

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Постол Юлія Олександрівна

УДК 621.41-53

**РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОМІРНОЇ
СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ДВИГУНА СТІРЛІНГА НЕВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.05.03 – “Теплові двигуни”

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Трактори і автомобілі” Таврійської державної агротехнічної академії Міністерства аграрної політики України.

Науковий керівник: доктор технічних наук,
професор Долганов Кінт Євгенович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри “Двигуни і теплотехніка”.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор Міщенко Микола Іванович,
Горлівський автомобільно-дорожній інститут
Донецького національного технічного університету,
завідувач кафедри “Автомобілі і двигуни”;

кандидат технічних наук,
старший наук. співробітник Ковальов Сергій Олександрович,
“Державний автотранспортний науково-дослідний
і проектний інститут” (ДП “ДержавтотрансНДІпроект”),
заступник завідуючого лабораторією.

Провідна установа: Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”
Міністерства освіти і науки України,
кафедра “Двигуни внутрішнього згоряння”, м. Харків

Захист відбудеться “___” _____ 2004 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.03 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, м. Київ, вул. Суворова, 1.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42.

Автореферат розісланий “___” _____ 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ Матейчик В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема вичерпання запасів нафти змушує шукати альтернативні види палива. Такими паливами можуть бути: кам'яне вугілля, природний та інші гази, а також гази та рідини, які добуваються з сільськогосподарської продукції і різноманітних відходів та інше. Але виникає проблема їх використання, тому що більшість цих палив незручні або непридатні для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). З цієї точки зору варті уваги двигуни Стірлінга (ДС), які можуть використовувати будь-яке джерело теплоти. Ці двигуни були відомі і широко використовувалися задовго до появи ДВЗ, а у теперішній час розроблені і випробувані ДС нового покоління, що створені на основі сучасних металів і технологій.

Нові ДС створювалися в першу чергу для заміни бензинових двигунів і дизелів на мобільних машинах. Щоб забезпечити необхідні потужність та економічність, довелося ускладнювати ДС, особливо їхню систему автоматичного регулювання, без якої застосовувати ДС не можливо. Через велику вартість вони не одержали поширення.

Але ДС можна успішно використовувати як первинні двигуни в електрогенераторних агрегатах, особливо в автономних агрегатах невеликої потужності 0,5...10 кВт, що почали застосовуватись в невеликих сільськогосподарських та інших підприємствах і об'єктах як джерела електропостачання. ДС можна розглядати як реальну альтернативу ДВЗ, що зараз застосовується на цих установках. Вимоги до двигунів таких агрегатів менш жорсткі, чим до двигунів мобільних машин, тому конструкція ДС може бути спрощена.

До важливих переваг ДС відносяться: можливість використання різноманітних видів палива, у тому числі твердих, низькі шумність і токсичність, простота конструкції і технічне обслуговування, при такій же паливній економічності, як у поршневих ДВЗ. Але для ДС потрібна складна система автоматичного регулювання потужності, частоти обертання колінчатого вала ДС і температури нагрівача. Тому однією з актуальних задач є створення для малопотужних ДС простої і ефективної двомірної системи автоматичного регулювання (САР).

Вирішенню цієї задачі присвячена ця дисертація.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з виконанням підпрограми №1.4 “Удосконалювання і розробка наукових основ підвищення експлуатаційної ефективності мобільної сільськогосподарської техніки”, № держ. реєстр. 0102U000678, що виконується кафедрою “Трактори і автомобілі” за тематикою наукових досліджень Таврійської державної агротехнічної академії (ТДАТА), і договору про науково-технічне співробітництво між Національним транспортним університетом (НТУ, м. Київ) і ТДАТА “Розробка і дослідження системи автоматичного регулювання температури двигуна Стірлінга” від 15.05.02 р.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка принципової і конструктивної схем двомірної САР частоти обертання колінчатого вала і температури нагрівача ДС невеликої потужності та визначення раціональних параметрів цієї САР.

Для досягнення цієї мети вирішувалися такі задачі:

1. Аналіз способів регулювання потужності ДС і вибір раціонального способу для ДС невеликої потужності.
2. Доробка конструкції ДС моделі УДС-1 для використання його в якості регульованого об'єкта при дослідженнях експериментальної САР ДС в агрегаті з електрогенератором.
3. Розробка принципової і функціональної схем двомірної САР частоти обертання колінчатого вала і температури нагрівача ДС.
4. Розробка конструкції експериментальної САР ДС моделі УДС-1. Виготовлення експериментального зразка.
5. Розробка динамічної математичної моделі двомірної САР ДС, алгоритмів і програм для проведення розрахунково-теоретичних досліджень на ЕОМ.
6. Розробка методик експериментальних досліджень, підготовка устаткування і проведення досліджень.
7. Визначення факторів, які суттєво впливають на якість роботи САР, та вибір їх раціональних параметрів.
8. Розробка рекомендацій з використанням результатів дослідження.

Об'єкт дослідження – робочі процеси в двомірній САР температури і частоти обертання ДС невеликої потужності.

Предмет дослідження – методи і способи отримання заданих статичних і динамічних показників САР.

Методи дослідження - експериментально-розрахункові. Експериментальним методом визначені статичні і динамічні характеристики САР ДС і її елементів, отримані вихідні дані для математичної моделі. Розрахунковий метод використовувався для аналізу впливу конструктивних і регулювальних параметрів на статичні і динамічні показники САР.

Наукову новизну отриманих результатів складають:

1. Нові дані про можливість регулювання потужності невеликих ДС за допомогою змінюваного “мертвого” об'єму.
2. Математична модель двомірної САР частоти обертання і температури нагрівача ДС невеликої потужності.
3. Дані про вплив конструктивних і регулювальних параметрів САР ДС мод. УДС-1 на її статичні і динамічні характеристики.

Практичне значення мають:

1. Конструкція експериментальної двомірної САР ДС мод. УДС-1.
2. Алгоритми і програми для розрахунків на ЕОМ статичних і динамічних характеристик двомірної САР ДС.
3. Рекомендації з вибору параметрів двомірної САР ДС.

Особисто автором виконано:

Розроблено принципову схему і конструкцію експериментальної САР для ДС мод. УДС-1 з регульованим “мертвим” об'ємом. Розроблено динамічну математичну модель САР ДС. Розроблено установку для проведення експериментальних досліджень і методики їхнього проведення. Проведено експериментальні дослідження. Проаналізовано вплив конструктивних і регулювальних параметрів

САР ДС на її статичні і динамічні показники. Розроблено рекомендації з використання результатів дослідження.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися на науково-технічних конференціях ТДАТА в 1997-2003 р. і на п'яти засіданнях республіканського семінару по теплових двигунах і ресурсозбереженню в м. Мелітополі в 1997-2001 р., на конференціях професорсько - викладацького складу і студентів НТУ в м. Києві в 2001...2003 р., на VI і VII Міжнародних конгресах двигунобудування в сел. Рибаче (Україна) у 2001 і 2002 р.

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковані в 16 статтях і тезах.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, у який входить 87 найменувань, у тому числі 14 на іноземних мовах. Обсяг дисертації складає 132 стор. основного машинописного тексту, 83 рисунки, 8 таблиць, 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок її з науковими програмами, визначені мета і задачі досліджень, методика, предмет і об'єкт дослідження, наукова і практична цінність роботи, охарактеризовані реалізація й апробація результатів роботи, а також публікації матеріалів дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянута можливість використання у якості відходів сільськогосподарського виробництва в ДС нетрадиційних видів палив. Проведено аналіз систем автоматичного керування автомобільного ДС. Приведено принципові схеми систем регулювання, описано принцип їх дії, їхні переваги і недоліки.

Визначені вимоги до систем автоматичного регулювання частоти обертання колінчатого вала двигуна і температури нагрівача.

