделювання процесів накопичення пошкоджень в деталях КЗ тракторних та комбайнових ДВЗ [5, 6]. Так, для дослідження матеріалів деталей КЗ з врахуванням специфіки експлуатаційних режимів, було створено безмоторний стенд для проведення випробувань на термомеханічну втому і тривалу міцність. В умовах зразка мо-

делювалися аперіодичні теплові навантаження деталей на перехідних режимах роботи дизеля, а також періодичні тепломеханічні навантаження від сили тиску газів та коливань температури.

В дослідженні [7] фізичне моделювання процесів накопичення пошкоджень на поршні також було проведено на безмоторному стенді, особливістю якого були: локальне підведення теплоти до його днища; локальне кероване відведення теплоти за рахунок ЛО поршневих кілець.

Крім деталей клапанного вузла, безмоторний стенд було застосовано для моделювання теплового стану циліндрової гільзи дизеля 4ЧН12/14[2]. Досліджувався вплив ЛПО верхнього посадочного пояса. Для утворення проточної порожнини в цій зоні на серійну гільзу після механічної обробки було напресовано чавунний кільцевий бандаж зі штуцерами для підведення і відведення стисненого повітря. Гільза була препаративана п'ятьма термопарами, які рівномірно розміщувалися по висоті гільзи. Нагрівання гільзи з виходом на установлений тепловий режим здійснювалося за допомогою плавильної печі з регулюванням температури автотрансформатором. Встановлювалася таким чином експлуатаційна (за результатами моторних випробувань) температура в зоні верхнього поясу – 250–260 °C. Після чого в проточну порожнину подавалося стиснене повітря під надлишковим тиском $p_n=0,1-0,2$ МПа. Оцінювалася динаміка процесу охолодження від початкових значень до певного температурного рівня для окремих контрольних точок (100–150 °C). Таке охолодження дозволяє підтримувати оптимальний розподіл температур (профіль) по висоті гільзи, що сприяє, в свою чергу, створенню оптимальних умов змащення в спряженні гільза-поршень [2].

Безмоторний стенд було застосовано для оцінки ефективності ЛПО підшипника малорозмірного турбокомпресора [2]. В даному випадку необхідність додаткового охолодження підшипника виникає не лише під час роботи дизеля на режимах з високим рівнем форсування при критичних значеннях температур відпрацьованих газів, але й при різких скиданнях навантаження, наприклад у випадку аварійної зупинки двигуна. При цьому значно погіршуються умови змащення підшипника, його охолодження внаслідок припинення циркуляції мастила. В таких випадках спостерігаються значні закиди температури ($\Delta t=80-90$ °C), перегрівання ротора, його деформації, що встановлено в ході моторних випробувань [8, 9].

Безмоторний експеримент з ЛПО підшипника проводився в два етапи [2]. На першому етапі ставилася задача оцінити ефективність повітряного

охолодження при різкому скиданні навантаження і зупинці двигуна, що супроводжуються закидом температури підшипника від прийнятних на установленому номінальному режимі 110–120 °С до критичних 170–190 °С. Оцінювалась, як і у раніше розглянутих прикладах, динаміка зменшення температури при підведенні до підшипника охолоджуючого повітря ($p_n=0,1-0,3$ МПа), витрати повітря. Підшипник розміщувався в охолоджуваному вузлі, препарованому термопарами. Закид температури моделювався нагріванням нижньої торцевої частини підшипника-втулки до 170–190 °С над плавильною піччю.

На другому етапі дослідження розв'язувалася задача автоматизації процесу охолодження, розробки САРТС підшипника. В якості визначального параметра для роботи САРТС підшипника передбачається [2] взяти температуру відпрацьованих газів на виході з турбіни ТКР, її максимальні, критичні значення при певному рівні форсування двигуна. Логіка роботи САРТС полягає в постійному контролі температури відпрацьованих газів стандартною термопарою. При перевищенні критичних значень (задаються в програмі керування) температури включається реле живлення електромагнітного клапана, включається подача охолодження. В розробленій САРТС було застосовано електромагнітний клапан, який виготовляється фірмою Lovato і використовується за основним призначенням на ДВЗ, пристосованих для роботи на газовому паливі. При відкритому положенні клапана і циркуляції охолоджувача через турбокомпресор включається зворотній відлік часу, визначений в програмі керування на охолодження підшипника до прийнятних значень. Якщо цього часу буде недостатньо для досягнення нижньої межі регулювання, система відключає подачу повітря при закінченні відведеного часу на охолодження [2].

