

УДК 621.44.3:678-462

І.В.Грицук, Д.С.Адров

Донецький інститут залізничного транспорту УДАЗТ

Донбаська національна академія залізничного транспорту

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ З СИСТЕМОЮ КОМБІНОВАНОГО ПРОГРІВУ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ ПУСКУ І ПРОГРІВУ

*В роботі представлена розробка математичної моделі розрахунку показників ДВЗ, оснащеного системою комбінованого прогріву з прискореним прогрівом і тепловим акумулятором фазового переходу, яка дозволяє проводити дослідження роботи й параметрів системи і елементів її у різних умовах навколишнього середовища при здійсненні пуску і прогріву прогріву від температури оточуючого середовища до температури «гарячого пуску» та можливості навантаження.*

Ключові слова: *двигун внутрішнього згорання, система комбінованого прогріву, математична модель, прискорений прогрів, тепловий акумулятор фазового переходу*

**Постановка проблеми.** Серед основних проблем ефективної експлуатації енергетичних установок (ЕУ) й засобів транспорту (ЗТ) особливе місце займає передпускова тепла підготовка двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Особливо складним, утрудненим, таким, що супроводжується не тільки зниженням моторесурсу, але й небезпекою аварії, є «холодний» пуск, тобто пуск непрогрітого двигуна в умовах низьких температур навколишнього повітря. При низьких температурах самого двигуна і оточуючого його середовища пуск ускладнюється, надійність пуску істотно знижується, а час підготовки до прийняття навантаження зростає.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для покращення показників ДВЗ в процесі пуску і прогріву було створено систему комбінованого прогріву [1, 2], що складається з системи прискореного прогріву (СППД) й системи утилізації теплоти відпрацьованих газів тепловим акумулятором (СУТГА) фазового переходу.

**Постановка задачі** в даній роботі – розробка математичної моделі розрахунку показників ДВЗ, оснащеного системою комбінованого прогріву з прискореним прогрівом і тепловим акумулятором фазового переходу, яка дозволяє проводити дослідження роботи й параметрів системи і елементів її у різних умовах навколишнього середовища при здійсненні пуску і прогріву від температури оточуючого середовища до температури «гарячого пуску» та можливості навантаження.

**Основний матеріал дослідження.** Для визначення і розрахунку показників роботи ДВЗ з означеною системою в процесі пуску і прогріву необхідно враховувати участь її складових елементів в основних процесах роботи ДВЗ, а для всебічного розгляду і аналізу самої досліджуваної системи, її складових елементів і взаємозв'язків між ними та дослідження властивостей створеної системи в залежності від природно-кліматичних умов її потрібно представляти у складових об'єктах, які самі по собі мають властивості окремих системних об'єктів. Це пояснюється тим, що кожен з об'єктів складається із складових, які по-перше суттєво впливають на його кінцеві характеристики і властивості, а по-друге, й всієї системи відповідно.

До основних складових математичної моделі системи комбінованого прогріву (СКП) ДВЗ в цілому відносимо наступні елементи і процеси: формування і введення основних вихідних даних для роботи системи, теплообмінник (ТО) теплового акумулятора; тепловий акумулятор (ТА), що разом з ТО утворюють СУТГА; процес прогріву ДВЗ за допомогою системи прискореного прогріву СППД й (або) СУТГА; моніторинг досліджуваної системи двигуна в цілому і поелементно; зв'язки між основними елементами системи; зворотній зв'язок, обмеження і вихід системи.

Функцією формування і введення основних вихідних даних для роботи системи є параметри системи, що включають в себе конструктивні, технологічні параметри всіх без виключення елементів досліджуваної системи у відповідності до природно-кліматичних умов, а також забезпечення її експлуатаційними матеріалами, енергією і (або) інформацією про роботу елементів системи, які отримують під час процесу роботи.

Робота окремих складових елементів системи (ТО, ТА, СУТГА, СППД, моніторинг системи) й системи в цілому переводить формування і введення основних вихідних даних для роботи системи у вихід системи.

Зв'язки між основними елементами системи призначені для зміни процесів роботи окремих елементів з метою наближення показників на виході з моделі із заданими показниками, що обумовлені на початку дослідження.

Зворотній зв'язок в системі в цілому призначений для зміни всього процесу з метою наближення показників на виході із заданими показниками на початку дослідження.

Обмеження, що накладаються на окремі складові елементи системи або на систему в цілому формують модель виходу системи або мету проведення роботи всієї системи.