У відомих ДС потужність регулюється зміною початкового тиску робочого тіла у внутрішньому контурі двигуна за допомогою складної системи з компресором, балонами та іншими приладами. В ДС невеликої потужності можливо використовувати більш просту систему з "мертвим" об'ємом, що змінюється. Для розробки і визначення раціональних параметрів такої системи можна використовувати спрощені діючі моделі ДС чи моделювати роботи його на ЕОМ.

Рішенню цих питань присвячена ця дисертація.

В другому розділі описана розроблена експериментальна САР ДС з невеликою потужністю.

У якості регульованого об'єкту використовувався учбово-демонстраційний ДС мод. УДС-1, партія яких була виготовлена у 1986...1987 р. Київським кооперативом "Плазмотрон". Цей ДС дообладнаний "мертвим" об'ємом, який змінюється для регулювання потужності, та системами автоматичного регулювання температури нагрівача (САРТ) і частоти обертання колінчатого вала (САРЧ), які входять до САР. До ДС приєднали електричний генератор, у результаті чого

отримали міні-Стірлінг-електричний агрегат (рис.1), генератор якого може використовуватись як електричне гальмо.

Двигун УДС-1 є спрощеним V- подібний ДС γ - модифікації витиснювального типу з двома циліндрами, розташованими під кутом 90^0 . Один з них робочий 7, а другий додатковий 14. У робочому циліндрі 7 переміщається поршень 8, а в додатковому циліндрі 14 - витискувач 18. Поршень і витискувач з'єднані з кривошипом колінчатого вала 23 шатунами 13 і 22. Направляючою для витискувача був йому шток 19. Витискувач розділяє додатковий циліндр на дві порожнини: гарячу 15 і холодну 20. Обидві порожнини з'єднані між собою зазором між витискувачем і стінками додаткового циліндру. Холодна порожнина з'єднана з робочим циліндром трубою 12.

Додатковий циліндр виконує роль нагрівача й охолоджувача робочого тіла, яким в УДС-1 служить повітря. Тепло підводиться до робочого тіла зовні через стінки циліндра від продуктів згоряння палива, що утворюються в камері згоряння 16 з пальником 17. Як паливо використовується зріджений нафтовий пропан-бутановий газ. Температура продуктів згоряння регулюється зміною кількості газу, який спалюється і визначається положенням крана 24.

З холодної порожнини 20 тепло відводиться в систему рідинного охолодження 21. Для інтенсифікації процесу відводу теплоти з холодної порожнини на додатковому циліндрі виконані кільцеві ребра. Теплоносієм у системі охолодження служить вода.

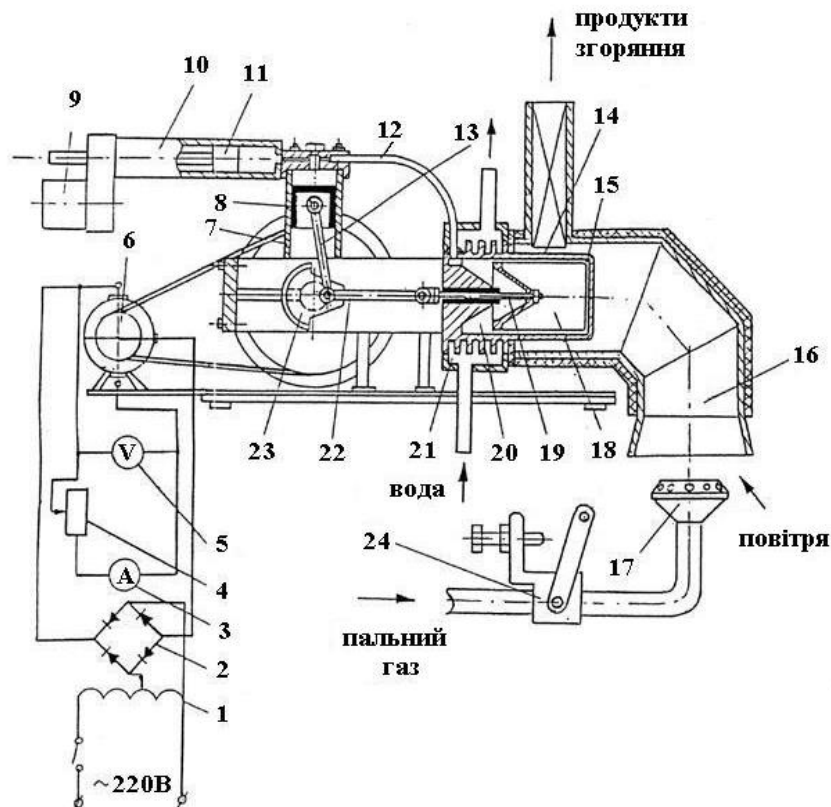


Рис. 1. Принципова схема двигуна УДС-1

У двигуні УДС-1 немає типового для ДС регенератора теплоти, його роль частково виконує витискувач 18. Коли повітря проходить через зазор з гарячої

порожнини в холодну, витискувач поглинає частину теплоти, а при зворотному русі повітря з холодної порожнини в гарячу, теплота передається від витискувача повітря.

Внутрішній контур двигуна УДС-1 негерметичний. При непрацюючому двигуні тиск повітря в ньому дорівнює атмосферному тиску. До робочого циліндра приєднано циліндр 10 з поршнем 11, який можна переміщати за допомогою гвинтової передачі з приводом від реверсивного електродвигуна 9. Цей циліндр виконує роль додаткового регульованого “мертвого” об’єму.

В експериментальному ДС застосована подача повітря до пальника природною тягою й ежекцією, що не регулюється. Тому в САР, розроблений для цього ДС, є дві незалежні САР: максимальної температури стінки нагрівача (САРТ) і частоти обертання колінчатого вала ДС (САРЧ), тобто САР у цілому є двомірною, незв’язаною. У Стірлінг – електричному агрегаті обидва ці параметри повинні підтримуватися з високою точністю. Тому в САРТ і САРЧ застосований релейний принцип регулювання, при якому маємо астатичні характеристики регульованого параметру. На рис.2 показана схема САРТ. Вона розроблена на основі мікропроцесорного вимірника-регулятора ТРМ12-Ріс.

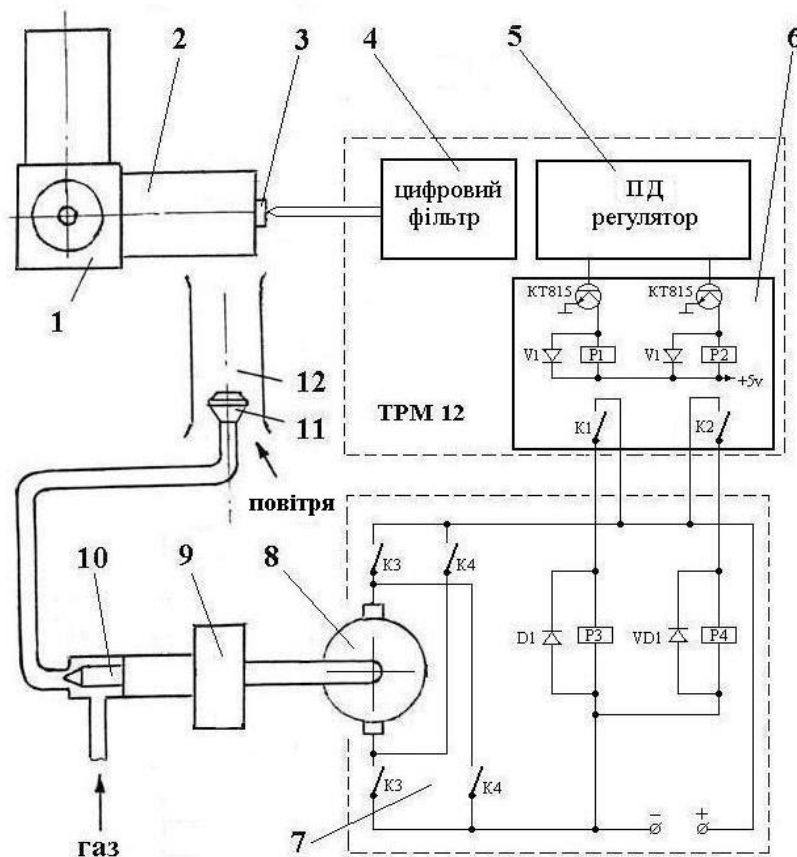


Рис. 2. Схема експериментальної САРТ ДС

Від термопары 3 сигнал надходить до цифрового фільтру 4, де згладжуються випадкові імпульсні перешкоди, сигнал фільтрується в одиницях вимірюваної величини і передається на логічний пристрій – ПД-регулятор. Поточний сигнал