З проведеного аналізу результатів моторних та безмоторних експериментів слідує, що для комплексного вирішення проблеми підвищення надійності, поліпшення економічних показників сучасних форсованих ДВЗ автотракторного типу, в яких передбачається запропонована система ЛПО, така система повинна бути багатоконтурною. Багатоконтурність дозволяє враховувати різні значення критичних температур включення подачі охолоджувача, тривалість охолодження, відповідні витрати охолоджувача, необхідність для досягнення прийнятних значень температур для кожної деталі вузла.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є поліпшення показників надійності та економічності сучасних форсованих ДВЗ автотракторного типу за рахунок застосування багатоконтурного ЛПО, керованого в автоматичному режимі.

В дослідженні вирішувалися такі задачі:

а) вибір та практична перевірка надійності в умовах безмоторного експерименту необхідного обладнання для комплектації систем багатоконтурного ЛПО;

б) перевірка в тестовому режимі програми керування подачею охолоджуючого повітря у декількох контурах, а також розроблених схемних рішень для її реалізації.

Основні результати дослідження

В проведеному безмоторному експерименті для перевірки в тестовому режимі багатоконтурної САРТС в якості об'єктів дослідження були вибрані головка циліндрів дизеля КаМАЗ-740 в штатній комплектації, дооброблена для підведення і відведення охолоджуючого повітря, а також дослідний вузол охолоджуваного підшипника турбокомпресора. Як зазначалось [2], головка циліндрів і вузол підшипника були препаровані хромель-алюмелевими термопарами (термопари типу К). На відміну від раніше проведених безмоторних випробувань, в даному випадку для моделювання фізичного процесу підігріву цих об'єктів скористалися двома окремими підігрівачами з регулюванням напруги живлення для виходу на усталені теплові режими. Для контролю теплового стану головки циліндрів та підшипника було вибрано по одній контрольній точці (термопарі), які встановлені відповідно на днище головки та на підшипнику зі сторони підведення тепла. Передбачається, що у випадку реалізації багатоконтурної САРТС для сидла клапана та підшипника турбокомпресора на двигуні такою визначальною контрольною температурою може стати температура відпрацьованих газів на виході з турбіни турбокомпресора, як для одного, так і для другого контурів охолодження.

Для тестування в даному випадку двоконтурної САРТС призначалися температури включення-відключення подачі охолоджуючого повітря: для контура сидла випускного клапана – 170–150 °С; для контура підшипника – 150–130 °С.

Як відомо, в основу роботи термопари закладений термоелектричний ефект, тобто процес виникнення ЕРС (електрорушійної сили) на спайці (з'єднанні) різнорідних металів, інтенсивність якої прямо пропорційна температурі в місці цього з'єд-

нання. ЕРС в термопарі дуже мала і її не можна виміряти, використовуючи аналогові входи мікроконтролера. Для вирішення цієї задачі пропонується для відстеження температури, підсилення вихідного сигналу та подальшого перетворення його в цифровий код скористатися чіпом MAX6675 [10]. Вихідний сигнал від термопарі спочатку надходить на операційний підсилювач чіпа, а вже потім на 12 бітний АЦП. В подальшому інформація в межах 2-х байт виводиться по шині SPI.

