

Українська державна академія залізничного транспорту

Богаєвський Олександр Борисович

УДК 629.424.3: 621.313.12

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗНИХ
ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРІВ**

05.22.07 - рухомий склад залізниць та тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту на кафедрі «Експлуатація і ремонт рухомого складу», Міністерство транспорту та зв'язку України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Тартаковський Едуард Давидович,
Українська державна академія залізничного транспорту, кафедра
«Експлуатація і ремонт рухомого складу», завідувач кафедри

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук
Басов Геннадій Григорович,
Східно – український національний університет ім. В.Даля МОН
України, м. Луганськ, кафедра «Залізничний транспорт»,
професор

доктор технічних наук, професор
Загарій Геннадій Іванович,
Українська державна академія залізничного транспорту, кафедра
«Спеціалізовані комп'ютерні системи», завідувач кафедри

доктор технічних наук
Рогачов Олександр Іванович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний
інститут» МОН України, кафедра «Автоматика і управління в
технічних системах», професор

Захист відбудеться : «25» листопада 2010 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої ради Д64.820.04 в Українській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий «_14_»__жовтня__2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.В. Прохорченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Питання підвищення енергозбереження тепловозних силових установок в умовах стрімкого зростання цін на дизельне паливо в Україні і інших країнах розглядається як одне з першорядних.

Середньо–оборотними дизель–генераторами потужністю від 600 кВт і вище оснащені на теперішній час тисячі магістральних, маневрових та промислових тепловозів. Загально відомо, що кожна потужна дизель–генераторна установка локомотива споживає за рік декілька сот тонн енергоносіїв, тобто весь парк споживає мільйони тонн дизельного палива за рік.

Сучасні потужні тепловозні дизель–генератори (ТДГ) експлуатуються в широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів та являють собою комплексну комбіновану структуру, до складу якої входять декілька різнорідних підсистем, що постійно взаємодіють між собою в процесі роботи. Найголовнішими в них являються підсистеми паливоподачі, подачі повітря та охолодження. При створенні такої комбінованої установки індивідуальні характеристики цих підсистем вдається погодити лише на одному режимі, частіше за все на номінальному. Якщо режим функціонування ТДГ відмінний від номінального, то узгодженість підсистем суттєво порушується, що призводить до погіршення економічних показників. Забезпечити узгодженість всіх характеристик підсистем потужної енергетичної установки тепловоза на різних режимах роботи можливо лише при застосуванні перспективних енергозберігаючих систем управління. При цьому, проблема забезпечення оптимальних режимів роботи повинна вирішуватися за допомогою найбільш простих і ефективних засобів впливу на поточні процеси в ТДГ.

На даний час однією з головних причин повільного впровадження сучасних енергозберігаючих систем управління режимами ТДГ є недосконалість (практична нерозвиненість) комп'ютерно–орієнтованих методів моделювання, що не дозволяє у певній мірі визначати оцінки і параметри забезпечення підвищення енергозбереження. Створення таких методів являє собою складну науково – технічну проблему, вирішення якої (навіть часткове) дозволить суттєво покращити стан з енергозбереженням, як на стадії досліджень, організації випробувань, так і в умовах рядової експлуатації сучасних систем управління режимами функціонування ТДГ. Викладене визначає актуальність теми досліджень даної дисертаційної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності:

- з комплексною програмою оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки;
- з програмами впровадження найбільш ефективних енергозберігаючих заходів з короткими строками окупності 2006 – 2007 років;

- з держбюджетною науково – дослідною роботою «Наукове обґрунтування нової електронно – керуючої системи регулювання дизель – генераторів дизель – поїздів та тепловозів» (державна реєстрація № 0198U005212);
- з госпдоговірними науково – дослідними та дослідно – конструкторськими роботами з Укрзалізницею, Південною залізницею, тепловозо – ремонтними заводами в Полтаві, Дніпропетровську, Ізюмі, холдинговою компанією «Луганськтепловоз», ДП «Завод ім. Малишева» в період з 1994 по 2010 роки.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розвиток методів моделювання технічних засобів енергозбереження систем управління для ТДГ.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити вплив існуючих технічних засобів систем управління режимами ТДГ на показники енергозбереження та визначити при цьому характерні режими роботи, вдосконалення яких дозволить підвищити паливну економічність;
- дослідити існуючі теоретичні методи, за якими здійснюється оцінка показників енергозбереження тепловозних дизель–генераторів у сучасних умовах експлуатації для визначення їх позитивних та негативних особливостей;
- для подальшої універсалізації теоретичних підходів до методів моделювання встановити спільність функціональних структур конструктивних рішень вдосконалення систем управління режимами роботи ТДГ;
- сформулювати критерій оптимальності паливної економічності, виходячи із умов роботи дизель–генератора на сталих режимах;
- розробити теоретичні методи для визначення регламентуючих параметрів, які дозволять забезпечити енергозберігаючу роботу ТДГ як в сталих, так і перехідних режимах;
- теоретично оцінити та практично реалізувати систему управління режимами і в процесі експлуатації на тепловозі підтвердити ефективність досліджень дисертаційної роботи;
- на підставі аналізу конструктивних рішень сучасних систем управління режимами ТДГ, які безпосередньо впливають на вихідні параметри (частота, потужність, витрата палива), сформулювати техніко–економічні та організаційні показники, яким повинно відповідати вдосконалення цих систем в умовах експлуатації

Об'єкт дослідження – процеси управління ТДГ в сталих і перехідних режимах роботи та засоби забезпечення підвищення їх енергозбереження.

Предмет дослідження – режими роботи ТДГ та їх вдосконалення на підставі розвитку методів моделювання і сучасних технічних засобів їх забезпечення.

Методи дослідження. В теоретичній частині дисертаційної роботи використовувались методи теорії оптимального управління, теорії автоматичного управління, математичний апарат аналізу робочих процесів

транспортних дизелів, методи комп'ютерного моделювання. В експериментальній частині використовувались методи натурних випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів.

В дисертації вирішено актуально науково – прикладну проблему створення моделей та методів формування ефективних енергозберігаючих режимів роботи ТДГ в умовах експлуатації.

Наукова новизна визначається такими положеннями:

Вперше:

- сформульовано критерій паливної ефективності, на підставі якого визначаються параметри управління сталими режимами роботи ТДГ, які на відміну від відомих критеріїв забезпечують мінімізацію витрат палива в межах робочої зони режимів ТДГ;
- створена адекватна математична структурна модель з системою управління сталими і перехідними режимами, в якій на відміну від існуючих моделей введено додатково моделі електричного механізму подачі палива, моделі навантаження ТДГ в режимах холостого ходу і робочих режимів, а також використано інтерполятор функціональних залежностей від частоти обертання і положення рейок паливних насосів. Така модель дозволяє в перехідних режимах у всій робочій зоні функціонування ТДГ, а не лише в області окремої точки, досліджувати будь-які нелінійні параметри робочих процесів, в тому числі і розрахункові, з урахуванням інерційних характеристик агрегатів ТДГ;
- розроблено методи визначення параметрів забезпечення енергозбереження в перехідних режимах розгону дизеля тепловозу як за вже відомими математичними моделями, так і за допомогою запропонованої нової моделі. Отримані на підставі розроблених методів параметри настроювання систем управління дозволяють покращити енергозбереження в перехідних режимах (до 17 %);
- одержані у відносній формі числові оцінки підвищення енергозбереження на відміну від існуючих аналогічних оцінок дозволяють ще на стадії проектування і впровадження енергозберігаючих систем визначити очікуваний результат енергозбереження в експлуатації. Так отримані числові оцінки дали змогу стверджувати, що впровадження перспективних систем управління дасть змогу покращити енергозбереження до 5 %.

Дістав подальший розвиток:

- класичний метод аналізу процесів у дизелях на основі сіткових моделей. Модифікований метод на відміну від класичного методу на основі використання процедур багатофакторних обчислень дозволяє визначити параметри економічної роботи тепловозного дизеля в сталих режимах в усьому робочому діапазоні. Модифікований метод з достатньою для інженерних досліджень точністю дозволяє отримувати масиви змінних величин з метою використання їх для досліджень на створеній комп'ютерній моделі. Використання розробленого методу значно скорочує витрати палива на експериментальне отримання необхідних масивів даних. На підставі загальності функціональних структур різних конструктивних

рішень систем управління режимами ТДГ обґрунтовано і показано універсальність застосування розробленого методу.

Доопрацьовано:

- існуючі системи управління режимами ТДГ та перспективні шляхи їх вдосконалення шляхом введення електричних (аналогових або дискретних) виконавчих механізмів подачі палива і гнучкого використання отриманих процедур, що забезпечують енергозбереження в процесі експлуатації;
- техніко–економічні і організаційні показники, відповідно до яких необхідно здійснювати вдосконалення в умовах експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів. В дисертаційній роботі сформульована та розширена група показників, відповідно до яких необхідно здійснювати вдосконалення управління режимами в умовах експлуатації. Ці показники використовувалися при виконанні НДДКР по створенню вітчизняних електронних регуляторів типу СУДМ–01 (система управління дизелем мікропроцесорна).

Показана універсальність розроблених методів дослідження для цілей подальшого удосконалення засобів управління режимами ТДГ, що ґрунтується на загальності функціональних структур сучасних і перспективних засобів забезпечення режимів. Створені методи теоретичного визначення параметрів управління подачею палива в сталих і перехідних режимах стали основою для істотного скорочення дорогих натурних експериментів і новою базою для алгоритмічного та програмного забезпечення електронних регуляторів.

Електронні регулятори СУДМ–01 пройшли повний цикл експлуатаційних і приймальних випробувань. Затверджені і зареєстровані в Держстандарті технічні умови ТУ У 33.1–24490245–001–2003 на електронні регулятори, підготовлено їх серійне виробництво.

На даний час електронні регулятори експлуатуються на більш ніж 70 тепловозах Південної і Придніпровської залізниць, а також в складі дизель – генераторів 588ДА дизеля потягу ДЕЛ–01 виробництва ХК «Луганськтепловоз».

Контрольні виміри по витраті палива на магістральному тепловозі 2ТЕ116 з електронним регулятором СУДМ–01 показали зниження витрати на 5%, що складає в рік на одну секцію тепловоза близько 20 тон дизельного палива в рік, що підтверджено матеріалами впровадження, які додаються до дисертаційної роботи:

- акт впровадження на державному підприємстві «Завод ім. В.А. Малишева»;
- акт впровадження на казенному підприємстві «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування»;
- акт впровадження на державному підприємстві СТГО «Південна залізниця»;
- акт впровадження на державному підприємстві ВАТ «Дніпропетровський тепловозоремонтний завод».