порівнюється з заданими верхньою і нижньою межами регулювання температури. При відхиленні поточного значення від заданих меж подається сигнал на вихідний пристрій 6, що за допомогою двох реле керує виконавчим механізмом 7, а той, у свою чергу, електродвигуном 8. Електродвигун за допомогою планетарного редуктора 9 переміщає голку дозатора газу 10, або зменшуючи, або збільшуючи подачу газу через газовий пальник 11 у камеру згоряння 12. До ПД-регулятора через адаптер мережі моделі АС-2 підключається ЕОМ, що записує результати вимірів.

Система автоматичного регулювання частоти обертання колінчатого вала двигуна розроблена на підставі універсального програмувального восьмирозрядного лічильника імпульсів СИ-8 з індуктивним датчиком частоти обертання (рис.3). Лічильник імпульсів 9 за допомогою генератора часових інтервалів 7 перетворює сигнал у частоту обертання колінчатого вала двигуна і передає його в пристрій порівняння 10, де задаються межі регулювання, порівнюється поточне значення з заданим і формується сигнал керування вихідними пристроями 11, 12.

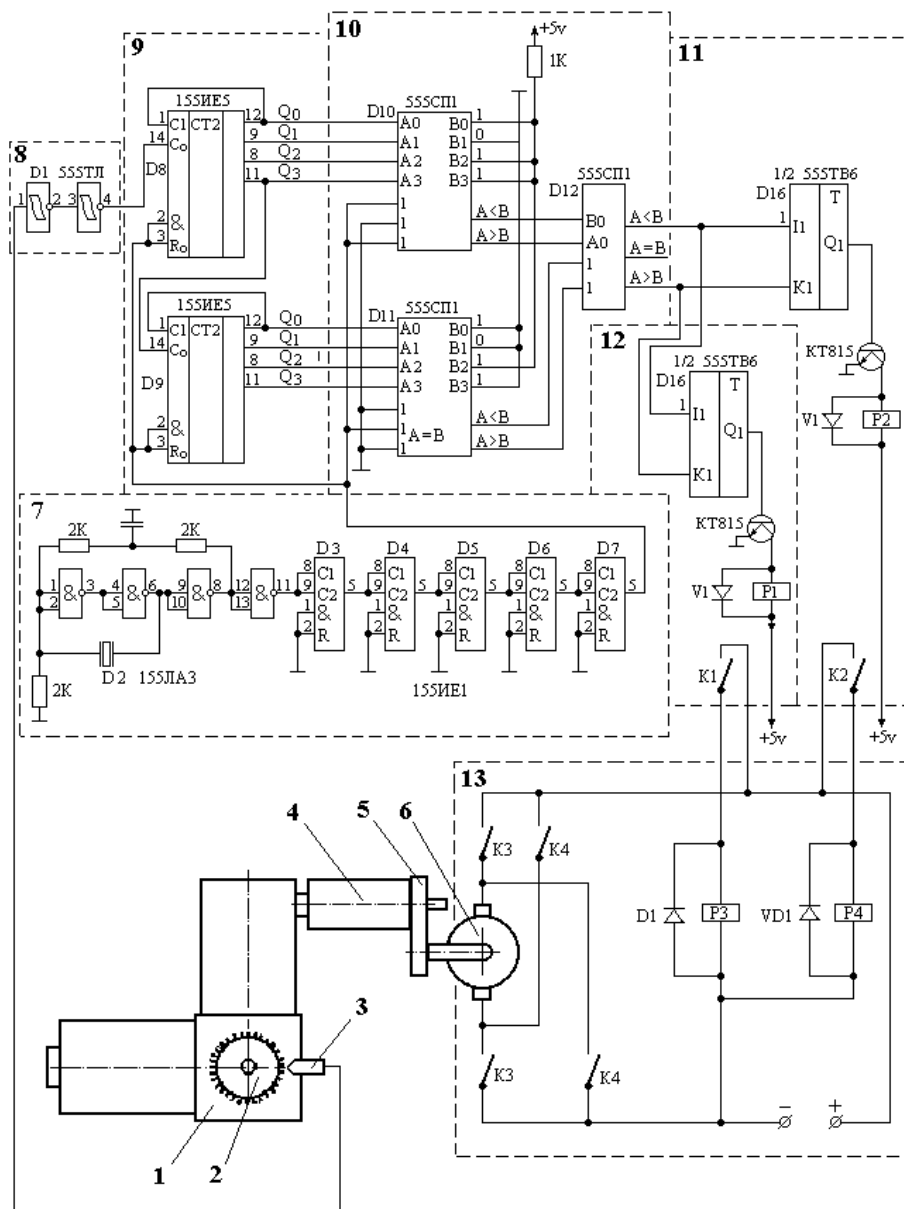


Рис. 3. Схема експериментальної САРЧ ДС

Якщо частота обертання відхиляється від заданих меж, то сигнал з вихідних пристроїв 11, 12 надходить до виконавчого механізму 13, що за допомогою реверсивного електродвигуна 6 і редуктора 7 переміщає поршень у циліндрі з додатковим “мертвим” об’ємом у потрібному напрямку доти, поки не стане дотримуватися нерівність $n_{\min} < n < n_{\max}$.

У третьому розділі описана розроблена динамічна математична модель САР, у яку входять п’ять диференціальних рівнянь: одне другого порядку і чотири першого порядку. В ній використовуються аналітичні залежності та дослідні характеристики таких ланок, що апроксимуються поліномами першого, другого і третього ступенів з одним чи декількома аргументами. При цьому передбачається, що статичні характеристики ланок, одержані на сталих режимах роботи, залишаються справедливими і для перехідних процесів.

Для складання математичної моделі САР двигуна УДС-1 був врахований багаторічний досвід складання і застосування таких моделей на кафедрі “Двигуни і теплотехніка” НТУ під керівництвом професора К.Є. Долганова.

Експерименти показали, що ДС мод. УДС-1 є інерційною аперіодичною ланкою другого порядку. Тому рух ДС описаний диференціальним рівнянням 2-го порядку

$$I_{DD} \frac{d^2 n}{dt^2} + I_D \frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi} (M_i - M_m - M_{p.n} - M_e), \quad (1)$$

де I_D і I_{DD} – постійні коефіцієнти, обумовлені по дослідних кривих перехідних процесів двигуна в агрегаті з електрогенератором; M_i – індикаторний крутний момент ДС; M_m – момент умовних механічних втрат ДС; $M_{p.n}$ – частина індикаторного крутного моменту, що витрачається в пасовій передачі; M_e – момент навантаження (опору), створений електрогенератором.

Рівняння теплового балансу нагрівача на неусталеному режимі

$$\Delta Q_n = Q_{pod} - Q_i - Q_{otv}, \quad (2)$$

де ΔQ_n – надмірність або нестача підведеного теплового потоку; Q_{pod} , Q_i , Q_{otv} – теплові потоки: підведений, перетворений у індикаторну потужність, відведений в охолоджувач.