SPI (англ. Serial Peripheral Interface, SPI bus – послідовний периферійний інтерфейс, шина SPI) – фактичний послідовний синхронний повнодуплексний стандарт передачі даних, розроблений фірмою Motorola для забезпечення простого сполучення мікроконтролерів та периферії. SPI також називають чотирьох-проводним інтерфейсом. На відміну від стандартного послідовного порту, SPI є синхронним інтерфейсом, в якому кожна передача синхронізована з тактовим сигналом, що генерується ведучим пристроєм (мікроконтролером). Периферійний пристрій синхронізує отримання бітової послідовності з тактовим сигналом. До одного послідовного периферійного інтерфейсу ведучого мікроконтролера можна під'єднати декілька мікросхем. Головний пристрій вибирає ведений пристрій, активуючи сигнал «вибір кристалу» (chipselect) на потрібній мікросхемі. Інші пристрої, не вибрані ведучим, не беруть участі в передачі по SPI [11].

Для представлення 12-ти бітного числа в °C його потрібно розділити на 4, в такому випадку температура визначається з точністю 0,25 °C. Слід відзначити також, що в запропонованому схемному рішенні з використанням чіпу MAX6675 реалізована функція компенсації холодного спаю. Без реалізації такої функції при вимірюванні температури виникає похибка. На рис. 1 представлено зовнішній вигляд модуля перетворювача з чіпом MAX6675, який було використано в розробленій САПТС.

Характеристики модуля з чіпом MAX6675:

- напруга живлення модуля (Vcc): 3,0...5,5 В постійного струму;
- струм споживання модулем: до 1,5 мА;
- рівень логічної «1» на шині модуля: > 0,7 Vcc;
- рівень логічного «0» на шині модуля: < 0,3 Vcc;
- діапазон вимірюваних температур чіпом: 0...800 °C (заявлено до 1023 °C, але при температурах від 800 до 1023 °C точність показань різко знижується).

За логікою алгоритму, мікроконтролер має вести постійний моніторинг теплового стану вузлів, до яких підводиться охолоджуюче повітря (в експерименті – головка циліндрів, підшипниковий вузол). Контроль здійснювався двома окремими каналами. За значеннями ЕРС в контрольних точках перший канал відслідковував температуру підшипника-втулки, другий – температуру в зоні охолоджуваного сидла випускного клапана (в подальшому сидла). Як тільки температура підіймалась вище критичного тестового значення, заданого в програмі керування, відбувалося ввімкнення подачі стисненого повітря за допомогою одного з електромагнітних клапанів. Після досягнення заданого нижнього значення температури по даному контуру клапан вимикався, подача повітря припинялася.

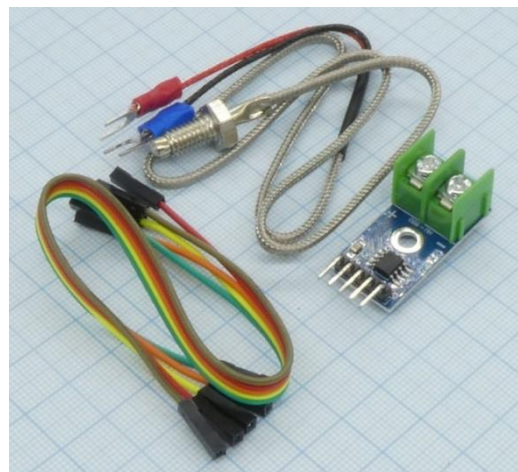


Рис. 1. Зовнішній вигляд модуля перетворювача з чіпом MAX6675

Задля уніфікації запропонованої багатоконтурної системи ЛПО з промисловими зразками автомобільного газобалонного обладнання було вирішено скористатися з цією метою вузлом електромагнітних клапанів з поширеними та популярними серед користувачів газовими форсунками Valtek Type 30 [12]. На рис. 2 показано конструкцію вузла з основними габаритними розмірами. Характеристики пропускної спроможності вузла електромагнітних клапанів з такими форсунками представлені на рис. 3 [12].

Згідно рекомендацій [12], при застосуванні таких форсунок на двигуні необхідно врахувати, що штуцери виходу газу (охолоджуючого повітря, в нашому випадку) розміщуються вертикально, або ж, в крайньому випадку, під невеликим кутом нахилу до горизонтальних поверхонь двигуна.