Особистий внесок здобувача. Всі отримані результати, які виносяться на захист, одержані автором самостійно і в основному викладені в роботах, опублікованих без співавторів. У спільних роботах здобувач:

- запропонував модель електричного виконавчого органу (актуатора) як елемента системи забезпечення подачі палива [16];
- запропонував алгоритм способу визначення частоти обертання для системи забезпечення частоти обертання транспортного дизеля [17];
- виклав основні переваги застосування сучасних підходів до забезпечення подачі палива в потужних транспортних силових установках [18];
- узагальнив результати випробувань електронного регулятора на вітчизняному тепловозному дизель – генераторі, що підтвердили його переваги [20];
- узагальнив результати ходових випробувань мікропроцесорної системи управління дизель – поїздом [21];
- запропонував підхід до модифікації класичного методу аналізу процесів в потужних тепловозних двигунах [22];
- розробив метод визначення законів управління в сталих режимах [23];
- визначив закон оптимального навантаження для тепловозного дизель – генератора [24];
- узагальнив результати розширених випробувань тепловозного дизеля, що проводяться відповідно до заводської методики [25];
- показав переваги електронних систем при забезпеченні перехідних режимів тепловозів [19];
- сформулював ідею та формулу винаходу [27];
- в стандарті розробив технічні вимоги до впроваджуваних систем забезпечення режимів тепловозів, а також розробив методики їх випробування під час виробництва [28];
- у посібнику навів приклад використання алгоритмічних і апаратних засобів для створення транспортної системи забезпечення режимів [29].

Всі публікації задовольняють вимогам ВАК України.

Апробація результатів дисертації. Дисертаційна робота в повному обсязі обговорювалася на засіданні вченої ради Інституту машин і систем НАН України та Мінпромполітики України, на засіданні науково – технічної ради ДП «Завод ім. Малишева», на засіданні кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно–дорожнього університету, на розширеному засіданні кафедри «Експлуатація і ремонт рухомого складу» (ЕРРС) Української державної академії залізничного транспорту і одержала позитивну оцінку. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи докладалися на: XI науково – технічній конференції з міжнародною участю «Транспорт, екологія – устойчивое развитие» (Болгарія, Варна, 2005); XV міжнародній науково – технічній конференції «Проблеми розвитку рельсового транспорту» (Україна, Крим, 2005); 69 – й міжнародній науково – технічній конференції «Подвижной состав

и безопасность движения на транспорте» (Україна, Харків, 2007); 3-й міжнародній науково-технічній конференції «Информационная техника и электромеханика» (Україна, Луганськ, 2005); VI Всероссийской научно – технической конференции «Политранспортные системы» (Новосибирск, 2009); 4-й міжнародній науково – технічній конференції «Перспективы развития автомобиле– и тракторостроения» (Україна, Харків, 2005); міжнародної науково-технічної конференції «Проблемы мехатроники в дальнейшем развитии транспортных средств и систем» (Україна, Харків, 2001); VIII, X, XI міжнародних науково-технічних конференціях «Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы» (Україна, Севастополь, 2005, 2007, 2008); X міжнародної науково-технічної конференції «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (Україна, Харків, 2002); міжнародних науково-технічних конференціях «Проблемы автоматизированного электропривода» (Україна, Алушта, 1997, 1998, 1999, 2000, 2005); X міжнародної науково-технічної конференції «Автоматика и управление в технических системах» (Україна, Харків, 2005); міжнародної науково – практичної конференції «Проблемы надежности машин и средств механизации сельскохозяйственного производства» (Україна, Харків, 2008); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ХНАДУ (1997–2008).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 29 наукових роботах, опублікованих в спеціалізованих виданнях переліку ВАК України і спеціалізованих виданнях зарубіжних країн.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний об'єм дисертації складає 295 сторінок, зокрема 86 рисунків на 63 сторінках, 46 таблиць на 34 сторінках. Список використаних джерел – 125 найменувань на 14 сторінках і додатків на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі стисло обґрунтовано актуальність та новизну теми дисертаційної роботи, подано загальну характеристику роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, наведено основні напрямки вирішення задач, викладено наукову новизну та практичну значимість роботи.

Перший розділ присвячено розгляду сталих і перехідних режимів і експлуатаційних характеристик тепловозних дизель – генераторних установок з точки зору резервів їх вдосконалення та аналітичному огляду особливостей конструкції систем забезпечення режимів тепловозних силових установок, що експлуатуються в теперішній час в Україні, а також аналітичному огляду існуючих методів визначення параметрів режимів, що забезпечують енергозбереження, та конструктивних підходів до удосконалення систем забезпечення режимів та системі показників для обґрунтування найбільш ефективного технічного рішення для потужних силових установок, що перебувають в умовах рядової експлуатації.

Значний вклад в вирішенні наукової проблеми підвищення показників енергозбереження тепловозного рухомого складу внесено в працях Басова Г.Г., Володіна А.І., Грунауера А.А., Долгих І.Д., Коссова Є.Є., Костроміна А.М., Кудряша А.П., Симпсона А.Е., Тартаковського Е.Д., Фофанова Г.А., Фурмана В.В., Шапрана В.В. та інших вчених.

Підвищення енергозбереження в умовах експлуатації можливо шляхом покращення паспортних показників самих дизелів, а також впровадження нових і удосконалення вже існуючих систем автоматичного регулювання, управління і діагностики. Для існуючих дизель – генераторів тягового рухомого складу однією з основних систем автоматичного управління є об'єднаний гідромеханічний регулятор частоти обертання та потужності, що здійснює управління швидкісними режимами, а також формує навантаження дизель – генератора на сталих та перехідних режимах. Тому дану систему правильніше було б назвати системою управління режимами або системою забезпечення режимів тепловозних ДГУ.

Сталі режими дизель – генератора характеризуються такими основними характеристиками як зовнішня характеристика, генераторна і сімейство трьохпараметрових універсальних характеристик дизеля. Найкращим з точки зору енергозбереження є випадок, коли реальна генераторна характеристика співпадає з оптимальною, що визначається з сімейства трьохпараметрових універсальних характеристик дизеля. Однак реальна генераторна характеристика існуючою системою забезпечення режимів формується таким чином, що завжди існує різниця між оптимальною і реальною характеристиками, що принципово не може бути усунена. Ця принципово не усунена різниця особливо на часткових режимах представляє серйозний резерв підвищення енергозбереження в тепловозних дизель – генераторах.

Наявність принципово не усуненої різниці між оптимальною і реальною генераторними характеристиками накладає свій відбиток на існуючі методи визначення параметрів, що забезпечують мінімум витрат пального в сталих режимах. Оскільки задача підвищення енергозбереження є оптимізаційною, то мінімізують як правило функцію, що має декілька складових зі своїми ваговими коефіцієнтами. Особливістю цих методів є те, що завжди необхідний великий масив даних експерименту або статистичних підборок з експлуатації. Існуючі методи найчастіше звертають увагу на обслуговування і ремонт, або дають рекомендації по веденню потяга, які машиністом можуть бути виконані не завжди. Тому ці методи в значній мірі залежать від людського фактору. Перехідні режими в існуючих методах враховуються поправочними коефіцієнтами. Зарубіжні джерела пропонують для визначення параметрів сталих режимів багатопоказникові матричні залежності, що отримані виключно експериментально.

Методи аналізу перехідних режимів розробляються на підставі методів теорії автоматичного управління дизелями. Однак найбільший розвиток останнім часом набули експериментальні дослідження перехідних режимів для тепловозних ДГУ (московська школа Коссова Є.Є., засоби дослідження

від колишнього СРСР). Наведені цифрові рекомендації по формуванню перехідних процесів без пояснення підстав їх вибору.

Технічно мають місце дві реалізації забезпечення перехідних режимів:

- на підставі значення тиску повітря і обмеження виходу на зовнішню характеристику;
- початкова затримка зростання частоти обертання і наступне швидке зростання навантаження після досягнення потрібної частоти.

Обидві реалізації забезпечують протікання перехідних процесів в сторону від оптимальної генераторної характеристики, а значить втрати енергоресурсів невідворотні. Особливу увагу з метою підвищення енергозбереження необхідно звернути на такий вид перехідних процесів як запуск двигуна.

Крім того необхідно відмітити, що існуючі методи дослідження перехідних процесів не дають можливості оцінити вплив на них конструктивних параметрів. Таку можливість надають методи аналізу сталих режимів.

В теперішній час удосконалення всіх систем дизельної силової установки передбачає використання елементів на основі сучасних електронних засобів. Сучасні конструктивні підходи до удосконалення систем забезпечення режимів дозволяють вирішувати як задачу підвищення економічних показників транспортних засобів, так і задачу підвищення екологічних показників.

Зарубіжні та вітчизняні публікації відзначають незаперечні переваги систем з електронним забезпеченням режимів в порівнянні з існуючими традиційними системами забезпечення.

Другий розділ присвячено аналізу та розробці теоретичних методів визначення параметрів забезпечення в сталих режимах.

Задача складна по причині широкої гами параметрів, які повинні бути відрегульовані до відповідних робочих станів транспортного дизель-генератора за допомогою сучасної системи управління.

В той же час, якщо до системи забезпечення подачі палива застосувати підхід як до багат шарової структуру, де кожний шар має різну фізичну природу, то з'являється можливість представити процес забезпечення як результат взаємодії процесів механічних переміщень та фізичних перетворень, процесів реєстрації, обробки і зберігання інформації, що об'єднуються відповідними електричними сигналами та ланцюгами.

На основі такої декомпозиції були синтезовані узагальнені функціональні структурні схеми контурів управління, які охоплюють усі сучасні системи управління подачею палива транспортних дизелів. Відповідний аналіз цих структурних схем дає підставу зробити висновки про майже повне співпадіння їх алгоритмічної частини.

Тому необхідно розробляти узагальнені методи визначення параметрів в різних режимах функціонування тепловозної силової установки, що покликані оптимізувати витрати палива незалежно від типу системи забезпечення режимів.

Узагальнений для витрат пального в сталих режимах критерій, що підлягає мінімізації, має вигляд

$$J_T = \sum_{j=1}^k C_j |U_j| \rightarrow \min, \quad (1)$$

де U_j – параметри забезпечення подачі палива;
 C_j – додатні вагові коефіцієнти.

З урахуванням того, що між витратами і параметрами забезпечення існує зв'язок виду $g(n, h)$, критерій паливної ефективності при роботі на конкретній частоті має наступний вигляд

$$G = \sum_{j=1}^k C_j \cdot g(h_j) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $g(h_j)$ – витрати палива при положенні рейки h_j .

З урахуванням того, що однією з характеристик якості робочого процесу є ефективна витрата пального $g_e(h_j)$, критерій має вигляд

$$G = \sum_{j=1}^k C_j \cdot g_e(h_j) \rightarrow \min. \quad (3)$$

З останнього виразу слідує, що критерій G завжди буде приймати мінімальні значення в тому разі, коли за допомогою параметру h_j забезпечувати мінімальне значення ефективних витрат палива на кожній частоті обертання. При цьому значення коефіцієнтів C_j не відіграють суттєвої ролі.