Для елементарного відрізка часу

$$dQ_{pod} = k_1 \cdot F_1 \cdot (T_{k.c} - T_{гор}) \cdot dt; \quad (3)$$

$$dQ_{otv} = k_2 \cdot F_2 \cdot (T_{гор} - T_{хол}) \cdot dt; \quad (4)$$

$$dQ_i = dN_i, \quad (5)$$

де k_1 , k_2 – коефіцієнти теплопередачі; F_1 , F_2 – площа поверхонь, через які передається тепловий потік; $T_{k.c}$, $T_{гор}$, $T_{хол}$ – середні за цикл температури: камери згоряння у гарячій та у холодній порожнинах нагрівача; N_i – індикаторна потужність; t – час.

Елементарна зміна теплового потоку в нагрівачі

$$dQ_n = c_{pm} \cdot M_{p.T} \cdot dT_{гор}, \quad (6)$$

де c_{pm} – питома ізобарна теплоємність робочого тіла; $M_{p.T}$ – середня маса робочого тіла в нагрівачі.

З урахуванням рівнянь (2) ... (6) одержуємо диференціальне рівняння для нагрівача

$$\frac{dT_{\text{гор}}}{dt} = \frac{1}{c_{pm} \cdot M_{P.T}} \cdot [k_1 \cdot F_1 \cdot (T_{\text{к.с}} - T_{\text{гор}}) - N_i - k_2 \cdot F_2 (T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}})], \quad (7)$$

Аналогічне рівняння одержуємо для охолоджувача

$$\frac{dT_{\text{хол}}}{dt} = \frac{1}{c_{pm} \cdot M_{P.T.\text{хол}}} \cdot [k_2 \cdot F_2 \cdot (T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}) - k_3 \cdot F_3 \cdot (T_{\text{хол}} - T_{\text{охл}})], \quad (8)$$

де k_3 – коефіцієнт теплопередачі в систему охолоджувача; F_3 – площа поверхні стінки охолоджувача; $M_{P.T.\text{хол}}$ – маса робочого тіла в охолоджувачі; $T_{\text{охл}}$ – середня за цикл температура в системі охолодження.

У контурі САРТ формуються пропорційний і диференціальний сигнали рівняння ПД закону

$$u_{T.P} = k_{T.П} \cdot u_{T.y} + k_{T.Д} \cdot \frac{du_{T.y}}{dt}, \quad (9)$$

де $u_{T.y}$, $u_{T.P}$ – напруга на вході та виході формувача сигналів управління температурою $T_{\text{гор}}$; $k_{T.П}$, $k_{T.Д}$ – коефіцієнти підсилення пропорційного і диференціального сигналів по температурі $T_{\text{гор}}$.

Виконавчий механізм у контурі САРТ є релейною ланкою

$$\frac{dh_{Д.Г}}{dt} = k_{ИМТ} \cdot u_{ПИТ} \quad \text{якщо} \quad u_{T.P} - u_{3.T} = \Delta u_T < -\varepsilon_T; \quad (10)$$

$$\frac{dh_{Д.Г}}{dt} = -k_{ИМТ} \cdot u_{ПИТ} \quad \text{якщо} \quad u_{T.P} - u_{3.T} = \Delta u_T > -\varepsilon_T; \quad (11)$$

$$\frac{dh_{Д.Г}}{dt} = 0 \quad \text{якщо} \quad -\varepsilon_T < \Delta u_T < \varepsilon_T, \quad (12)$$

де $h_{Д.Г}$ – осьова координата затвору дозатора газу; ε_T – припустиме відхилення температури T_H від заданого значення; $k_{ИМТ}$ – коефіцієнт підсилення, виконавчий механізм у контурі САРТ; $u_{ПИТ}$ – напруга джерела живлення; $u_{3.T}$ – напруга задавача температури $T_{\text{гор}}$; Δu_T – припустиме відхилення температури T_H від заданого значення.

У контурі САРЧ формуються пропорційний і диференціальний сигнали керування за ПД законом

$$u_{n.p} = k_{n.П} \cdot u_{n.y} + k_{n.Д} \cdot \frac{du_{n.y}}{dt}, \quad (13)$$

де $u_{n.y}$, $u_{n.p}$ – напруга на вході та виході формувача сигналів управління частоти обертання; $k_{n.П}$, $k_{n.Д}$ – коефіцієнти підсилення пропорційного і диференціального сигналів по n .

Виконавчий механізм у контурі САРЧ є релейною ланкою

$$\frac{dh_{М.О}}{dt} = k_{ИМЧ} \cdot u_{ПИТ} \quad \text{якщо} \quad u_{n.p} - u_{3.Ч} = \Delta u_n < -\varepsilon_n, \quad (14)$$

$$\frac{dh_{m.o}}{dt} = -k_{имч} \cdot u_{шт} \quad \text{якщо} \quad u_{п.p} - u_{з.ч} = \Delta u_n > -\varepsilon_n, \quad (15)$$

$$\frac{dh_{m.o}}{dt} = 0 \quad \text{якщо} \quad -\varepsilon_n < \Delta u_n < \varepsilon_n, \quad (16)$$

де $h_{m.o}$ - осьова координата поршня у “мертвому” об’ємі; ε_n - припустиме відхилення частоти обертання n від заданого значення; $k_{имч}$ – коефіцієнт підсилення релейної ланки в контурі САРЧ; $u_{з.т}$ – напруга задавача частоти обертання.

Додатковий “мертвий” об’єм залежить від положення поршня в циліндрі додаткового “мертвого” об’єму:

$$V_m = k_{m.o} \cdot h_{m.o}, \quad (17)$$

де $k_{m.o}$ – розмірний коефіцієнт.

Для виконання розрахункових досліджень на ЕОМ розроблені програми, у яких системи диференціальних рівнянь вирішуються чисельним методом інтегрування Рунге-Кутта-Фельдберга.

У четвертому розділі приведені мета, задачі і програми експериментальних досліджень. Описано об’єкт експериментальних досліджень, випробувальні стенди, устаткування і прилади.

Метою експериментальних досліджень було: визначення даних, які необхідні для використання в рівняннях математичної моделі; перевірка адекватності математичних моделей; підтвердження правильності результатів розрахунків на ЕОМ.

Експерименти провадилися в науково-дослідній лабораторії кафедри “Трактори і автомобілі” ТДАТА і експериментальному цеху Мелітопольського моторного заводу.

Швидкісні характеристики двигуна УДС-1 визначали безпосередньо на Стірлінг–електричному агрегаті (СЕА), електрогенератор використовувався як електричне гальмо. Вироблена електрогенератором енергія поглиналася реостатами і розсіювалася в навколишню атмосферу.

Максимальну температуру нагрівача обмежували 920 К з міркувань забезпечення достатньої надійності стінки нагрівача. Отримана при цій температурі швидкісна характеристика вважалася зовнішньою. Часткові швидкісні характеристики одержували при постійних температурах нагрівача в межах від 580 до 920 К по можливості з рівними інтервалами.

При визначенні швидкісних характеристик із включеними САРТ і САРЧ задавачем температури T_n встановлювалась бажана максимальна температура T_n , а задавачем частоти обертання n – її значення, при якому починає формуватися регуляторна гілка. Характеристика знімалась шляхом ступінчастої зміни опору реостатів із прийнятими інтервалами.

Для визначення впливу змінювання “мертвого” об’єму на енергетичні показники двигуна знімали швидкісні характеристики при постійній температурі T_n і різних величинах “мертвого” об’єму. За отриманими даними будували залежності N_e і M_e від величини “мертвого” об’єму V_m при постійних значеннях температури T_n і частоти обертання n .

Для оцінки динамічних показників САРТ і САРЧ знімали характеристики перехідних процесів після миттєвого скидання і накиду навантаження, яке задавали, або вимиканням, або включенням реостатів. Перед початком перехідного процесу СЕА працював 2...3 хв на вихідному сталому режимі. На ПЕОМ записувалися: оцінка часу, частота обертання колінчатого вала двигуна, температура T_n , осьова координата x_m поршня в циліндрі з “мертвим” об’ємом.