Вихід системи в математичній моделі, тобто визначення екологічних, паливо-економічних показників, термінових (у параметрах часу роботи елементів і всієї системи) та теплових параметрів і характеристик роботи досліджуваної системи комбінованого прогріву ДВЗ, є кінцевим результатом процесу дослідження й може бути визначений в якості призначення всієї розробленої математичної моделі, для досягнення якого всі складові об'єкти системи було об'єднано в одне ціле.

Для оцінки впливу конструктивних і технологічних параметрів окремих складових елементів і в цілому системи прогріву двигуна у відповідності до природно-кліматичних умов його експлуатації на екологічні, паливо-економічні показники, терміни прогріву та основні теплові параметри і характеристики роботи системи прогріву ДВЗ запропоновано досліджувати систему комбінованого прогріву ДВЗ, представлену при поєднанні основних системних об'єктів на рис. 1.

В математичній моделі СКП ДВЗ виділено три основних процеси, які послідовно пов'язані між собою:

- розрахунок теплового акумулятора (рівень  $d$ );
- розрахунок процесу прогріву ДВЗ, в тому числі з СППД і (або) СУТТА (рівень  $e$ );
- визначення результатів, тобто визначення екологічних, паливо-економічних показників, термінових та теплових параметрів і характеристик роботи досліджуваної системи комбінованого прогріву ДВЗ (рівень  $f$ ).

Входом системи загалом і процесу роботи СКП ДВЗ рівня  $a$  - формування і введення основних вихідних даних для роботи системи служать:

- основні параметри роботи ДВЗ, що визначаються за допомогою програмного комплексу Dizel-RK [3, 4], серед яких в першу чергу температурні та екологічні параметри й інші характеристики на відповідному режимі його роботи при здійсненні прогріву ДВЗ;
- конструктивні параметри і характеристики системи охолодження (СО) ДВЗ, теплового акумулятора [5, 6], утилізаційного теплообмінника [7], системи прискореного прогріву [1, 8], коефіцієнтів апроксимації досліджуваної системи, вихідні дані для формування моніторингу системи [9] охолодження ДВЗ і досліджуємої системи СКП ДВЗ [10].

На виході утворюються продукти згоряння  $M_{nz}$  як сукупність великої кількості шкідливих та нешкідливих компонентів  $\sum m_i$ , невикористана теплова енергія  $Q_T$  вихлопних газів, теплота від системи охолодження та від системи охолодження оливи й інше.

Для керування робочим процесом СКП ДВЗ з метою наближення показників виходу системи до заданих показників служить зворотній зв'язок (рівень  $b$ ), який забезпечує моніторинг системи охолодження ДВЗ (мале коло) в різних його елементах, а також системи СППД, теплового акумулятора в процесі роботи системи при охолодженні її на протязі певного терміну часу і в процесі прогрівання й інше.

Окремі об'єкти «утилізаційний теплообмінник (рівень  $c$ ) – тепловий акумулятор (рівень  $d$ )» утворюють в загальному вигляді єдину енергетичну систему зі своїми особливими властивостями, яка виконую наступні функції:

- відбір теплоти за допомогою теплообмінника від відпрацьованих газів (ВГ) ДВЗ,
- передача теплоти до високотемпературного контуру теплового акумулятора (ТА),
- фазове перетворення теплоакуючого матеріалу (ТАМ) в ТА фазового переходу,
- зберігання отриманої теплоти на протязі відповідного терміну часу,
- віддача теплоти від низькотемпературного контуру ТА до системи охолодження ДВЗ.