Між кількістю витрат палива, ефективним ККД і параметрами забезпечення існує зв'язок виду $g(n, h)$ і $\eta_e(n, h)$. Значенню максимуму $\eta_e(n, h)$ відповідає мінімальне значення $g_e(n, h)$, а також параметр $h_{opt}(n)$ або

$$\eta_{e \max}(n, h) = \eta_e(n, h_{opt}(n)) \quad (4)$$

Якщо значення $h_{opt}(n)$ знаходяться в зоні робочих режимів дизель-генератора, то залежність $h_{opt}(n)$ може бути обрано в якості характеристики забезпечення подачі палива в сталих режимах, а її реалізація завжди забезпечить мінімальне значення ефективних витрат $g_e(n, h)$.

Якщо екстремум функції $\eta_e(n, h)$ не потрапляє в зону робочих режимів дизель-генератора, то значення параметру необхідно обирати якомога ближчим до лінії обмеження по потужності (або іншому параметру). Тим самим буде забезпечуватись найбільше значення ефективного ККД в межах робочої зони дизель-генератора.

При математичному моделюванні вирішення задач оптимізації нерозривно пов'язано з реалізацією математичних моделей об'єкта, що досліджується. Одними з найбільш поширених при моделюванні нелінійних об'єктів є методи дискретизації математичної моделі шляхом просторового і (або) часового квантування. До таких методів належить метод сіток, який базується на заміні безперервної функції (або її похідних) її значеннями в окремих дискретних точках – вузлах сітки. Такий метод застосовується для вирішення складних багатовимірних і багатofакторних оптимальних задач.

Оскільки об'єктом є транспортний потужний дизель–генератор, то і при вирішенні задачі визначення оптимальних законів забезпечення режимів необхідно використовувати методи теплового розрахунку дизельних двигунів, серед яких основним є класичний метод «Гриневецького–Мазинга».

Класичний метод має недоліки, що не дозволяє використовувати його в відомому виді в якості основи для визначення ефективних параметрів забезпечення режимів:

- класичний метод є точковим методом, а для визначення параметрів управління подачею палива необхідно мати багатопараметрову об'ємну картину зміни показників транспортного дизеля при всіх положеннях рейки паливних насосів та частотах обертання колінчатого валу;
- не може бути обчислено класичним методом такий показник як максимальний тиск циклу P_z і ним необхідно задаватись. Хоча відомо, що він залежить від положень рейки паливних насосів та частоти обертання;
- в тепловому класичному методі не враховується вплив на показники кута випередження інжекції палива, практичне значення якого в теперішній час дуже значне.

Останній недолік класичного методу для сучасних дизель–генераторів не є визначальним, оскільки вони мають постійний геометричний кут випередження.

Так як одними з основних параметрів управління в сучасних підходах до удосконалення систем паливоподачі являються положення рейки h (в мм або %) і значення частоти обертання n , то весь класичний метод аналізу робочих процесів в роботі модифіковано так, щоб всі основні і проміжні результати є функціями положення рейки і частоти обертання.

Вирішення здійснено з використанням тривимірної сіткової моделі, причому в роботі моделі є наглядним графічним відображенням результатів теоретичних або експериментальних досліджень.

Першим кроком в модифікації класичного методу, аналізу робочих процесів є відображення в тривимірній матричній (сітковій) формі характеристики паливних насосів $g=f(n,h)$. Цей крок перетворює точковий метод в просторовий.

Другим кроком в модифікації класичного методу є визначення в тривимірній матричній (сітковій) формі залежності коефіцієнту надлишку повітря α від положення рейки h і частоти обертання n – $\alpha(n,h)$. Підхід до реалізації даного кроку залежить від типу наддуву повітря.

Подальший аналіз з використанням модифікованого класичного методу здійснюється в матричній тривимірній формі в залежності лише від параметрів n та h , що було в роботі зроблено вперше.

Для теоретичного визначення параметрів забезпечення сталих режимів на основі запропонованого модифікованого методу, необхідно ряд вихідних даних, а саме:

- тип дизеля, його тактність, кількість циліндрів;
- тип повітряного компресору–привідний або вільний з газовим зв'язком;

- довідникові або експериментальні дані про продуктивність паливних насосів, характеристики агрегатів повітропостачання дизеля;
- конструкційні параметри – ступінь стискання, номінальна потужність, діапазон робочих частот обертання, максимальний тиск згорання P_z .

В роботі розглянуто визначення параметрів забезпечення режимів для концептуальних, в конструктивному відношенні, транспортних дизель-генераторних установок – 588ДА і 4Д80Б. Це установки вітчизняного виробництва, що застосовуються на залізничному транспорті.

В дизель-генераторі типу 588ДА застосовано 6-циліндровий 2-тактний дизель з привідним компресором, номінальна потужність 588 кВт на частоті обертання 2200 хв^{-1} . В дизель-генераторі типу 4Д80Б застосовано 12-циліндровий 4-тактний двигун з вільним турбокомпресором, номінальна потужність 1000 кВт на частоті обертання 750 хв^{-1} .

Порядок визначення параметрів забезпечення паливоподачі на основі модифікованого метода здійснюється наступним чином.

Визначається залежність $[g=f(n,h)]$ – з довідника або експериментально, графічно вона представлена на рис. 1.

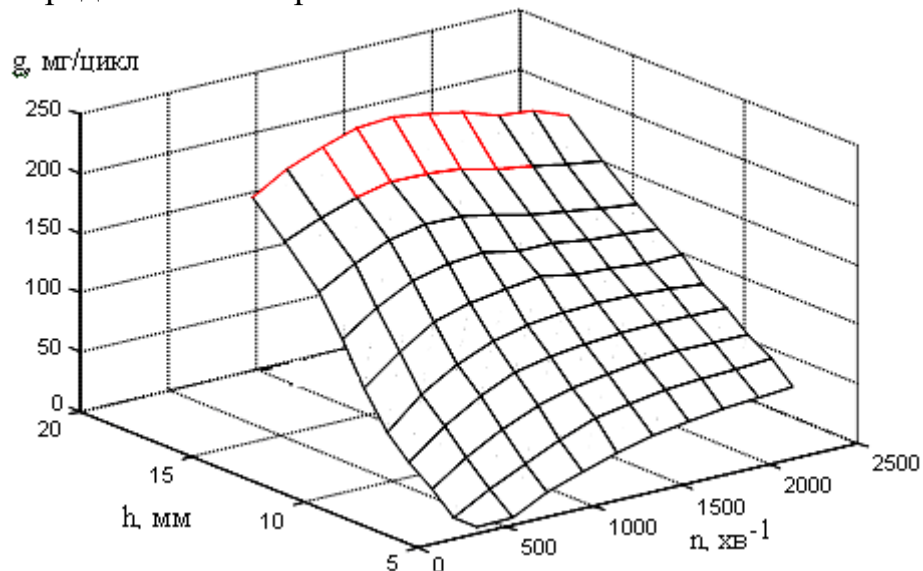


Рис. 1. Характеристики паливних насосів

По відомим формулам в матричній формі визначаємо такі характеристики постачання повітря привідного компресора як температура повітря в вихідному патрубку компресора $[T_k(n)]$, тиск в вихідному патрубку компресора $[p_k(n)]$ і густина повітря $[\rho_s(n)]$ перед впускними органами.

Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha(n,h)$ визначається матричною залежністю:

$$[\alpha(n,h)] = \left[\frac{V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_s(n)}{L_0 \cdot g_u(n,h) \cdot k_n} \right], \quad (5)$$

де $L_0 = 14,3$;

k_n – коефіцієнт зменшення подачі палива із-за протитиску;

η_v – середній коефіцієнт наповнення циліндра;

V_h – об'єм циліндра;

$\rho_s(n)$ – густина повітря перед впускними органами двигуна.

Залежність $[\alpha(n, h)]$ графічно наведена на рис. 2.

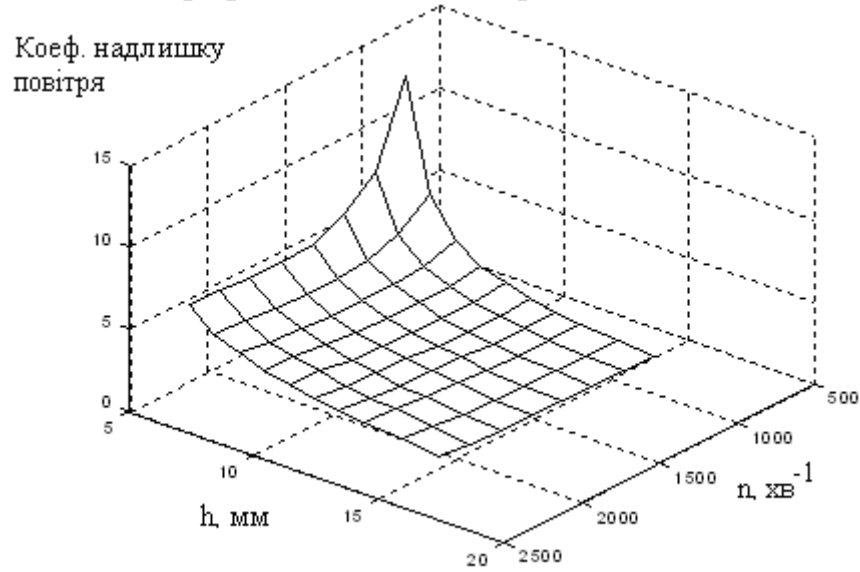


Рис. 2. Залежність коефіцієнта надлишку повітря від частоти обертання та положення рейки паливного насоса

Модифіковані математичні вирази для аналізу робочих процесів дизель-генератора 588ДА набули вигляду:

• **параметри робочого тіла**

Кількість свіжого заряду повітря на 1 кг палива

$$[M_1(n, h)] = [\alpha(n, h) \cdot L_0]. \quad (6)$$

Кількість продуктів згорання 1 кг палива при відомому $\alpha(n, h)$

$$[M_2(n, h)] = [M_0 + (\alpha(n, h) - 1) \cdot L_0]. \quad (7)$$

Коефіцієнт молекулярної зміни горючої суміші

$$[g(n, h)] = \left[\frac{M_2(n, h)}{M_1(n, h)} \right]. \quad (8)$$

• **параметри процесу газообміну**

Показник адиабати стискання $[k_1(n, h)]$ і температуру в кінці стискання $[t_c(n, h)]$ визначаються з системи рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[q_1(n, h)(U_c - U_a) + q_2(n, h)(U_{oc} - U_{oa}) - 1.985 \frac{t_c(n, h) - t_a(n)}{k_1(n, h) - 1} \right] = 0, \\ & [t_c(n, h)] = [T_a(n) \varepsilon^{k_1(n, h) - 1} - 273] \end{aligned} \right. \quad (9)$$

де $t_a(n)$ – температура на початку стискання;

U и U_0 – внутрішня енергія газів, довідкові дані;

ε – ступінь стискання (конструктивний параметр, рівний 15).