У п'ятому розділі наведені результати експериментально-теоретичних досліджень.

Встановлено, що зі збільшенням додаткового “мертвого” об’єму крутний момент і ступінь стиску монотонно зменшуються, при чому момент змінюється інтенсивніше, ніж ступінь стиску. Зменшення потужності і крутного моменту приводить до зменшення частоти обертання колінчатого вала.

Визначався вплив V_m на середній індикаторний тиск за допомогою індикаторних діаграм. Виявлено, що при збільшенні V_m площа індикаторної діаграми і середній індикаторний тиск зменшуються, при цьому зменшується і частота обертання колінчатого вала двигуна. Це свідчить про те, що зміною додаткового “мертвого” об’єму можна регулювати потужність двигуна УДС-1.

Основною статичною характеристикою двигуна УДС-1 як регульованого об’єкта є залежність індикаторного крутного моменту від трьох незалежних параметрів: частоти обертання колінчатого вала, температури робочого тіла в гарячій порожнині і додаткового “мертвого” об’єму. Експерименти показують, що досліджена залежність $M_i = M_i(n, T_{гор}, V_m)$ може бути апроксимована поліномом другого ступеня з трьома аргументами.

За апроксимуючим рівнянням були розраховані швидкісні характеристики двигуна УДС-1 (рис. 4) у вигляді залежностей ефективних крутного моменту і потужності від частоти обертання колінчатого вала ДС при різних значеннях додаткового “мертвого” об’єму при постійній витраті газового палива $G_T = 0,5$ кг/г.

Температура стінки нагрівача залишалася постійною і дорівнювала $T_n = 913$ К. Результати розрахунків говорять про те, що є можливість регулювати потужності у широких межах. Залежності моменту навантаження M_T генератора від частоти обертання n при постійних значеннях омичного опору R навантажувального реостата мають параболічний характер. Вони описані поліномом другого ступеня з двома аргументами.

Оцінка “приємистості” двигуна, тобто здібності двигуна швидко збільшувати потужність, була зроблена в експериментальному цеху Мелітопольського моторного заводу з використанням цифрового аналізатора AVL Digital Analyzer 657 SAD-E/E австрійської фірми AVL. Для цього двигун УДС-1 був обладнаний кварцовим датчиком тиску QC 32C фірми AVL і індуктивним датчиком частоти обертання колінчатого вала. Цифровий аналізатор дозволяє визначати індикаторні діаграми робочих циклів двигуна, що чергуються один за іншим.

Індикаторні діаграми отримані під час різкого збільшення “мертвого” об’єму від 0 до 20 см³ (рис.5) і навпаки.

Перехідний процес на рис.5 почався від діаграми 2 і закінчився на діаграмі 6. Перед початком збільшення “мертвого” об’єму індикаторна потужність двигуна дорівнювала $N_i = 6,50$ Вт при частоті обертання колінчатого вала $n = 378$ хв⁻¹, а

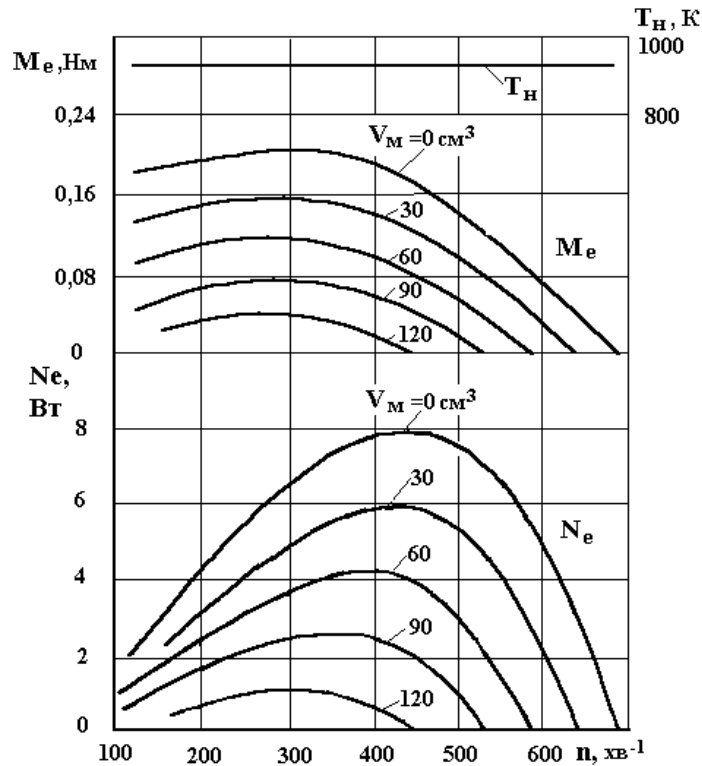


Рис. 4. Розрахункові швидкісні характеристики двигуна УДС-1 при $G_T=0,5$ кг/год і $V_M=\text{var}$

наприкінці $N_i=5,47$ Вт при $n=335$ хв⁻¹. Перехідний процес здійснюється протягом трьох робочих циклів. Тривалість робочого циклу на початку перехідного процесу дорівнює 0,158 с, наприкінці – 0,179 с, у середньому 0,168 с. Тривалість трьох циклів приблизно 0,50 с.

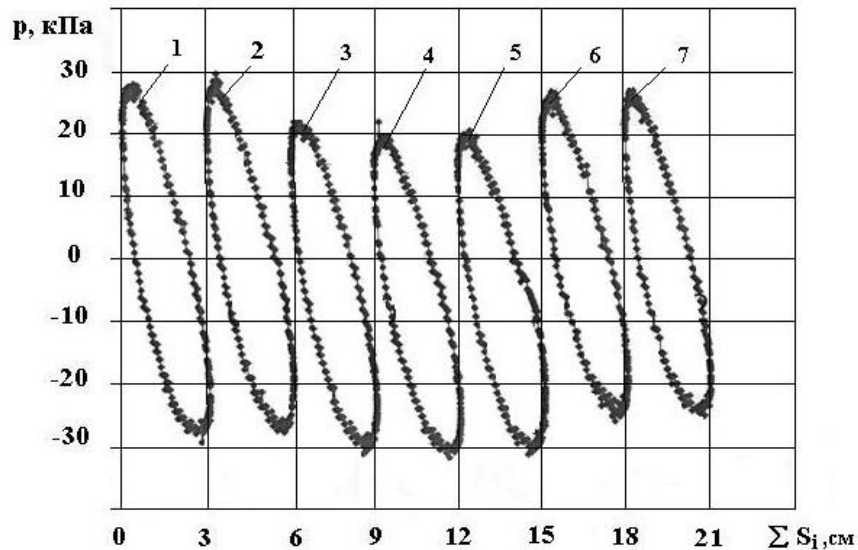


Рис. 5. Індикаторні діаграми, отримані після різкого збільшення “мертвого” об’єму від 0 до 20 см³

Перехідний процес при різкому зменшенні “мертвого” об’єму завершується протягом трьох робочих циклів.

Ці експерименти показують, що двигун досить швидко реагує на зміну величини “мертвого” об’єму.

Для перевірки адекватності математичної моделі порівнювалися дослідні статистичні і динамічні характеристики САР з відповідними характеристиками, розрахованими за допомогою математичної моделі.

Дослідна всережимна характеристика двигуна УДС-1 з експериментальним релейним регулятором (рис.6) говорить про адекватність математичної моделі в статиці.