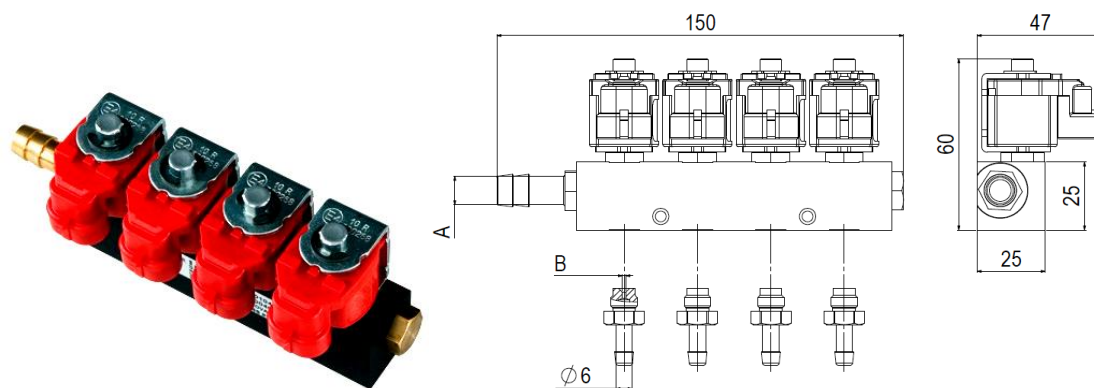


Рис. 2. Вузол електромагнітних клапанів з газовими форсунками ValtekType 30

Це зумовлено принципом роботи форсунок: при подачі напруги на котушку електромагнітного клапана вона притягує шток, який перекриває подачу газу, починається подача. Неправильний монтаж форсунок призводить до порушень в роботі системи ГБО.

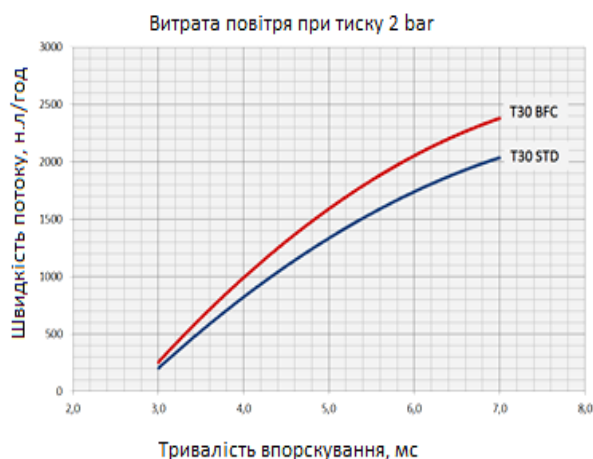


Рис. 3. Характеристики пропускної спроможності форсунок Valtek Type 30 [12]

Вузол електромагнітних клапанів, який було застосовано в ході проведення безмоторного експерименту, може забезпечити роботу системи ЛПО для 4-х контурів охолодження, діаметр вхідного отвору для підведення повітря становить 12 мм, опір котушок електромагнітів – 3 Ом, виробляється для ГБО 4-го покоління фірмою Valtek SPA (Італія) [12].

Комутація підведення напруги до електромагнітних клапанів, керування подачею охолоджувача здійснювалося в ході експерименту з виходів мікроконтролера через IGBT транзистор FGH40N60SFDTU [13]. IGBT – трьохелектродний силовий напівпровідниковий пристрій, що поєднує два транзистора в одній напівпровідниковій структурі: біполярний та польовий. Використовується за основним призначенням як потужний електронний

ключ в імпульсних джерелах живлення, інверторах, в системах керування електричними приводами та соленоїдами [13].