$[q_1(n, h)]$ и $[q_2(n, h)]$ визначаються з врахуванням параметрів робочого тіла і коефіцієнта залишкових газів.

Тиск в циліндрі в кінці стискання

$$[p_c(n, h)] = [p_a(n) \cdot \varepsilon^{k_1(n, h)}]. \quad (10)$$

Ступінь підвищення тиску

$$[\lambda(n, h)] = \left[\frac{p_z(n, h)}{p_c(n, h)} \right], \quad (11)$$

де $p_z(n, h)$ – тиск згорання.

Температуру кінця згорання $[t_z(n, h)]$ визначаємо з рівняння

$$\left[\frac{\xi \cdot H_n}{(1 + \nu) \cdot \alpha(n, h) \cdot M_0} \right] = \left[\mu_0(n, h) \cdot mc_{pm(z)}(n, h) \cdot t_z(n, h) - \right. \\ \left. - (mc_{vm(c)}(n, h) + 1.98 \cdot \lambda(n, h)) \cdot t_c(n, h) + 542(\mu_0(n, h) - \lambda(n, h)) \right], \quad (12)$$

де ξ – коефіцієнт ефективного виділення тепла, 0,76;

$mc_{vm(c)}(n, h)$ – молярна теплоємність повітря;

$mc_{pm(z)}(n, h)$ – молярна теплоємність газів.

Тиск в кінці розширення

$$[p_e(n, h)] = \left[\frac{p_z(n, h)}{\delta(n, h)^{n_2(n, h)}} \right]. \quad (13)$$

Індикаторний тиск $[p_i(n, h)]$

$$[p_i(n, h)] = \left[\frac{\beta \cdot p_c(n, h)}{\varepsilon - 1} \cdot \left[\frac{\lambda(n, h) \cdot (\rho(n, h) - 1) + \frac{\lambda(n, h) \cdot \rho(n, h)}{n_2(n, h) - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2(n, h) - 1}}\right) -}{-\frac{1}{k_1(n, h) - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k_1(n, h) - 1}}\right)} \right] \right], \quad (14)$$

де β – коефіцієнт, рівний 0,7975.

Індикаторний ККД $[\eta_i(n, h)]$

$$[\eta_i(n, h)] = \left[1.985 \frac{M_1(n, h) \cdot p_i(n, h) \cdot T_k(n, h)}{H_H \cdot \eta_V \cdot p_k(n)} \right]. \quad (15)$$

Тиск механічних втрат

$$[p_m(n)] = \left[p_{mn} \cdot \left(\frac{n}{n_{\max}} \right)^a \cdot \left(\frac{\pi_k}{\pi_{kH}} \right)^b \right], \quad (16)$$

де $p_{mn} = 1,2343$ кг/см² – емпіричне значення,

$a = 1,35$, $\pi_{kH} = 2,35$, $b = 0,1$.

Ступінь попереднього розширення

$$[\rho(n, h)] = \left[\frac{\mu_0(n, h) \cdot (t_z(n, h) + 273)}{\lambda(n, h) \cdot (t_c(n, h) + 273)} \right]. \quad (17)$$

Ступінь подальшого розширення

$$[\delta(n, h)] = \left[\frac{\varepsilon}{\rho(n, h)} \right]. \quad (18)$$

Показник політропи розширення $[n_2(n, h)]$ і температура в кінці розширення $[t_b(n, h)]$ визначається з системи рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{H_n \cdot (1 - \xi - w)}{\alpha(n, h) \cdot M_0(1 + \nu) \cdot \mu} \right] = \left[\begin{array}{l} mc_{vm(\varepsilon)}(n, h) - mc_{vm(z)}(n, h) + \\ + \frac{1,985 \cdot T_z(n, h)}{n_2(n, h) - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta(n, h)^{n_2 - 1}} \right) \end{array} \right], \\ [t_b(n, h)] = \left[\frac{T_z(n, h)}{\delta(n, h)^{n_2 - 1}} - 273^\circ \right] \end{array} \right. \quad (19)$$

де w – відносні втрати теплоти (прийняте 0,16);

$mc_{vm(\varepsilon)}(n, h)$, $mc_{vm(z)}(n, h)$ – мольні теплоємності газів в кінці і на початку розширення відповідно.

Механічний ККД $[\eta_m(n, h)]$

$$[\eta_m(n, h)] = \left[1 - \frac{p_m(n)}{p_i(n, h)} \right]. \quad (20)$$

Ефективний ККД дизель-агрегату $[\eta_e(n, h)]$

$$[\eta_e(n, h)] = [\eta_i(n, h) \cdot \eta_m(n, h)]. \quad (21)$$

Питома ефективна витрата палива $[g_e(n, h)]$

$$[g_e(n, h)] = \left[\frac{632}{H_H \cdot \eta_e(n, h)} \right] \quad (22)$$

Графічний приклад залежності ефективного ККД $\eta_e(n, h)$ для дизель-генератора типу 588ДА наведено на рис. 3.

Числове дослідження матричних залежностей ефективного ККД $[\eta_e(n, h)]$ для різних тепловозних двигунів дозволило встановити, що ці залежності мають екстремум – максимум по положенню рейок паливних насосів на кожній частоті обертання, а максимуму ефективного ККД $[\eta_e(n, h)]$ відповідає мінімальне значення ефективних витрат пального $[g_e(n, h)]$. Значення положення рейки, що відповідає мінімальному значенню $g_e(n, h)$ і є тим самим оптимальним параметром h_{opt} , що покликаний мінімізувати узагальнений критерій ефективності витрат пального в сталих режимах і який не залежить від людського фактору.

Запропонований в роботі метод сіткових моделей є дієвим засобом для отримання числових значень параметрів забезпечення режимів і параметрів обмежень, таких як температура відпрацьованих газів перед турбіною, допустиме навантаження генератора, тиск повітря наддуву, температура охолоджувальної рідини і т.д. Вказані параметричні залежності також можуть бути отримані і в графічній формі. Так наприклад, для аналітичного визначення максимально допустимого положення рейок паливних насосів в сталих режимах з метою забезпечення необхідного значення коефіцієнту надлишку повітря необхідно розв'язати матричне рівняння виду

$$[\alpha(n, h)] = 1.4 (\text{const}), \quad (23)$$

де значення 1.4 відповідає границі димлення.

На рис. 4 показано взаємне розташування теоретичної характеристики $h_{opt}(n)$ і зони оптимального управління паливоподачею, яка була отримана експериментальним шляхом на моторному стенді підприємства-виробника дизеля.

Аналогічний теоретичний підхід до визначення оптимальних і обмежувальних параметрів сталих режимів було використано для дизель-генератора типа 4Д80Б з вільним турбокомпресором. Особливість полягає в тому, що окрім характеристик паливних насосів необхідно враховувати вплив турбокомпресора з газовим зв'язком у всьому просторі можливих сполучень частоти обертання і положень рейок паливних насосів.

При обчисленнях теплових режимів, автор використав програму, що розроблена в Українській державній академії залізничного транспорту (УкрДАЗТ) проф. Єронценковим С. А. та доц. Круshedольським О. Г., в якій враховані вказані вище особливості повітряного забезпечення. Також програма враховує останні досягнення в теорії розрахунків потужних дизелів для транспорту. На основі розрахунків з використанням сіткових моделей отримано деякі параметричні залежності, взаємне розташування яких показано на рис. 5.

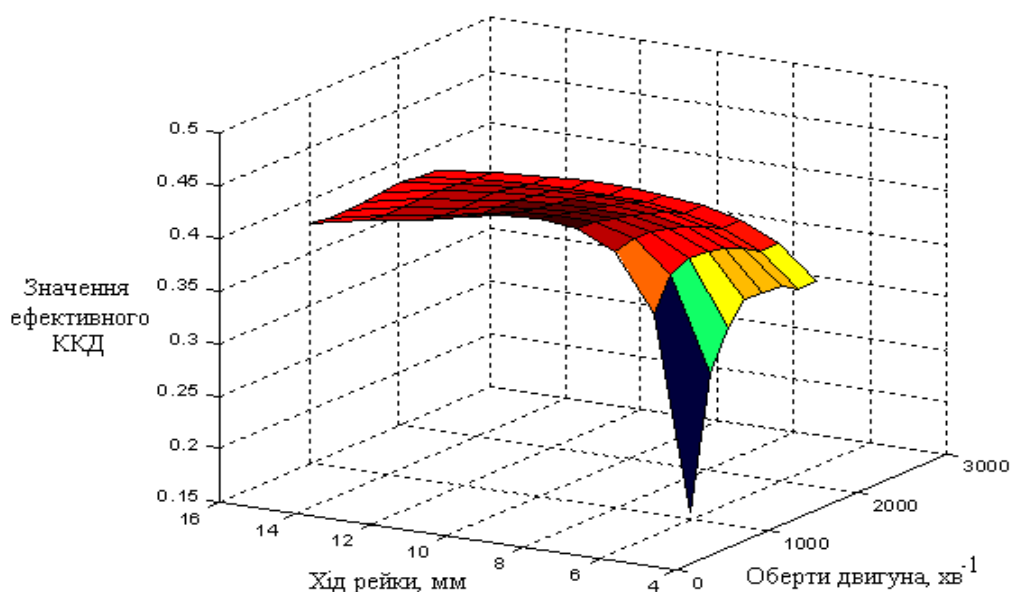


Рис. 3. Залежність ефективного ККД від частоти обертання та положення рейки паливного насоса

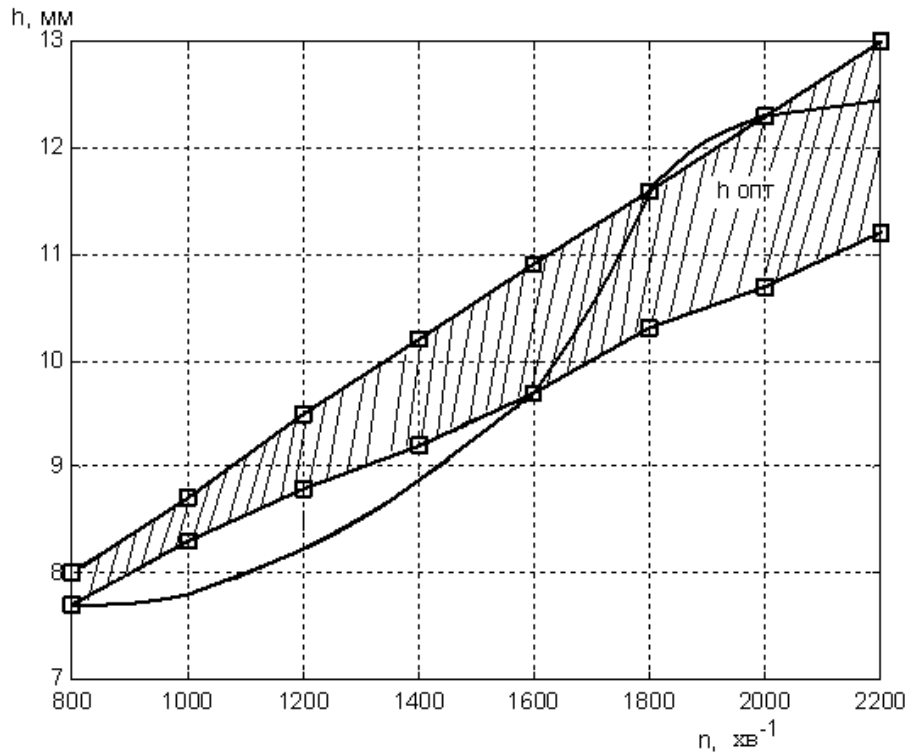


Рис. 4. Взаємне розташування оптимальних розрахункових параметрів навантаження та експериментально отриманої зони (заштрихована зона)