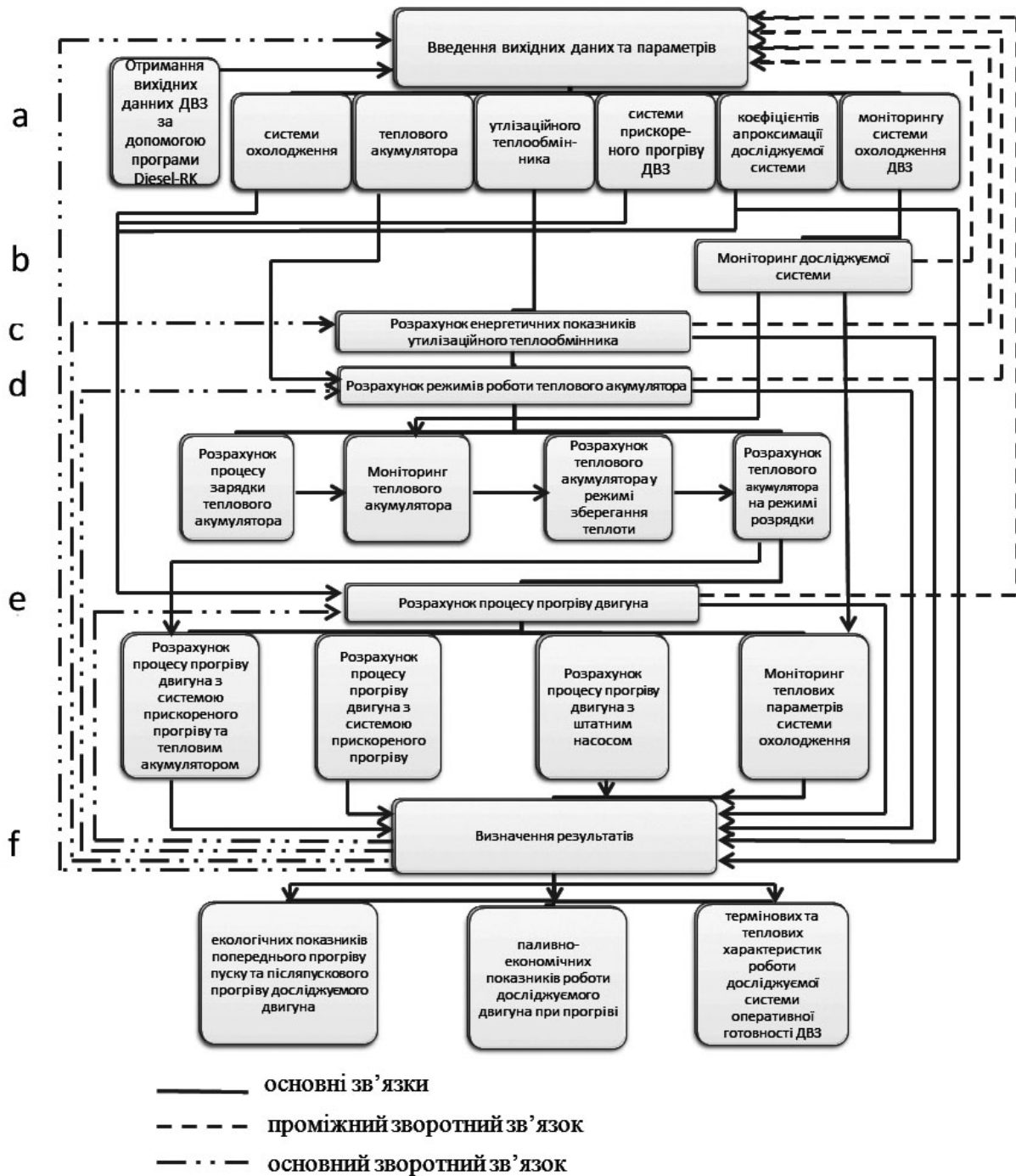


Рис. 1 Укрупнена структурна схема математичної моделі системи комбінованого прогріву ДВЗ у складі системи прискореного прогріву й системи утилізації теплоти відпрацьованих газів тепловим акумулятором фазового переходу

Для визначення енергетичних показників утилізаційного теплообмінника ВГ ДВЗ на рівні *c* на основі аналізу, конструктивних параметрів та фізичних властивостей розраховуються наступні параметри: коефіцієнт тепловіддачі  $k$ , середній температурний напір  $dT$  та тепла потужність теплообмінника  $Qt$ .

Об'єкт рівня *d* визначається і описується суто як тепловий акумулятор фазового переходу. На цьому рівні проводиться розрахунок процесу зарядки ТА, моніторинг температур в різних частинах конструкції ТА, розрахунок ТА у режимі зберігання теплоти, розрахунок ТА на режимі розрядки. До цього рівня включено розрахунок фазового переходу теплоакумуючого матеріалу, що є особливістю розрахунку теплового акумулятора фазового переходу. Енергетичний вихід рівня *a* і