В розробленій системі керування подачею охолоджувача мікроконтролер кожної секунди фіксував нормалізовані чіпом MAX6675 сигнали від двох контрольних термопар в зоні сидла клапана та на підшипнику. Інформація передавалася через послідовний порт UART до ноутбуку, накопичувалася у відповідному файлі ПК для подальшого аналізу. UART (англ. Universal asynchronous receiver/transmitter – універсальний асинхронний приймач/передавач) – тип асинхронного приймача-передавача, компонентів комп'ютерів та периферійних пристроїв, що передає дані між паралельною та послідовною формами. UART звичайно використовується спільно з іншими комунікаційними стандартами, такими як EIA RS-232.

UART це зазвичай окрема мікросхема чи частина мікросхеми, що використовується для з'єднання через комп'ютерний чи периферійний послідовний порт. UART нині загалом включені в мікроконтролери. Здвоєний UART (Dual UART або DUART) об'єднує двоє UART в одній мікросхемі. Багато сучасних мікросхем сьогодні випускаються з можливістю комунікації в синхронному режимі, такі прилади називають USART [14].

Результати проведеного в ході безмоторного експерименту з моніторингу представлені на рис. 4. для контура охолодження сидла (контрольні температури 170°C і 150°C), та на рис. 5 для контура охолодження підшипника (контрольні температури 150 °C і 130 °C). На рис. 4 і 5 також у вигляді прямокутників діаграм зафіксовані моменти включення відкритого стану, закриття електромагнітних клапанів.

Безмоторний експеримент в цілому тривав 35 хвилин.

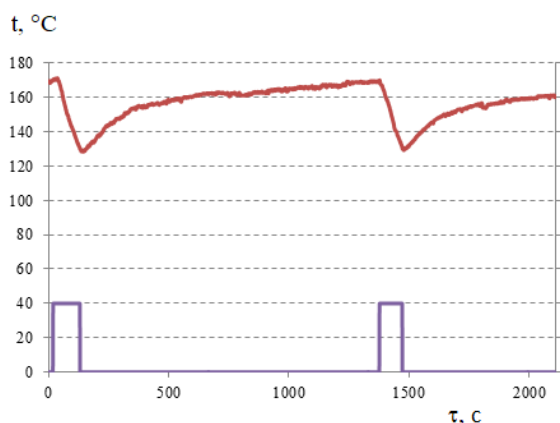


Рис. 4. Динаміка зміни температури в контрольній точці контура охолодження сидла клапана

Кероване включення-відключення на сидлі здійснювалося двічі, підшипника – один раз. Тривалість охолодження сидла змінювалась від 1 хвилини 35 секунд до 1 хвилини 53 секунди, підшипник охолоджувався 14 хвилин 27 секунд (рис. 5). В ході експерименту тиск повітря в ручному режимі підтримувався на вході в контури (блок електромагнітних клапанів) в межах 0,20–0,25 МПа, витрати повітря змінювалась в межах 3–4 м³/год.

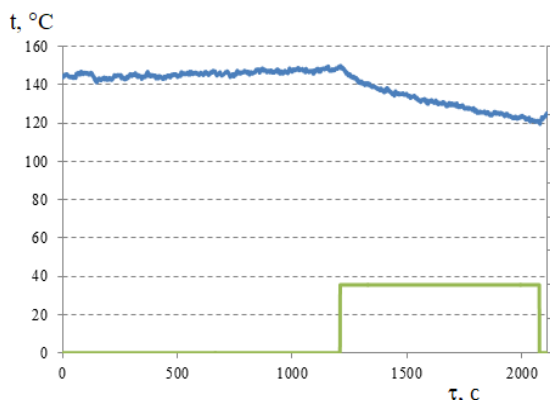


Рис. 5. Динаміка зміни температури в контрольній точці контура охолодження підшипника

Практична реалізація процесу керування охолодження в проведеному безмоторному випробуванні виявила важливу технічну особливість: довготривале ввімкнення постійної напруги живлення 12 В для електромагнітних клапанів не завжди забезпечувало стабільність їх відкриття. Спостерігалися також випадки некерованого закривання клапанів. Зазначену проблему було вирішено за допомогою використання ШІМ сигналу для керування тривалістю відкритим станом форсунок. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ – англ. pulse-width modulation, PWM), або модуляція за тривалістю імпульсів (англ. pulse-duration modulation, PDM)

– процес керування шириною (тривалістю) високо-частотних імпульсів за законом, який задає низько-частотний сигнал. В електроніці це може бути керування середнім значенням вихідної напруги шляхом зміни тривалості замкнутого стану електронного (електромеханічного) ключа [15].