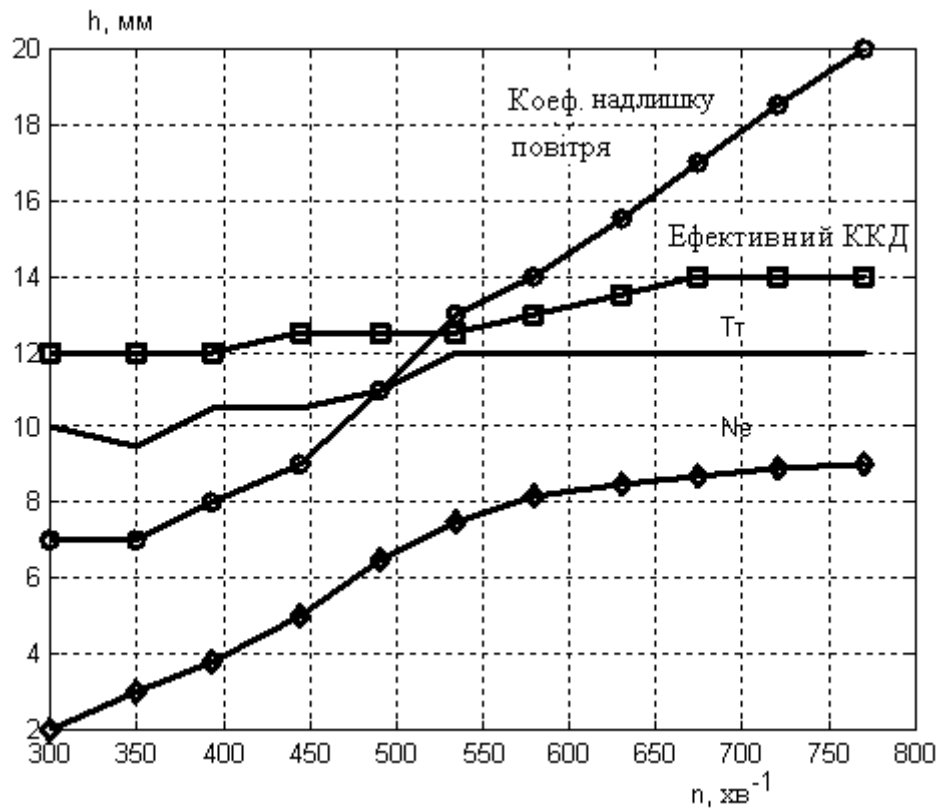


Рис. 5. Взаємне розташування розрахункових залежностей паливоподачі по α , η_e , T_T та реалізованої в експлуатації по N_e для дизель-генератора типу 4Д80Б

На рис. 5 наведені обмежувальні параметричні лінії по коефіцієнту надлишку повітря α , температурі відпрацьованих газів перед турбіною T_t , лінія оптимального ефективного ККД η_e , а також експериментальна лінія ефективної потужності N_e , на якій працює даний двигун в реальній експлуатації.

На підставі співвідношення різних залежностей зроблено висновок, що дизель–генератор використовується не найкращим чином с точки зору ефективних витрат пального.

Порівняння теоретичних результатів, отриманих з допомогою методу сіткових моделей для двох типів тепловозних дизель – агрегатів, з експериментальними даними для цих же установок показало, що мають місце розбіжності. Причому, в області частот обертання близьких до номінальної розбіжності не перевищують 5 %, а в області частот обертання, що складають 30 – 50 % від номінального значення (так звані часткові режими), розбіжності сягають 10 – 12 %.

Причинами вказаних розбіжностей можуть бути:

- неповна відповідність виразів і моделей класичного методу вказаному діапазону часткових режимів;
- втрата інформації у вхідних даних за рахунок їх дискретизації, що мала місце при модифікації класичного методу аналізу.

Крім того, у випадку агрегату з вільним турбокомпресором розрахунок провадився за умови найгіршого допустимого ККД турбіни.

Дослідження впливу методу сіткових моделей на результати розрахунків встановило, що різні оцінки відносних величин похибок при фіксованих значеннях n і h , а саме дисперсія – D_{h23} і D_{n23} , середньоквадратичні значення σ_{h23} і σ_{n23} , відносна дисперсія, відносні середньоквадратичні значення, середні значення по модулю відхилень m_{h23} і m_{n23} знаходяться в межах частки процента. Результати розрахунків зведено в таблицю 1.

Таким чином, запропонований метод сіткових моделей практично не вносить похибки в сам процес визначення необхідних параметрів в сталих режимах і тому є достатньо ефективним теоретичним засобом для отримання великої кількості даних про поведінку різних параметрів тепловозного силового агрегату в сталих режимах, на основі яких можливо визначати як оптимальні, так і обмежуючі параметричні залежності.

Третій розділ присвячено розробці теоретичних методів визначення параметрів підвищення енергозбереження в перехідних режимах як на основі існуючих математичних моделей, так і на основі комп'ютерного структурного моделювання. Причому параметри визначаються з метою примусового формування перехідних режимів для підвищення ефективності використання палива.

Визначення параметрів забезпечення перехідних режимів повинно здійснюватись з урахуванням значень коефіцієнту надлишку повітря $\alpha(n, h)$.

Оцінки відносних величин погрешностей

Тип дизеля	n , хв. ⁻¹	h , мм	D_{23}	D_{23} від	σ_{23} від, %	m_{23} від, %
6ДН	1200	var	0,192	$6,38 \cdot 10^{-6}$	0,25	0,192
	1400	var	0,226	$9,3 \cdot 10^{-6}$	0,3	0,236
	1600	var	0,1192	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,209	0,158
	var	9,5	0,0714	$6,5 \cdot 10^{-6}$	0,255	0,184
	var	10,5	0,137	$7,9 \cdot 10^{-6}$	0,281	0,214
	var	11,5	0,131	$5,5 \cdot 10^{-6}$	0,236	0,158
4Д80Б	394	var	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	0,614	0,248
	490	var	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,213	0,121
	630	var	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,346	0,233
	var	5	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,179	0,112
	var	6	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	0,294	0,147
	var	8	$4,25 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-6}$	0,304	0,199

Різке зниження коефіцієнту надлишку повітря α в перехідному процесі пояснюється тим, що при збільшенні частоти обертання і навантаження, темп зростання тиску подачі повітря значно відстає від темпу зростання подачі палива через суттєві інерційності ротора турбокомпресора. Тому умови роботи потужного транспортного дизель–генератора потребують відповідного формування перехідних процесів, спрямованого на досягнення прийнятної швидкодії при мінімумі витрат палива. Такий підхід спрямований також на нівелювання людського фактору при управлінні транспортним засобом.

Практично, формування перехідних процесів здійснюється шляхом лінійної зміни в часі (темп зміни) відповідної величини на вході системи або обмеженням кількості палива за допомогою різноманітних коректорів.

Запропоновані в роботі методи передбачають для визначення параметрів формування перехідних режимів:

- використання вже відомих математичних моделей дизель–генераторних установок з традиційними гідромеханічними регуляторами;
- застосування розробленої автором комп'ютерної моделі, в якій передбачено використання результатів сіткового моделювання сталих режимів.

Відомі математичні моделі тепловозних дизель – генераторів представляють собою систему рівнянь, одним з головних компонентів якої є модель гідромеханічного всережимного регулятора що складається з низки рівнянь, які враховують вплив значної кількості механічних деталей, з яких власне складається регулятор як елемент системи.

В роботі автор для аналізу перехідних процесів в тепловозному дизель – генераторі типу 4Д80Б використав математичні моделі і програми, що наведені в роботах Крушедольського О. Г. (УкрДАЗТ). На основі цих моделей з гідромеханічним регулятором в роботі запропоновано графічний метод

визначення параметрів формування оптимальних перехідних процесів, суть якого представлена на рис. 6. На цьому рисунку показані теоретично отримані графіки перехідних процесів коефіцієнта α , частоти n і положення рейки h , причому два останні представлені в процентах. Перехідні процеси на рис. 6 відповідають стрибкоподібній зміні частоти обертання від 300 хв^{-1} до 750 хв^{-1} без навантаження, час протікання перехідного режиму складає 2 с . Визначення параметрів забезпечення здійснюється виходячи з обмеження величини α значенням $1,4$, тобто граничним значенням бездимної роботи.

Графічним методом нескладно визначити необхідний темп зростання заданої величини.

З рис. 6 слідує, що значенню $\alpha=1,4$ відповідає відносне значення $n \% = 0,5$, що в абсолютних одиницях відповідає частоті обертання 375 хв^{-1} . Відповідно величина стрибка завдання частоти обертання не може перевищити 75 хв^{-1} в разі, якщо двигун працює без навантаження. Враховуючи, що тривалість перехідного процесу 2 с , максимальний темп зміни частоти обертання не повинен перевищувати значення $37,5 \text{ хв}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ для машини, що працює без навантаження. Для машини з навантаженням це значення темпу зміни частоти обертання буде зменшуватись

Запропонований підхід має обмежене використання, оскільки для кожного типу двигуна повинна бути своя, доволі складна, адекватна математична модель і її створення займає значний час і потребує значних коштів, а для підтвердження адекватності необхідно мати значну кількість експериментального матеріалу.