рівня  $c$  є вхідним параметром процесу рівня  $d$ . Крім цього на рівні  $d$  моніторинг температур в різних частинах конструкції ТА виконується на основі параметрів, отриманих на рівні  $a$  і рівня  $b$ . Результатом розрахунку на означеному рівні  $e$ : коефіцієнт тепловіддачі  $k_{tal}$  від теплоносія до ТАМ, середній температурний напір від теплоносія до ТАМ  $dT_{tal}$ , час зарядки ТА  $t_{zar}$  та енергетичний ККД зарядки ТА  $\eta_{zar}$ , час зберігання зарядки ТА  $t_{zber}$ , коефіцієнт тепловіддачі  $k_{ta2}$  від ТАМ до охолоджуючої рідини, середній температурний напір від ТАМ до охолоджуючої рідини  $dT_{ta2}$ , час розрядки ТА при прогріві ДВЗ  $t_{roz}$ , кінцеві температури охолоджуючої рідини  $T_{ox}$ , стінок циліндра  $T_{st}$ , головки блока  $T_{gol}$  та в районі колінчастого валу ДВЗ  $T_{pd}$ .

Вибір, параметрів конструкції системи охолодження ДВЗ, утилізаційного теплообмінника, ТА, СППД, процесу прогріву на своїх відповідних рівнях (рівень  $b$ , рівень  $c$ , рівень  $d$  і рівень  $e$ ) забезпечують підсистеми зворотного зв'язку з рівнем  $a$  у математичній моделі.

Об'єкти рівня  $e$  описують процес безпосереднього прогріву ДВЗ. У відповідності до конструкції розробленої системи [1, 2, 10] на цьому рівні виконуються наступні розрахунки:

- розрахунок процесу прогріву ДВЗ з системою прискореного прогріву (СППД) та ТА фазового переходу;
- розрахунок процесу прогріву двигуна з СППД;
- розрахунок процесу прогріву з штатним водяним насосом (помпою);
- а також виконується моніторинг СО ДВЗ і всієї досліджуваної системи зі своїми системними властивостями.

Виходом підсистеми рівня  $e$  є: час прогріву до заданої температури охолоджуючої рідини  $t_{prog}$ , кількість теплоти яку необхідно отримати для прогріву до заданої температури охолоджуючої рідини  $Q_{prog}$ , кількість теплоти яку отримуємо від ТА  $Q_{ta}$ , процесу згорання палива  $Q_{top}$ .

На кінцевому рівні  $f$  визначаються:

- екологічні показники попереднього прогріву, пуску та після пускового прогріву досліджуваного ДВЗ;
- паливо-економічні показники роботи досліджуваного двигуна при прогріві;
- термінові (у параметрах часу роботи елементів і всієї системи) та теплові характеристики роботи досліджуваної системи комбінованого прогріву ДВЗ.

Вхідними параметрами  $e$ : результати апроксимації експериментальних досліджень, результати розрахунків рівнів  $b$ ,  $c$ ,  $d$  і  $e$ .

Вихід системи:

- термінові викиди оксидів азоту та твердих часток,
- термінова витрата палива,
- питомі викиди оксидів азоту та твердих часток,
- питома витрата палива для різних режимів роботи СКП ДВЗ та ДВЗ, оснащеного штатною системою,
- а також динаміка прогріву ДВЗ для різних режимів роботи СКП ДВЗ та ДВЗ, оснащеного штатною системою охолодження.

Зворотній зв'язок (рівень  $f$ ) управляє процесами рівнів  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  і  $e$  для реалізації заданого процесу прогріву ДВЗ (той чи інший алгоритм передпускової підготовки, пуску та після пускового прогріву досліджуваного ДВЗ) в залежності від природно-кліматичних і технологічних умов роботи, та інших факторів, які мають місце при реальному процесі експлуатації енергетичної установи (ЕУ). Перераховані параметри визначають режими роботи (рівні  $a$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  і  $f$ ), тобто значення витрат теплової енергії, палива і викиду шкідливих речовин відпрацьованих газів ЕУ для реалізації того чи іншого закону формування оперативної готовності СКП ДВЗ.

Алгоритм формування оперативної готовності СКП двигуна внутрішнього згорання з системою прискореного прогріву й утилізацією теплоти відпрацьованих газів тепловим акумулятором представлено в роботі [10].

Система комбінованого прогріву ДВЗ функціонує в зовнішньому середовищі і є відкритою. Це пояснюється тим, що її елементи і сама система в цілому обмінюється з середовищем речовинами, енергією і інформацією.