Для перевірки адекватності математичної моделі САР ДС мод. УДС-1 у динаміці порівнювалися перехідні процеси в САР після миттєвого скидання і накиду навантаження, отримані дослідним шляхом, з розрахованими на ПЕОМ. При зніманні дослідних перехідних процесів з'ясувалося, що в САР є запізнювання. Аналогічне запізнювання було внесено в програму розрахунків. Крім того, враховано, що скидання і накид навантаження в досліді відбувається хоча і швидко, але не миттєво. Тому в програму розрахунків введена уповільнене змінювання моменту навантаження на 0,5 с при скиданні - накиду 100 % навантаження. Порівнювалися перехідні процеси після скидання і накиду 50 і 100 % навантаження.

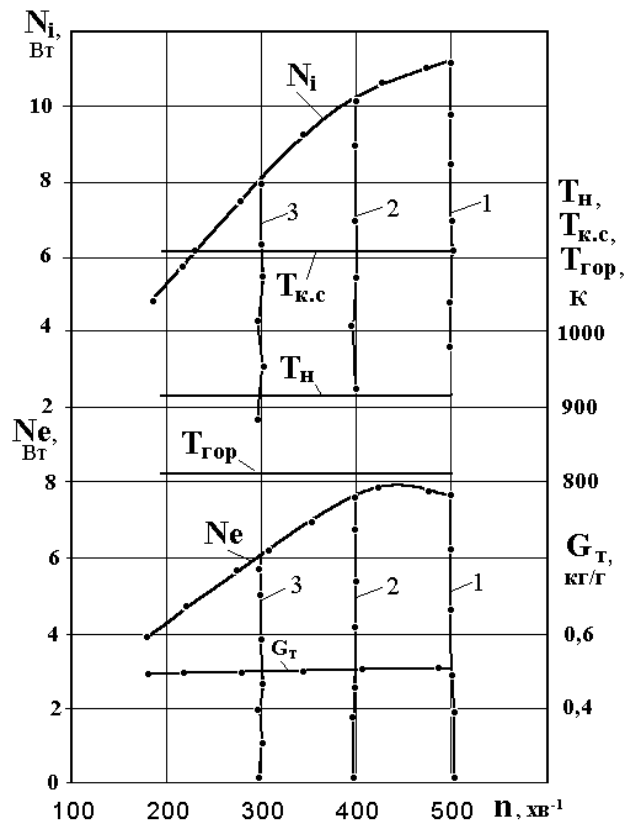


Рис. 6. Всережимна характеристика ДС мод. УДС-1 з релейним регулятором: розрахункова: $UN\emptyset$, мВ: 1 – 80; 2 – 64; 3 – 48

На рис. 7 показані перехідні процеси після скидання і накиду 100 % навантаження. Дослідні криві накладені на розраховані за математичною моделлю. Потужність навантаження змінювалася в межах від 0 до 6,0 Вт.

Видно, що дослідні і розрахункові криві змінювання n добре збігаються між собою. Основна помилка складає 4,18 % при скиданні навантаження і 0,19 % при накиді.

Закид частоти обертання по дослідній кривій на рис. 7а дорівнює 17,3 %, тривалість перехідного процесу 7 с. Осідання частоти обертання на рис. 7б дорівнює 15,4 %, тривалість перехідного процесу 7 с.

У такий спосіб підтверджена адекватність математичної моделі САР ДС мод. УДС-1 у цілому, тому що під час перехідних процесів працювали одночасно і САРЧ і САРТ.

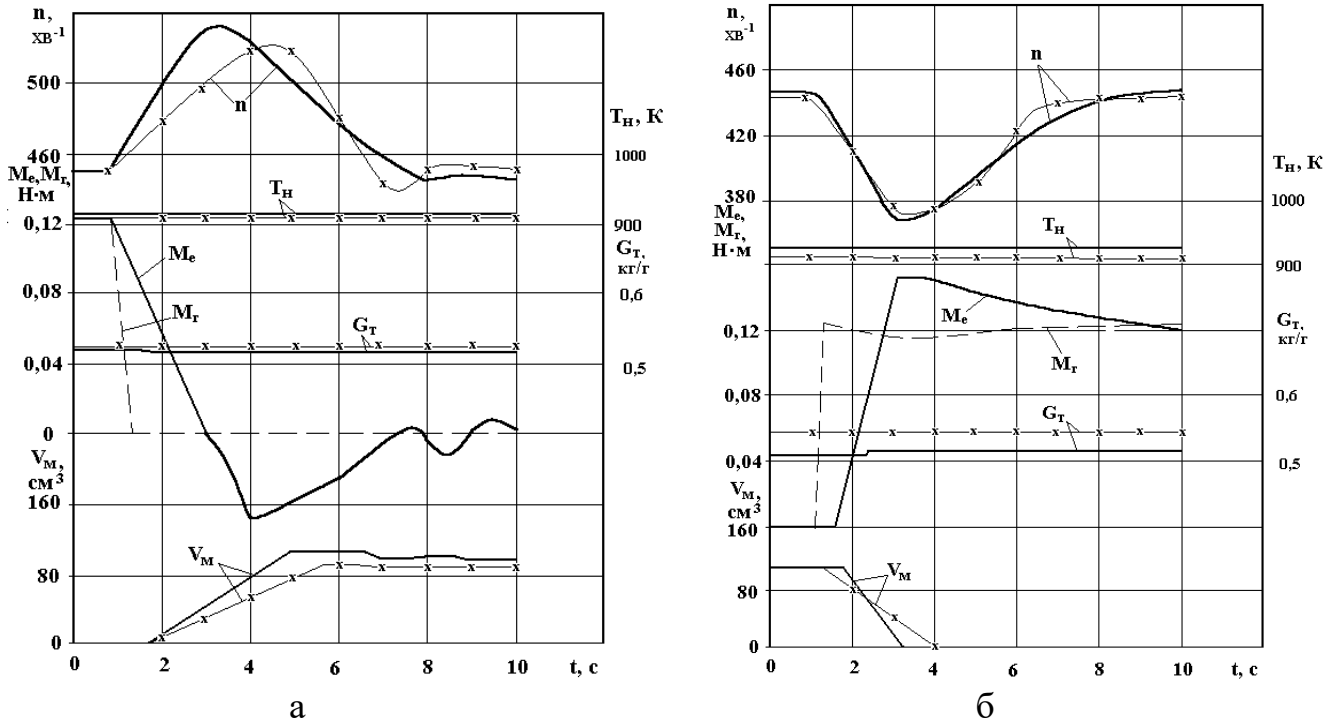


Рис. 7. Перехідні процеси в САР ДС мод. УДС-1 після зміни 100 % навантаження $N_{\text{нг}}$: а) скидання навантаження від 6,3 до 0 Вт; б) накид навантаження від 0 до 6,3 Вт

САРТ стійко підтримує задану температуру T_H . Під час перехідних процесів вона майже не змінюється, бо межі змінювання потужності в УДС-1 незначні: від 0 до 6...7 Вт.

Від електричних агрегатів 1-3-й ступенів автоматизації за ГОСТ 13822-82 потрібно, щоб закиди частоти обертання після миттєвих скидань і накидів 100% навантаження не перевищували 10%, а тривалість перехідних процесів не перевищувала 5 с. Аналіз за допомогою математичної моделі показав, що ці показники в СЕА з ДС УДС-1 залежать від двох параметрів: швидкості змінювання додаткового “мертвого” об’єму і запізнювання початку переміщення поршню в цьому об’ємі. Рациональні значення цих параметрів, при яких задовольняються згадані вище вимоги, складають: швидкість не менш $100 \text{ cm}^3/\text{s}$; запізнювання не більш 0,1 с.

ВИСНОВКИ

1. Одним з напрямків вирішення проблеми використання альтернативних видів палив, які непридатні для ДВЗ, є застосування двигунів Стірлінга для приводу електричних агрегатів невеликої потужності. Однак для ДС потрібна складна багатомірна САР частоти обертання колінчатого вала і температури стінки

нагрівача, причому потужність регулюють зміною початкового тиску робочого циклу в циліндрах ДС.