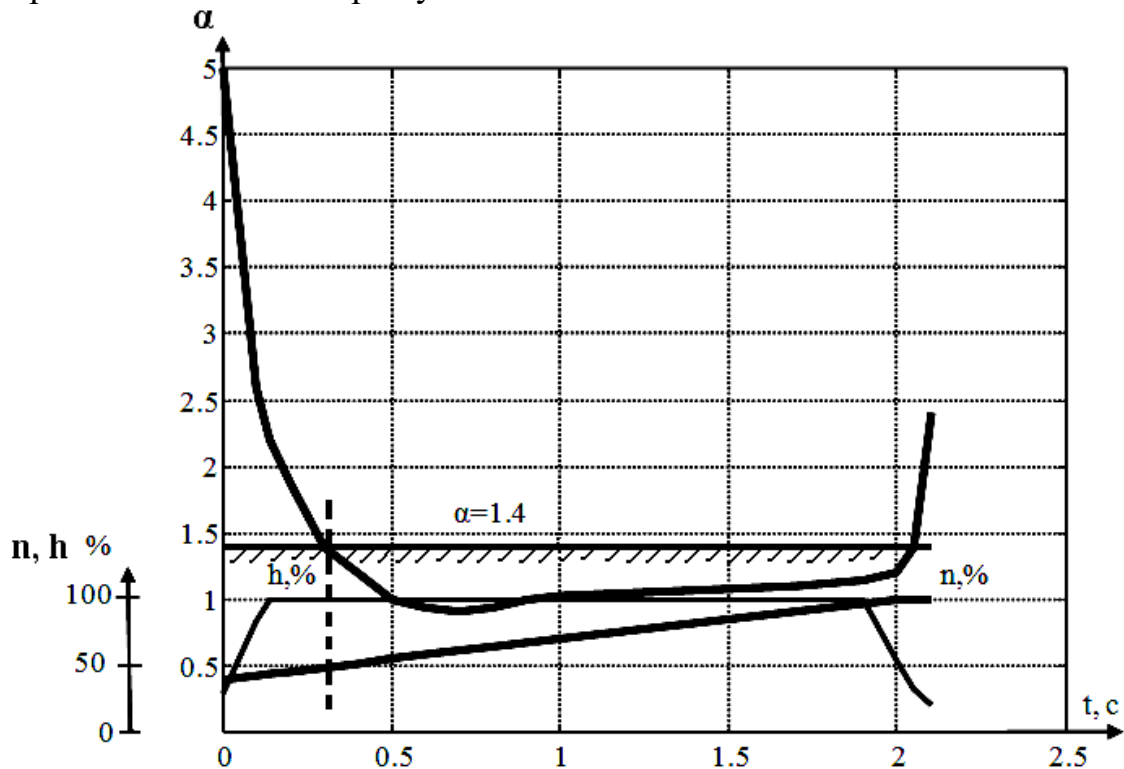


Рис. 6. Графіки визначення параметрів темпу зміни частоти обертання

Метод сіткових моделей дозволяє отримати матричні залежності від частоти обертання та положення рейки різних параметрів, в тому числі і нелінійних, таких як коефіцієнт надлишку повітря $\alpha(n, h)$. При створенні математичних моделей нелінійних елементів систем домінує принцип лінеаризації поблизу окремої точки. За допомогою методу сіткових моделей визначена робоча область коефіцієнта $\alpha(n, h)$, яка знаходиться в межах від значення 1,4 (для роботи під максимальним навантаженням) до значення 3,0..3,5 (для холостого ходу). Аналіз нелінійності коефіцієнту $\alpha(n, h)$ в робочій області встановив що цей показник змінюється в залежності від значень частоти та положення рейки, його максимальне значення сягає величини 15...20 %, показник зменшується зі збільшенням частоти обертання дизеля. Тобто в робочій області можна вести мову про лінеаризацію не лише поблизу окремої точки, а і у всій робочій області з вказаною вірогідністю.

Нелінійність для інших систем треба досліджувати окремо, а тому в роботі запропоновано метод визначення параметрів забезпечення перехідних режимів за допомогою комп'ютерної моделі, в основу розробки якої покладені наступні передумови:

- математична модель повинна бути максимально простою, так як в ній відстежується зв'язок між частотою обертання n і положенням рейки паливних насосів h в залежності від ступеня навантаження і характеру зміни параметра n .
- модель створюється за наявності значної кількості осцилограм динамічних процесів, які отримані в результаті натурного експерименту;
- для визначення поведінки в перехідному режимі необхідного параметру, наприклад коефіцієнту надлишку повітря α , необхідно користуватись його матричною залежністю $[\alpha(n, h)]$, що отримана за допомогою методу сіткових моделей.

Такий підхід є можливим, так як доведена достатня точність результатів, отриманих методом сіткових моделей для сталих режимів.

Комп'ютерна модель повинна повторювати поведінку установки в фізичному експерименті.

Проведено ідентифікацію системи управління транспортним дизель–генератором, що наведена на рис. 7.

Вихідне рівняння руху дизель–генератора, після перетворення, має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{J_{дГ} \cdot \omega_H}{n_H} \cdot \frac{dn}{dt} &= \frac{M_{\partial H} \cdot (h - h_{xx})}{h_H} - M_{нагр}, \\ T_a \cdot \frac{dn}{dt} &= \frac{n_H}{h_H} \cdot [h - h_{xx} - h_{нагр}], \quad T_a = \frac{J_{дГ} \cdot \omega_H}{M_{\partial H}}, \\ h_{НАГР} &= \frac{M_{нагр}}{M_{\partial H}} \cdot h_H, \end{aligned} \quad (24)$$

де ω_H – номінальна кутова частота обертання;

$M_{дн}$ – номінальний рухомий момент дизеля ($M_{дн} = \left(\frac{\partial M_{д}}{\partial h} \right) \cdot h_{н}$);

$h_{н}$, $h_{хх}$ – положення рейок паливних насосів номінальне і холостого ходу;

n , $n_{н}$ – поточна і номінальна частоти обертання ТДГ.

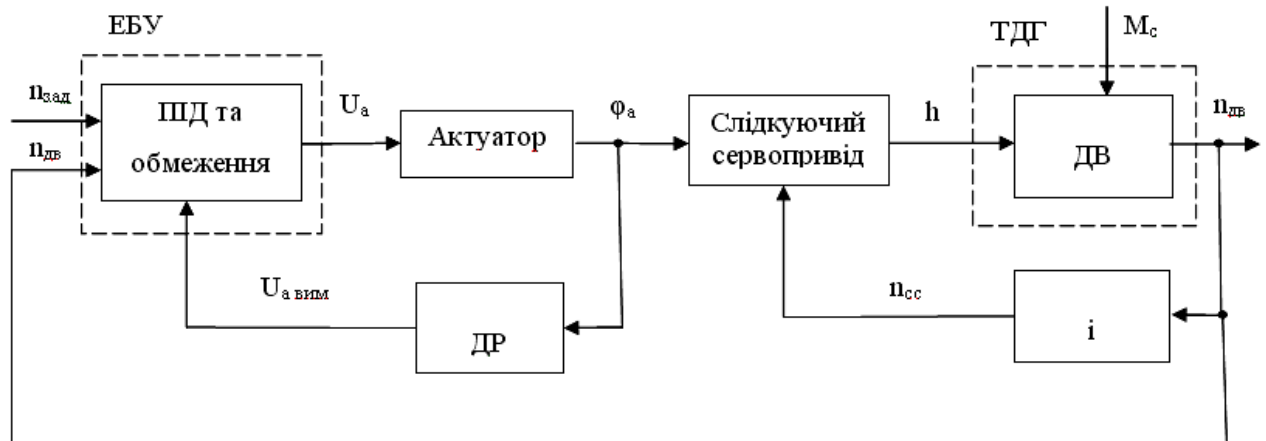


Рис. 7. Структурна схема системи автоматичного управління дизель-генератора (САУДГ)

ДВ – двигун, як об'єкт регулювання; *ЕБУ* – електронний блок управління;

ДР – датчик положення кута повороту актуатора φ_a ;

i – блок передачі між двигуном та слідкуючим сервоприводом (редуктор);

$n_{дв}$ – частота обертання двигуна; $n_{зад}$ – задана частота обертання двигуна;

U_a – сигнал управління актуатором; $U_{a\text{ вим}}$ – сигнал зворотного зв'язку по куту φ_a ;

φ_a – кут повороту вала актуатора; $n_{сс}$ – частота обертання слідкуючого сервопривода;

h – положення рейки паливних насосів двигуна;

M_c – навантаження на двигун.

Для визначення $M_{нагр}$ (або $h_{нагр}$), а також $h_{хх}$ знімались осцилограми найбільш характерних експлуатаційних режимів на фізичній моделі:

- процеси розгону і гальмування на холостому ходу при зміні завдань частоти;
- скидання і накидання навантаження в різних частотних режимах.

Отримані адекватні моделі навантаженні дизель-генератора в режимі холостого ходу, так і для режиму навантаження, похибка моделі навантаження не перевищує 5%.

Для визначення структури і параметрів математичної моделі актуатора, на комплексному моделюючому стенді були досягненні наступні динамічні процеси:

- перехідні процеси зміни сили струму і повороту вала актуатора при ступінчатій зміні напруги, що подавалась на обмотку управління;

- частотні характеристики зміни сили струму і повороту вала актуатора при подачі на обмотку управління напруги, що змінюється за синусоїдальним законом в діапазоні частот 2 – 10 гц.

На підставі отриманих даних, визначені електрична T_{ε} та електромагнітна $T_{\varepsilon M}$ постійні часу актуатора, а рівняння для двох послідовно з'єднаних аперіодичних ланок мають вигляд

$$T_{\varepsilon} \frac{dI}{dt} + I = U_y, \quad T_{\varepsilon M} \frac{d\varphi}{dt} + \varphi_a = I, \quad (25)$$

де I, φ_a – внутрішні змінні стану.

Обробка результатів осцилографування перехідних процесів переміщення штоку гідропідсилювача дозволила зробити висновок, що в об'єднаному елементі «гідропідсилювач–актуатор» визначальними характеристиками є характеристики гідропідсилювача.

Рівняння, що описує рух штока гідро підсилювача – сервомотора, має вигляд

$$T_c \frac{dh}{dt} + h = k \cdot \varphi_a = S_{\text{нл}}, \quad (26)$$

де T_c – постійна часу інерційної ланки;

h – переміщення штоку;

$S_{\text{нл}}$ – переміщення плунжера;

k – коефіцієнт підсилення.

Дослідження натурних осцилограм накидання і скидання навантаження показало, що система управління в розумінні якості перехідних процесів веде себе однаково, тому зроблено висновок про лінійність установки в натурному експерименті при відповідній настройці пропорційно – інтегрально – диференціального регулятора (ПІД–регулятора).

Математичне рівняння ПІД–регулятора при паралельному з'єднанні ланок має вигляд

$$U_y = k_n \cdot (n_{\text{зад}} - n) + k_u \int (n_{\text{зад}} - n) dt + k_d \cdot \frac{d(n_{\text{зад}} - n)}{dt}, \quad (27)$$

де $n_{\text{зад}}$ – величина завдання частоти дизеля;

n – частота дизеля;

k_n, k_u, k_d – коефіцієнти підсилення пропорційної, інтегральної та диференціальної складових рівняння регулятора.