Як вже зазначалося, тиск повітря в проведеному експерименті підтримувався в ручному режимі, що безумовно не є прийнятним для практичної реалізації багатоконтурного ЛПО на двигунах. В подальшому заплановано продовжити дослідження в напрямку автоматизації процесів керування тепловим станом деталей не лише за температурними показниками, але й за параметрами тиску, витрати повітря.

Висновки

Результати безмоторного експерименту підтвердили правильність запропонованих схемних рішень щодо багатоконтурної САПТС на попередньому етапі. Було доведено можливість використання вузлів ГБО серійного виробництва для комплектації систем ЛПО форсованих автотракторних ДВЗ. В ході експерименту також були виявлені та в подальшому усунені окремі проблеми, пов'язані з роботою вузла електромагнітних клапанів ГБО у складі системи ЛПО.

Список літератури:

1. Триньов О. В. Наукові основи локального охолодження теплонапружених деталей ДВЗ [Текст] : монографія / О. В. Триньов ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". - Харків : Підручник НТУ "ХПІ", 2014. - 239 с. 2. Триньов О. В. Локальне охолодження теплонапружених деталей ДВЗ : навч. посібник / О. В. Триньов; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". - Київ : Кондор, 2018. - 212 с. 3. Триньов О. В. Перспективи поліпшення теплового стану деталей клапанного вузла дизеля з використанням локального охолодження / О. В. Триньов, В. Г. Панчосний // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Транспортне машинобудування. – 2015. – № 43 (1152). – С. 144-155. 4. Розенблит Г. Б. Теплопередача в дизелях [Текст] / Г.Б. Розенблит. - Москва : Машиностроение, 1977. - 216 с. 5. Абрамчук Ф.И. и др. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко, Н.Ф. Разлейцев, Е.И. Третьяк, А.Ф. Шеховцов, Н.К. Шоколов. Под ред. А.Ф. Шеховцова. - К.: Техника, 1992. - 272 с. 6. Шеховцов А.Ф. Процессы в перспективных дизелях / А.Ф. Шеховцов, Ф.И. Абрамчук, В.И. Крутов, А.П. Марченко и др. / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Харьков: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. – 352 с. 7. Шеховцов А.Ф. Система автоматического программного управления процессами циклического нагружения деталей при испытании ДВС / А. Ф. Шеховцов [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания : респ. междувед. науч.-техн. сб. Вып. 51 / ХПИ - Харьков : Основа, 1990. - С. 105-108. 8. Анализ работы подшипника турбокомпрессора при изменении загрузки

двигателя [Текст] / Д.М. Кельштейн, Ю.А. Красницкий, О.А. Позняков // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 1989. – №48/89. – С. 112 – 117. 9. *Определение температуры деталей турбокомпрессора ТКР – 7Н* [Текст] / Н.И. Верба, Ю.А. Красницкий, М.Я. Рабинович и др. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 1982. – №35. – С. 104 – 105. 10. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf> 11. https://uk.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface – послідовний периферійний інтерфейс – матеріал з Вікіпедії. 12. *InjectorRailType 30* – <https://www.valtek.it/en/products/injectors/type-30> 13. <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=FGH40N60SFDTU> – Транзистор IGBT. 14. <https://uk.wikipedia.org/wiki/UART>. 15. <http://surl.li/blia> – Широтно-імпульсна модуляція – матеріал з Вікіпедії.