2. Систему автоматичного регулювання малопотужного ДС можна спростити шляхом застосування регулювання потужності змінювання величини “мертвого” об’єму за умов подачі повітря в камеру згоряння природною тягою. Така експериментальна двомірна САР розроблена в дисертації.

Для натурних досліджень виготовлена експериментальна Стірлінг – електрична установка з навчальним ДС мод. УДС-1, обладнана експериментальною САР.

3. Експериментальна САРТ розроблена на базі мікропроцесорного вимірника – регулятора ТРМ12-Ріс, у який внесені зміни для збільшення його швидкодії, а експериментальна САРЧ – на базі лічильника імпульсів СИ-8. У САРТ і САРЧ реалізується релейний трьохпозиційний принцип регулювання і здійснюється пропорційно – диференціальний закон регулювання.

4. Дослідами встановлено, що ДС мод. УДС-1 в агрегаті з електричним генератором є аперіодичною ланкою другого порядку, рух якої описується лінійним диференціальним рівнянням 2-го порядку.

5. Для розрахунково – теоретичних досліджень статичних і динамічних властивостей САР ДС мод. УДС-1 розроблена нелінійна динамічна математична модель САР ДС мод. УДС-1 в агрегаті з електрогенератором і складені алгоритми та програми для виконання розрахунків на ЕОМ. У математичну модель входять одне диференціальне рівняння другого порядку і чотири диференціальних рівняння першого порядку, в ній враховані всі істотні і несуттєві нелінійності. Динамічні процеси в САР розраховувалися на ЕОМ шляхом чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта-Фельдберга.

Підтверджено адекватність математичної моделі.

6. Розрахунки за допомогою математичної моделі і натурні експерименти показали:

а) релейні регулятори забезпечують одержання астатичних характеристик частоти обертання ДС і температури нагрівача;

б) перехідні процеси за частотою обертання після миттєвого скидання – накиду навантаження відбуваються з одним закиданням частоти обертання, що свідчить про великий запас стійкості САРЧ;

в) на показники якості перехідних процесів після миттєвих скидання і накиду навантаження, в основному, впливає швидкість змінювання додаткового “мертвого” об’єму і запізнювання начала його зміни. Чим більше швидкість і менше запізнювання, тим менш закид частоти обертання і тривалість перехідного процесу;

г) введення в закон регулювання впливу по похідній сприяє підвищенню стійкості САР;

д) при швидкості змінювання додаткового “мертвого” об’єму не менше $100 \text{ см}^3/\text{с}$ і запізнювання не більше $0,1 \text{ с}$, в дослідній САР забезпечуються показники перехідних процесів відповідно до ГОСТ 13822-82 і ГОСТ 10511-83: закид частоти обертання не більше 10%, тривалість перехідного процесу регулювання не більше 5 с.

7. Проведені дослідження мають пошуковий характер. Результати їх використовуються в науково-дослідній роботі, а також у навчальному процесі в ТДАТА і НТУ і можуть бути використані при розробках вітчизняних Стірлінг - електричних агрегатів невеликої потужності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Постол Ю.А. Методика и результаты определения мгновенных интенсивностей нагрева и охлаждения газообразного рабочего тела в ДВПТ по его индикаторной диаграмме // Труды ТГАТА, т.5, вып.2. – Мелитополь, 1998. – С. 11-16.
2. Стефановский Б.С., Стефановский А.Б., Постол Ю.А., Снижко Е.В. Некоторые особенности нагрева и охлаждения рабочего тела в течение рабочего цикла ДВПТ модификации “гамма” // Труды ТГАТА, т.6, вып.2. – Мелитополь, 1998. – С. 10-13.
3. Постол Ю.А. Разработка системы автоматического управления миниатюрного электрического агрегата с приводом от двигателя Стирлинга // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Двигуни та енергоустановки; Зб. наук. пр. НАУ “ХАІ”. – Харків: “ХАІ”, 2001. – Вип.26. – С.267-268.
4. Долганов Кинт, Постол Юлия, Лисовал Анатолий. Определение условных механических потерь в двигателе Стирлинга модели УДС-1 // Materialy XII Sympozjum “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju systemow pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojedznych”. Politechnika Rzeszowska, Rzeszow 2001, – С.65-68.
5. Долганов К.Е., Лисовал А.А., Постол Ю.А. Исследование двигателя Стирлинга модели УДС-1 // Вісник НТУ “ХПІ”. Тематич. зб. наук. праць “ДВЗ”. Харків: НТУ “ХПІ”, 2001. - №1. – С. 99-108.
6. Долганов К.Е., Лисовал А.А., Краснокутская З.И., Постол Ю.А. Электрическая мини Стирлинг-электрическая установка // Двигателестроение. 2003, №3, с.31-34.
7. Долганов К.Є., Лісовал А.А., Постол Ю.О. Вдосконалення двигуна Стірлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. – К.: УТУ, 2001. - №11. – С.26-30.
8. Стефановский А.Б., Снижко Е.В., Постол Ю.А. Приближенное определение коэффициентов полезного действия малогабаритного двигателя Стирлинга типа “гамма” // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: Научный вестник – Челябинск: ЧВАИ, 2001. – Вып. 12. – С.77-81.
9. Стефановский А.Б., Постол Ю.А., Снижко Е.В. Обобщенные зависимости, характеризующие нагревание рабочего газа учебно-демонстрационного двигателя Стирлинга УДС-1 // Автомобильная техника: Науч. вест. / ЧВАИ. – Челябинск, 2002. Вып.14.– С.126 -131.
10. Долганов К.Є., Мержиєвська В.В., Постол Ю.О. Характеристики удосконалення двигуна Стірлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. – К.: НТУ; ТАУ, 2002. - №13. – С.13-18.

11. Долганов К.Е., Постол Ю.А. Характеристики миниатюрного двигателя Стирлинга модели УДС-1 // *Авіаційно-космічна техніка і технологія. Двигуни та енергоустановки*: Зб. наук. пр. / НАУ “ХАІ”. – Харків: “ХАІ”, 2002. – Вип.30. – С.28-30.
12. Долганов Кинт, Лисовал Анатолий, Постол Юлия, Краснокутская Зоя. Экспериментальная когенерационная Стирлинг – электрическая установка // *Materialy XIII Sympozjum “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju systemow pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych”*. Politechnika Rzeszowska, Rzeszow 2002, – С.47-50.
13. Долганов К.Є., Лісовал А.А., Мержиєвська В.В., Постол Ю.О. Регулювання потужності двигуна Стірлінга моделі УДС-1 // *Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів*: Зб. наук. пр. – К.: НТУ; ТАУ, 2003. – №16. – С.56-60.
14. Постол Ю.О. Перехідні процеси в САР дослідного міні Стірлінг – електричного агрегату // *Тези доповідей на 59-й науковій конференції НТУ*. – К.: НТУ, 2003. – С. 9.
15. Долганов К.Є., Постол Ю.О., Мержиєвська В.В. Дослідна система автоматичного регулювання для двигуна Стірлінга невеликої потужності // *Автошляховик України. Управління безпекою та якістю транспортних засобів і перевезень*: – 2003. – Окрем. вип. – С. 67-70.
16. Долганов Кинт, Лисовал Анатолий, Постол Юлия, Мержиевская Валентина. Релейный регулятор частоты вращения для экспериментальной Стирлинг-электрической установки // *Materialy XIV Sympozjum “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju systemow pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych”*. Politechnika Rzeszowska, Rzeszow 2003, – С.55-60.