З урахуванням попередніх розрахунків і спрощень, в комп'ютерну модель включено всього 4 блоки:

- блок, що характеризує інерційні властивості махових мис частин силової установки, що обертаються (інтегратор постійного часу T_a);
- блок, що характеризує інерційні властивості рейки, яка переміщується сервомотором;
- ПІД–регулятор частоти в традиційному вигляді;
- блок, що імітує механічне навантаження, яке докладається до дизеля

за допомогою генератора.

Структурна схема отриманої комп'ютерної моделі наведена на рис. 8.

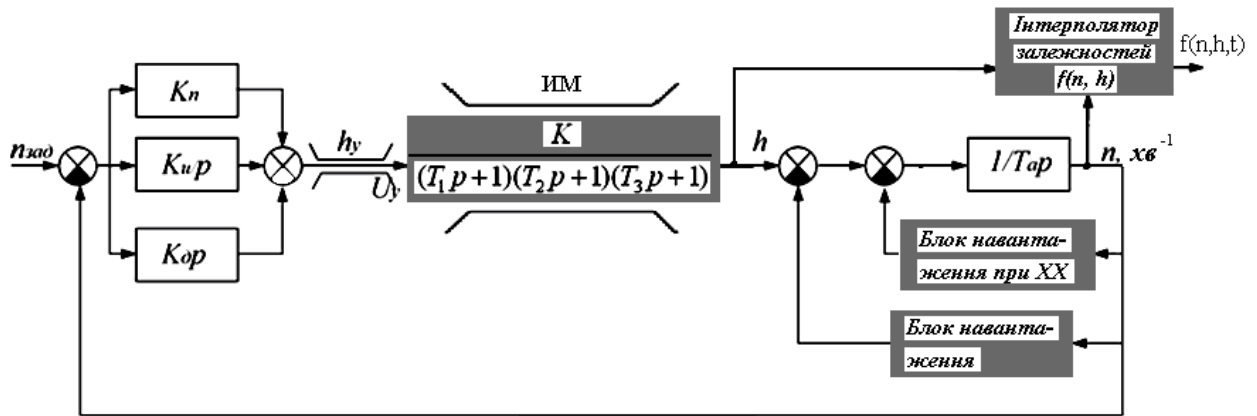


Рис. 8. Комп'ютерна модель тягового дизель-генератора

Реалізація, безпосередньо на комп'ютері, здійснена в середовищі програмного пакету MatLab – Simulink, причому отримано моделі як з безперервним регулятором, так і з дискретним.

В результаті були отримані задовільні результати на комп'ютерній моделі в сенсі співпадіння з осцилограмами натурального експерименту, що є свідченням адекватності отриманої моделі.

З метою одержання чисельних оцінок впливу параметрів формування перехідних процесів на показники енергозбереження на комп'ютерній моделі було проведено дослідження процесів розгону дизеля з навантаженням. В процесі дослідження змінними були час зміни завдання частоти обертання в межах від 0 до 40с з інтервалом у 10с і показник інерційності турбокомпресора в межах від 0 до $4T_a$ (T_a – показник інерційності дизель – генератора). На рис. 9 і 10 наведено два крайніх випадки досліджень.

На рис. 9 і 10 наведені комплексні графіки зміни n , h та $\alpha(n, h)$ (n і h у відносних одиницях). Причому темп зміни частоти обертання під час комп'ютерного експерименту на моделі змінювався з метою забезпечити величину коефіцієнту надлишку повітря $\alpha(n, h)$ не менш ніж 1,4 (граничне значення для димності).

Дослідження передбачає сумісне використання статичних залежностей, отриманих за допомогою сіткових моделей і комп'ютерної моделі. Для цього в модель введено блок кусочно-лінійної інтерполяції, який описує залежність $\alpha(n, h)$, що як приклад наведена на рис. 2.

Для визначення кількісних показників підвищення енергозбереження в розглянутих випадках формування перехідних процесів було виконано дискретне обчислення інтегральної функції $\int h_{\text{отн}}(t)dt$ в діапазоні від 120 до 180с для всіх 5-ти випадків зміни інтенсивності розгону дизель – генератора.

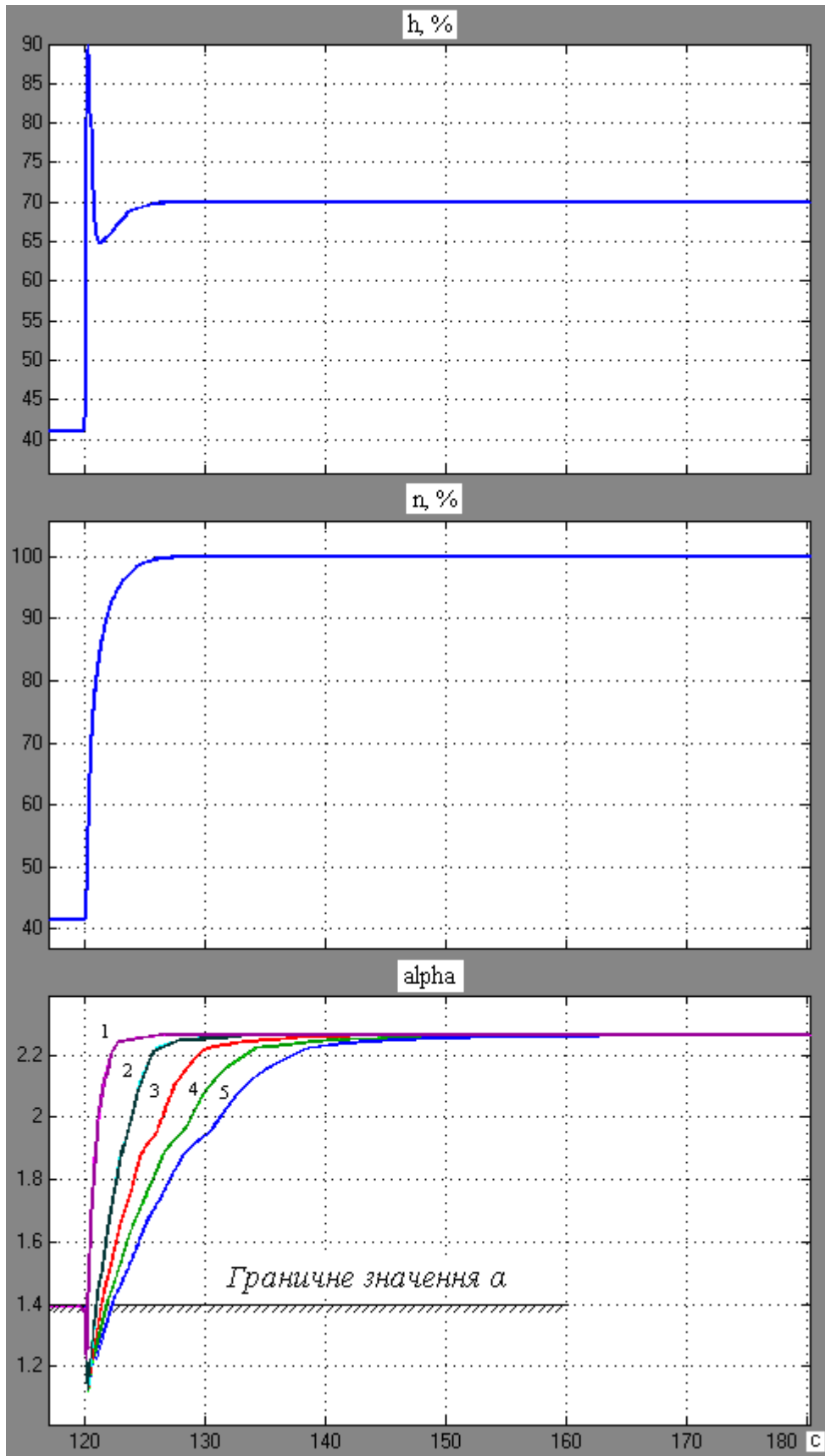


Рис. 9. Комп'ютерна осцилограма для випадку миттєвої зміни задання частоти обертання
(1 – нульова інерційність турбокомпресора; 2 – T_a ; 3 – $2T_a$; 4 – $3T_a$; 5 – $4T_a$)

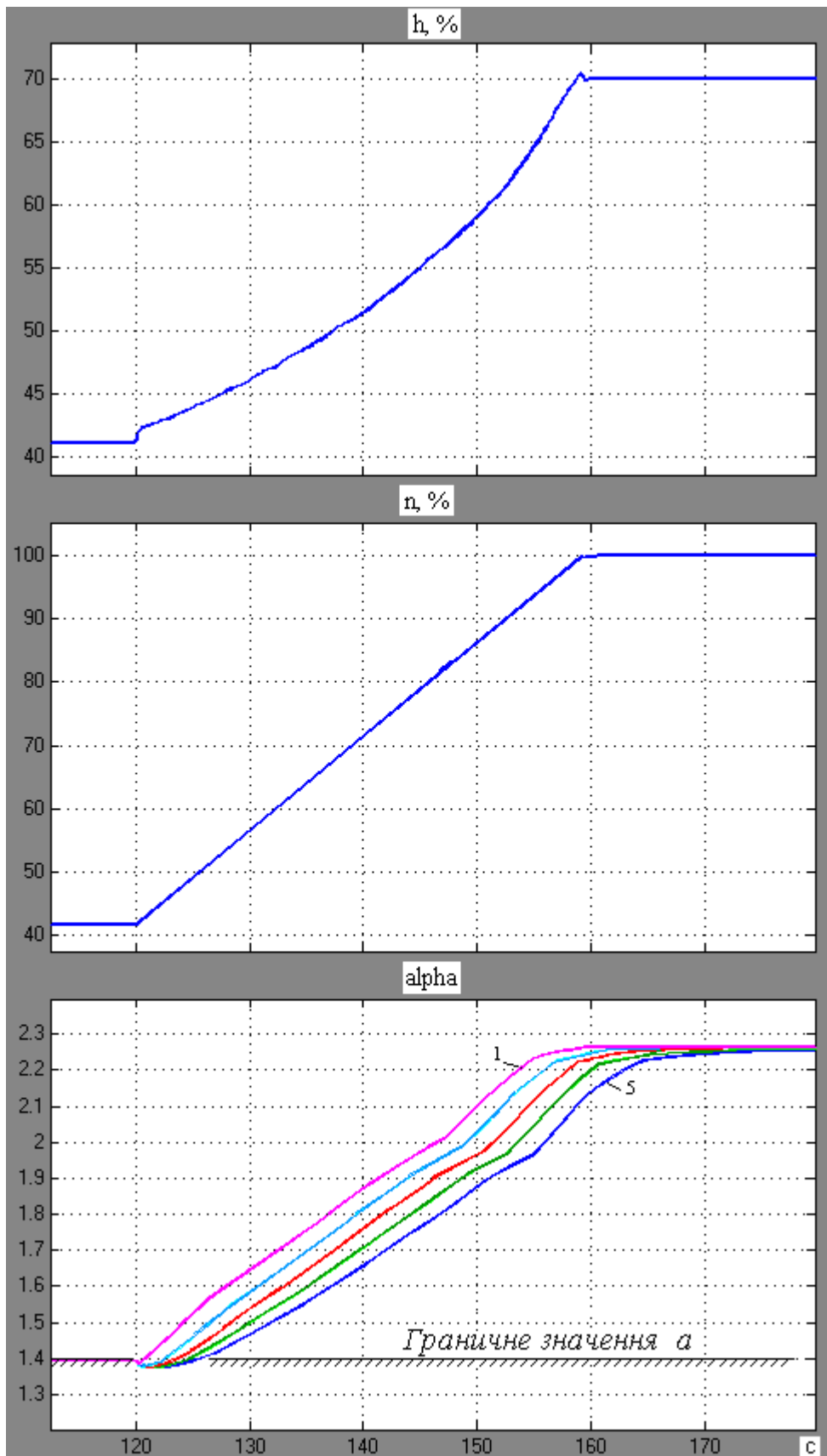


Рис.10. Комп'ютерна осцилограма для випадку зміни задання частоти обертання за 40 с (1 – нульова інерційність турбокомпресора; 2 – T_a ; 3 – $2T_a$; 4 – $3T_a$; 5 – $4T_a$)