Bibliography (transliterated):

1. Trynov, O.V. (2014), Scientific bases of local cooling of heat-stressed details of internal combustion engines [Naukovi osnovy lokal'noho okhologdzhennya teplonapruzhenykh detaley DVZ], Pidruchnyk NTU "KHPI", Kharkiv, 239 p. 2. Tryn'ov, O.V. (2018), Local cooling of heat-stressed parts of internal combustion engines, [Lokal'ne okhologdzhennya teplonapruzhenykh detaley DVZ], Kondor, Kyiv, 212 p. 3. Tryn'ov, O.V., Panchoshnyy, V.H. (2015), "Prospects for improving the thermal condition of diesel valve assembly parts using local cooling", ["Perspektyvy polipshennya teplovoho stanu detaley klapannoho vuzla dyzelya z vykorystanniam lokal'noho okhologdzhennya"], Visnyk Nac. tehn. un-tu "XPI": zb. nauk. pr. Temat. vy'p.: Transportne mashynobuduvannya, P. 144-

155. 4. Rozenblyt, H.B. (1977), Heat transfer in diesels, [Teploperedacha v dyzelyakh], Mashynostroenye, Moscow, 216 p. 5. Abramchuk, F.Y., Marchenko, A.P., Razleytsev, N.F., Tretyak, E.Y., Shekhovtsov, A.F., Shokotov, N.K. (1992), Modern diesels: increase of fuel economy and long durability, [Sovremennyye dyzely: povyshenye toplyvnoy ekonomichnosti y dlytel'noy prochnosti], Tekhnika, Kyiv, 272 p. 6. Shekhovtsov A.F., Abramchuk, F.Y., Krutov, V.Y., Marchenko, A.P. (1992), "Processes in advanced diesels", ["Protsessy v perspektyvnykh dyzelyakh"], «Osnova», Kharkiv, 352 p. 7. Shekhovtsov, A.F. (1990), System of automatic software control of processes of cyclic loading of details at test of the internal combustion engine, [Systema avtomaticheskoho prohrammnoho upravleniya protsessamy tsyklycheskoho nahruzheniya detaley pry yspytanyy DVS], «Osnova», Kharkiv, p. 105-108. 8. Kel'shteyn, D.M., Krasnytsky, YU.A., Poznyakov, O.A. (1989), Analysis of the operation of the turbocharger bearing when changing the engine load, [Analiz raboty podshypnyka turbokompessora pry yzmeneniy nahruzky dvyhatela], «Osnova», Kharkiv, p. 112 – 117. 9. Verba, N.Y., Krasnytsky, YU.A., Rabinovich, M.YA., (1982), "Determination of the temperature of the parts of the turbo-compressor TKR - 7H", ["Opredelenye temperatury detaley turbokompessora TKR – 7N"], «Osnova», Kharkiv, p. 104 – 105. 10. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf> 11. https://uk.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface – poslidovnyy periferiynyy interfeys – material z Vikipediyi. 12. *Injector Rail Type 30* – <https://www.valtek.it/en/products/injectors/type-30> 13. <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=FGH40N60SFDTU> – Transistor IGBT. 14. <https://uk.wikipedia.org/wiki/UART>. 15. <http://surl.li/blia> – Shyrotno-impul'snamodulyatsiya – material z Vikipediyi.

Надійшла до редакції 14.06.2021 р.

Триньов Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-0344-8332>, e-mail: trinaleksandr427@gmail.com.

Сівих Дмитро Георгійович – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-8585-734X>, e-mail: sivikh1979@gmail.com.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО МНОГОКОНТУРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