Основні взаємозв'язки з середовищем, які враховуються при дослідженні системи наступні:

- із середовища, яке характеризується тиском  $P_0$ , температурою  $T_0$  і відносною вологою  $\varphi_0$  поступає паливо і повітря в процес рівня  $a$ ;
- середовищу віддається частина теплової енергії, отриманої в процесі рівнів  $b$ ,  $c$ ,  $d$  і  $e$ ;

- в середовище поступає супутній вихід процесу рівня  $a$  (продукти згорання, частина теплової енергії);

- відображає взаємодію ЕУ, оснащеної означеною системою з повітрям, яке враховується параметрами вітру у процесі виконання моніторингу СО і системи в цілому;

В якості обмеження для всієї системи розглядаються визначені величини питомих витрат палива та викидів забруднюючих речовин, тобто мети функціонування системи, які визначають вихідні параметри ЕУ з системою комбінованого проріву ДВЗ.

Таким чином, запропонована укрупнена структурна схема і сама математична модель ДВЗ оснащеного системою комбінованого прогріву повністю відповідає поставленим вимогам та реалізує в повному обсязі різні алгоритми процесу передпускової підготовки, пуску та після пускового прогріву досліджуваного ДВЗ. Крім цього система сформована у відповідності до основних принципів побудови аналогічних систем.

В розробленій системі підсистемою, яка визначає рівень оперативної готовності СКП ДВЗ за ефективністю паливовикористання та забруднення середовища, є СУТТА, СППД, а запропонований підхід дозволяє систематизувати можливі алгоритми прогріву та досліджувати вплив різних алгоритмів роботи СППД та СУТТА на паливну економічність та екологічну безпеку досліджуваного ДВЗ ЕУ в межах розробленої моделі функціонування системи.

### Висновки

Запропонована математична модель системи комбінованого прогріву ДВЗ з прискореним прогрівом і тепловим акумулятором фазового переходу дозволяє проводити дослідження окремих елементів системи у різних умовах навколишнього середовища, конструктивних параметрів та складових елементів системи комбінованого прогріву, а на основі досліджень проводити конструювання її елементів.

1. Патент на корисну модель UA № 50378, МКП (2009) F01P 3/22. Система регулювання температури охолоджуючої рідини двигуна внутрішнього згорання для приводу електроагрегата / І.В. Грицук, З.І. Краснокутська, Д.С. Адров - Опубл. 10.06.2010 Бюл. №11, 6с.
2. Патент на корисну модель UA № 62417, МКП F01P 3/22 (2006.01). Система регулювання температури охолоджуючої рідини газопоршневого електроагрегату з утилізацією теплоти з тепловим акумулятором / І.В. Грицук та ін. - Опубл.25.08.2011, Бюл. №16, 5с.
3. Кулешов, А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания [Текст]. / А.С. Кулешов, Л.В.Грехов - М, МГТУ, 2000. 64 с.
4. www.diesel-rk.bmstu.ru
5. Шульгин, В.В. Тепловые аккумуляторы транспортных средств [Текст]. / В.В. Шульгин СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2005. - 268 с.
6. Тепловий акумулятор як засіб підвищення ефективності пуску стаціонарного двигуна в умовах низьких температур [Текст] / Д.С.Адров та ін. – // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. - Донецьк: ДонІЗТ, 2011 – №27.- С. 117-126.
7. Особливості моделювання і дослідження процесів знімання й віддачі теплоти відпрацьованих газів ДВЗ в конструкції теплообмінника системи утилізації теплової енергії з тепловим акумулятором фазового переходу [Текст] / О. І. П'ятничко та ін. –// Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. - Донецьк: ДонІЗТ, 2011 – №28.- С. 122-130.
8. Адров, Д.С. Математичне моделювання роботи системи охолодження двигуна внутрішнього згорання утилізаційної установки при визначенні часу прогріву [Текст]. / Д.С. Адров //Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. - Донецьк: ДонІЗТ, 2011 – №27. С. 105-112
9. Сычушкин, И.В. Автоматизированная система идентификации тепловых параметров водяной системы энергоустановки транспортного средства [Электрон. ресурс] / И.В. Сычушкин (Эффективность системы электроэнергетики и экономии электрической энергии) – Режим доступа: <http://www1.nntu.nnov.ru/RUS/NEWS>
- 10./futuretechnology\_2005/section02.doc
11. Особливості експериментальної стаціонарної моторної установки й методики для дослідження системи прискореного прогріву двигуна та утилізації теплоти його відпрацьованих газів тепловим акумулятором. [Текст]. / Д.С. Адров та ін. // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту - Донецьк: ДонІЗТ, 2011 – №28., С. 179-189.