АНОТАЦІЯ

Постол Ю.О. Розробка і дослідження двомірної системи автоматичного регулювання двигуна Стірлінга невеликої потужності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Теплові двигуни. – Національний транспортний університет, Київ, 2004

Дисертація присвячена розробці системи автоматичного регулювання двигуна Стірлінга невеликої потужності, призначеного для використання як первинний двигун у міні-Стірлінг-електричних агрегатах, і визначенню його раціональних параметрів. Показано, що в малопотужних ДС можна не регулювати подачу повітря в камеру згоряння, а обмежуватись автоматичним регулюванням максимальної температури стінки нагрівача і частоти обертання колінчатого вала ДС. Для цього розроблена двомірна незв'язана система автоматичного регулювання ДС, в яку входять дві самостійні системи: для регулювання температури нагрівача і частоти обертання ДС. В обох системах застосовані мікропроцесорні астатичні регулятори. У зв'язку з відсутністю на Україні повноцінних ДС, в якості регульованого об'єкта прийнята спрощена діюча модель цього двигуна під маркою УДС-1, до нього пасовою передачею приєднано електричний генератор постійного струму, що використовувався як гальмовий пристрій. Для регулювання потужності до робочого

циліндра ДС приєднано додатковий “мертвий” об’єм у вигляді циліндра з поршнем, на який діє регулятор частоти обертання. Для проведення розрахунково-теоретичних досліджень розроблена нелінійна динамічна модель, у яку входять диференціальне рівняння другого порядку і чотири диференціальних рівняння першого порядку. Система диференціальних рівнянь вирішувалась чисельним методом Рунге-Кутта-Фельдберга на ПЕОМ. Для експериментальних досліджень ДС був обладнаний приладами для вимірювання основних показників його роботи, у тому числі індиціювання тиску в робочому циліндрі і запису перехідних процесів на ПЕОМ. Підтверджено адекватність математичної моделі.

Дослідження показали, що якість перехідних процесів в експериментальній САР істотно залежать від двох параметрів: швидкості змінювання “мертвого” об’єму і запізнювання початку переміщення поршня в цьому об’ємі. Визначено раціональні значення цих параметрів: швидкість – не менше $100 \text{ см}^3/\text{з}$, запізнювання не більше $0,1 \text{ с}$. У цьому випадку закиди частоти обертання та тривалість перехідних процесів не перевищує припустимих значень – 10% і 5 с . У цілому досліджену САР можна рекомендувати як основу для розробки САР перспективних ДС невеликої потужності.

Ключові слова: двигун Стірлінга, система регулювання, дослідження, перехідний процес.

АННОТАЦИЯ

Постол Ю.А. Разработка и исследование двухмерной системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга небольшой мощности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Тепловые двигатели. – Национальный транспортный университет, Киев, 2004

Диссертация посвящена разработке системы автоматического регулирования (САР) двигателя Стирлинга (ДС) небольшой мощности, предназначенного для использования в качестве первичного двигателя в мини-Стирлинг–электрических агрегатах, и определению ее рациональных параметров. Показано, что в маломощных ДС можно не регулировать подачу воздуха в камеру сгорания и ограничиваться автоматическим регулированием максимальной температуры стенки нагревателя и частоты вращения коленчатого вала ДС. Для этого разработана двухмерная несвязанная система автоматического регулирования (САР) ДС, в которую входят две самостоятельные системы: для регулирования температуры нагревателя (САРТ) и частоты вращения ДС (САРЧ). В обеих системах применены микропроцессорные астатические регуляторы. В связи с отсутствием на Украине полноценных ДС, в качестве регулируемого объекта принята упрощенная действующая модель этого двигателя под маркой УДС-1, к нему ременной передачей присоединен электрический генератор постоянного тока, который использовался как тормозное устройство. Для регулирования мощности к рабочему цилиндру ДС присоединен дополнительный изменяемый “мертвый” объем в виде цилиндра с поршнем, на который действует регулятор частоты вращения. Для проведения расчетно-теоретических исследований разработана нелинейная

динамическая математическая модель, в которую входят дифференциальное уравнение второго порядка и четыре дифференциальных уравнения первого порядка. Система дифференциальных уравнений решалась численным методом Рунге-Кутты-Фельдберга на ПЭВМ. Для экспериментальных исследований ДС был оборудован приборами для измерения основных показателей его работы, в том числе индицирования давления в рабочем цилиндре и записи переходных процессов на ПЭВМ. Подтверждена адекватность математической модели.

Путем снятия серии индикаторных диаграмм подтверждено, что увеличение дополнительного “мертвого” объема приводит к уменьшению среднего индикаторного давления. Это значит, что изменением “мертвого” объема можно регулировать мощность ДС УДС-1.

Экспериментально определены внешняя и частичные скоростные характеристики двигателя, они являются функциями трех независимых параметров: частоты вращения, температуры рабочего тела в горячей полости двигателя и величины “мертвого” объема. Эти зависимости аппроксимированы полиномом второй степени с тремя аргументами.

Зависимости момента сопротивления электрогенератора от частоты вращения при постоянных значениях омического сопротивления нагрузочного реостата имеют параболический характер. Они описаны полиномом второй степени с двумя аргументами.

Индикаторные диаграммы снимались с помощью цифрового анализатора AVL Digital Analyzer 657 SAD-E/E с использованием кварцевого датчика давления QC32C.

Снятием последовательного ряда индикаторных диаграмм установлено, что САР двигателя УДС-1 достаточно быстро реагирует на ступенчатое изменение величины “мертвого” объема. САРТ обеспечивает поддержание заданной температуры стенки нагревателя с точностью ± 10 К, а САРЧ обеспечивает получение астатических скоростных характеристик.

Исследования показали, что качество переходных процессов в экспериментальной САР существенно зависит от двух параметров: скорости изменения “мертвого” объема и запаздывания начала перемещения поршня в этом объеме. Определены рациональные значения этих параметров: скорость – не менее $100 \text{ см}^3/\text{с}$, запаздывание не более 0,1 с. В этом случае забросы частоты вращения длительность переходных процессов не превышает допустимых значений – 10% и 5с. В целом исследованную САР можно рекомендовать как основу для разработки САР перспективных ДС небольшой мощности.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, система регулирования, исследования, переходные процессы.

ABSTRACT

Postol Y.A. Development and research of the two-dimensional automated control system of a low-power Stirling engine: Manuscript.

Thesis for obtaining a scientific degree of the candidate of technical science in a specialty of 05.05.03- Thermal Engines.- National Transport University, Kyiv, 2004.

The thesis is dedicated to developments and determination of reasonable parameters of the automated control system (ACS) of a low-power Stirling engine used as the prime mover in a miniature Stirling electrical power plant. It is shown that with low-power SE varying the combustion chamber air supply is not necessary, and automated control of maximum heater wall temperature and crankshaft rotation speed is sufficient. This is achieved by means of the developed decoupled ACS of SE consisting of two independent subsystems: a system of the heater temperature control (SHTC) and a system of the SE rotation speed control (SRSC). Both subsystems feature integrated-circuit and static governors. Due to absence of the true SE in Ukraine, a controlled object is used being a simplified working model of UDS-1 marquee of the SE, with its braking by a belted electrical DC generator. For varying the power, the SE work cylinder is connected with an additional dead space placed in a cylinder having the piston driven by the speed governor. For conducting a theoretical study, a non-linear dynamical model is developed including a second-order differential equation and four first-order differential equations. The system of differential equations is solved numerically by Runge-Kutta-Feldberg method by using a PC. For conducting an experimental study, the SE is equipped with devices for measurement of its main work parameters including work cylinder pressure monitoring and PC recording of transient processes. Validity of the mathematical model is confirmed.

Studies are shown that quality of the prototype ACS transient processes depends essentially on two parameters: dead volume change speed and retardation of the beginning of the corresponding piston motion. Reasonable values of these parameters are determined, with that of the speed being not lower than $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ and that of the retardation being not greater than 0.1 s . In this case, relative rotation speed excess and duration of the transient process do not exceed tolerable values – 10% and 5 s, respectively. In general the ACS studied can be recommended like a basis for development of ACS of low-power prospective SE.

Key words: Stirling engine, control system, research, transient process.