А.В. Тринёв, Д.Г. Сивых

Представлены результаты промежуточного этапа исследования теплового состояния отдельных теплонепругих деталей и узлов форсированного автотракторного дизеля в условиях их локального воздушного охлаждения (ЛВО), которое регулируется в автоматическом режиме. Рассматриваются и оцениваются возможности практической реализации на основе микропроцессорных систем управления многоконтурного локального охлаждения деталей клапанного выпускного узла, подшипникового узла турбокомпрессора, при необходимости, дополнительного охлаждения воздухом верхней части блоков цилиндров в зоне размещения цилиндровых гильз. Перечисленные детали, как свидетельствуют результаты многих моторных испытаний, отличающихся значениями максимальных критических температур, что в свою очередь зависят от протекания теплообменных процессов в соответствующих сопряжениях, узлах. При этом, в условиях эксплуатации с использованием системы ЛВО на дизеле возникают дополнительные проблемы, связанные с усложнением алгоритма управления охлаждением, необходимостью перехода именно к многоконтурным вариантам со своими значениями критических температур и необходимыми затратами охлаждающего воздуха. На данном этапе исследования была проведена проверка в тестовом режиме алгоритма управления подачей и отключением подачи охладителя, соответствующих схемных решений для его реализации. В безмоторном эксперименте были использованы ранее специально разработаны и протестированные термодатчики узлы, которые подогревались отдельно с заданными тестовыми температурами, а также узел серийного производства, который входит в состав газобаллонного оборудования (ГБО) 4-го поколения современных двигателей. Узел состоит из четырех секций с электромагнитными клапанами, которые дозируют по заданному алгоритму подачу газа к форсункам (Valtektype 30). В ходе безмоторного эксперимента с помощью этого узла осуществлялось включение-отключение подачи сжатого охлаждающего воздуха по отдельным контурам (от 2-х до 4-х). Моменты срабатывания клапанов (открытие-закрытие) соответствовали заданным тестовым температурам. Кроме динамики изменения температур в контрольных точках исследовательских узлов в процессе охлаждения контролировались также давление, температура, расходы охладителя по отдельным контурам. Проведенный безмоторный экс-

перимент подтвердил правильность принятых схемных решений, а также доказывает возможность в дальнейшем применять в системах ЛВО серийные узлы ГБО.

Ключевые слова: автотракторный дизель; многоконтурное локальное охлаждение; автоматическое управление тепловым состоянием; узлы газобаллонного оборудования.

SIMULATION OF OPERATION OF THE AUTOMATED SYSTEM OF LOCAL MULTI-CIRCUIT COOLING OF PARTS OF AUTOTRACTOR DIESEL ENGINE

A.V. Trynov, D.G. Sivykh

The results present the intermediate stage of the study of the thermal state of individual heat-stressed parts and units of a forced tractor diesel engine in the conditions of their local air cooling (LAC), which is regulated in automatic mode. Possibilities of practical implementation on the basis of microprocessor control systems of multi-circuit local cooling of parts of valve exhaust unit, bearing unit of turbocharger, if necessary, additional air cooling of the upper part of cylinder blocks in the area of cylinder liners are considered and evaluated. The listed parts, as evidenced by the results of many engine tests, differing in the values of the maximum critical temperatures, which in turn depend on the course of heat exchange processes in the corresponding interfaces, nodes. At the same time, in the conditions of operation with the use of the LAC system on the diesel engine there are additional problems associated with the complication of the cooling control algorithm, the need to move to multi-circuit options with their critical temperature values and required cooling air costs. At this stage of the study, a test was performed in the test mode of the algorithm for supply control and shutdown of the coolant supply, the corresponding circuit solutions for its implementation. In the engineless experiment, previously specially designed and thermocoupled units were used, which were heated separately with the set test temperatures, as well as a series-produced unit, which is part of the 4th generation gas cylinder equipment (GCE) of modern engines. The unit consists of four sections with solenoid valves, which dose the gas supply to the injectors according to a given algorithm (Valtek type 30). At the input of the engineless experiment, this unit was used to turn on and off the supply of compressed cooling air in separate circuits (from 2 to 4). The moments of operation of the valves (opening-closing) corresponded to the set test temperatures. In addition to the dynamics of temperature changes at the control points of the research units during the cooling process, the pressure, temperature, and coolant flow rates on individual circuits were also monitored. The conducted engineless experiment confirmed the correctness of the adopted circuit solutions, and also proves the possibility of further application of serial GCE units in LAC systems.

Keywords: autotractor diesel engine; multi-circuit local cooling; automatic thermal control; units of gas cylinder equipment.