Аналіз числових результатів дозволяє встановити, що застосування темпів зміни частоти обертання 30 або 20 $\text{хв}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (відповідно розгон за 20 і 30 с) підвищує енергозбереження на 7,82 і 11,86 % відповідно у порівнянні з випадком, коли задання змінюється миттєво. Застосування темпу 15 $\text{хв}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (о розгон за 40 с) дозволяє підвищити енергозбереження на 16,31 % у порівнянні з випадком миттєвої зміни задання, що реалізована в традиційних гідромеханічних регуляторах.

Таким чином, запропонована комп'ютерна модель з вбудованим інтерполятором дозволяє при визначенні динамічних параметрів забезпечення перехідних процесів використовувати масиви даних отриманих за допомогою методу сіткових моделей. Таке поєднання значно скорочує витрати на експериментальні дослідження.

Четвертий розділ присвячено аналітичному отриманню оцінок підвищення енергозбереження тепловозними дизель – генераторами за рахунок впровадження результатів досліджень, а також технічній реалізації системи управління режимами (розробленій за безпосередньої участі автора роботи) – електронного регулятора типу СУДМ–01 для тепловозних дизель – генераторів, на якому проводились експериментальні дослідження та випробування в умовах рядової експлуатації.

Отримані в процесі досліджень дані дозволяють кількісно оцінити ступінь підвищення енергозбереження з урахуванням сталих і перехідних режимів. Оцінка буде залежати від співвідношення між сталими і перехідними режимами в процесі експлуатаційної роботи і від обсягу часу роботи на холостому ході. У відносних одиницях ступінь підвищення енергозбереження під час експлуатаційної роботи можна знайти з формули:

$$\frac{g_{\text{ср.э.1}}}{g_{\text{ср.э.}}} = 1 - \frac{K_{\text{уст.}}}{1 + K_{\text{пер.}}} - \frac{K_{\text{пер.}} \cdot K_{\text{снер.}}}{1 + K_{\text{пер.}}}, \quad (28)$$

де $g_{\text{ср.э.}}$ і $g_{\text{ср.э.1}}$ – середньо експлуатаційні питомі ефективні витрати палива до і після впровадження енергозберігаючих заходів відповідно;

$K_{\text{пер.}}$ – коефіцієнт, що враховує частку витрат пального на перехідні режими в загальних витратах;

$K_{\text{уст.}}$ – коефіцієнт, що враховує зниження витрат пального в сталих режимах;

$K_{\text{снер.}}$ – коефіцієнт, що враховує зниження витрат пального в перехідних режимах.

З урахуванням того, що зміна положення генераторної характеристики дозволяє досягти зниження витрат палива від 1 до 5 % (особливо в на середніх частотах обертання і відповідних їм навантаженням), а впровадження енергозбереження в перехідні режими дозволяє досягти підвищення економічності майже до 17 %, дослідження показали, що ймовірно досягти в експлуатаційній роботі підвищення енергозбереження на 4 – 5 %, що було підтверджено в процесі експлуатаційних випробувань.

Задачі експериментальних досліджень було розбито на наступні групи:

- визначення залежності положення рейок паливних насосів від частоти обертання на холостому ходу;
- визначення впливу на споживання палива транспортного дизеля, зниження мінімальної частоти обертання на холостому ходу;
- визначення динамічних характеристик виконавчого механізму переміщення рейок паливних насосів та осцилографування перехідних характеристик управління частотою та потужністю для створення комп'ютерної моделі в розділі 3 роботи;
- визначення ступеня підвищення енергозбереження за рахунок впровадження розроблених в дисертаційній роботі методів в умовах рядової експлуатації;
- оцінка стабільності підтримання параметрів електронного регулятора і його надійності в експлуатації.

Кожна група досліджень присвячена вирішенню конкретної практичної задачі більш повного використання технічних можливостей удосконаленої системи управління режимами в умовах рядової експлуатації.

Визначено кількісний рівень зниження витрат пального за рахунок зменшення мінімальної частоти обертання на холостому ходу. Він складає приблизно 1% зниження витрат пального при зменшенні мінімальної частоти на 1%. Під час дослідження, з використанням технічних можливостей електронного регулятора, мінімальна частота обертання потужного дизеля була зменшена з 350 хв^{-1} до 270 хв^{-1} . Регулятор забезпечив стійкість роботи дизеля на всіх занижених частотах. Витрати вимірювались ваговим методом.

Відзначено, що не дивлячись на очевидний вииграш в зниженні витрат пального і легкість самого процесу зменшення мінімальної частоти, користуватись в умовах експлуатації цією можливістю необхідно обережно, бо це може відбитись негативно на роботі масляної системи дизеля, бортового компресора для гальм, системи зарядки акумулятора і т.д.

Експериментально підтверджена кількісна оцінка підвищення енергозбереження тепловозного дизель-генератора, обладнаного електронним регулятором СУДМ-01 за рахунок впровадження ефективних законів управління режимами. Для визначення було обрано двохсекційний тепловоз. Одну секцію було обладнано електронним регулятором СУДМ-01, інша працювала зі штатним регулятором. Технічний стан обох секцій був однаковим – відразу після поточного ремонту.

Характеристики навантаження були сформовані однаковими для обох секцій тепловозу. Експеримент тривав близько двох місяців, тепловоз експлуатувався різними поїзними бригадами, що спеціально не готувались до експлуатації електронного регулятора. Інформація про витрати пального враховувалась після кожної поїздки окремо для кожної секції за методикою, що прийнята в експлуатуючій організації і нормативно затверджена профільним міністерством.

При вказаних умовах випробувань, порівняння витрат пального між секціями одного тепловозу є в достатній мірі об'єктивною оцінкою

можливостей електронного регулятора в процесі управління дизель–генератором.

За контрольний період було встановлено, що витрати палива на секції з електронним регулятором на 5% менші, ніж на секції, що обладнана штатним гідромеханічним регулятором. Отримані результати співпадають з даними зарубіжних фірм, що виробляють засоби електронного управління подачею палива дизелів. Враховуючи той факт, що одна секція витрачає близько 400 т. палива на рік, то реальна економія складає 20 т. пального на одну секцію на рік.

Перевірена стабільність підтримки параметрів електронними регуляторами частоти. Перевірка здійснена наступним чином. Перед початком експлуатації транспортні засоби проходять реостатні випробування, дані яких фіксуються у відповідному протоколі. Через пів року при проведенні повторних реостатних випробувань була підтверджена повна ідентичність параметрів наявних з параметрами піврічної давнини. Цей факт знайшов відображення в протоколі міжвідомчих приймальних випробувань.

Використання параметричних залежностей, що отримані в роботі дозволяє не використовувати ряд датчиків, що є суттєвим фактором здешевлення системи і підвищення її надійності.

За результатами численних випробувань (в тому числі і сертифікаційних) профільними державними установами узгоджені Технічні умови на електронний регулятор, а також прийнято рішення про їх впровадження на рухомий склад.

На теперішній час модернізовано більш ніж 70 секцій тепловозів. Термін окупності регулятора складає 6–8 місяців.

Таким чином підтверджено ефективність застосування результатів досліджень на ТДГ в умовах рядової експлуатації.

П'ятий розділ присвячено розгляду практичного використання результатів досліджень для перспективних напрямків модернізації потужних транспортних силових установок.

До таких пріоритетних напрямків належить впровадження систем електронної інжекції. Для таких систем важливим є такий параметр як кут випередження інжекції палива θ , про які йшла мова в розділі 1 роботи.

В загальному випадку величина θ є функцією як мінімум двох аргументів – частоти обертання та положення рейок паливних насосів. При визначенні θ також необхідно враховувати і інші чинники (тип камери згорання, сорт палива та інше).

На потужних транспортних дизелях зміна кута випередження θ повинна здійснюватись в залежності як від умов навантаження, так і від зміни частоти обертання колінчатого валу.

На вітчизняних тепловозних дизелях автомати для зміни кута θ не використовуються, і кут θ фіксують на весь період експлуатації, хоча відомо, що кут випередження інжекції палива θ суттєво впливає на ефективну потужність N_e і ефективні питомі витрати пального g_e .

Поява сучасних технічних можливостей управління кутом випередження в широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів зробила актуальною задачу теоретичного визначення закону (алгоритму) забезпечення режимів по цьому параметру.

Використовуючи метод сіткових моделей можливо отримати матричні залежності від частоти n і положення рейок паливних насосів h тиску згорання p_z та кута φ_{pz} після ВМТ (верхньої мертвої точки), при якому значення тиску згорання p_z досягає максимуму у випадку, якщо геометричний кут випередження постійний.

Отримана залежність $\varphi_{pz}(n, h)$ служить основою для алгоритму зміни випередження інжекції, який буде використано для подальшої модернізації потужних дизелів.

Відомо, що найбільш прийнятним кутом досягнення максимуму тиску p_z після ВМТ вважається кут $\varphi_{pz}=(10\div 12)^\circ$, що відповідає необхідному куту випередження інжекції.

Виходячи з цього, кути випередження інжекції $\theta(n, h)$ повинні бути скоректовані у відповідності до виразу

$$\theta(n, h) = \theta_{\max} - [(10\div 12)^\circ - \varphi_{pz}(n, h)], \quad (29)$$

де θ_{\max} – фіксоване значення кута випередження, що забезпечує максимальне значення тиску p_z на номінальному режимі роботи;

$\varphi_{pz}(n, h)$ – залежність, отримана методом сіткових моделей за умови, що геометричний кут випередження постійний.

Отримані розрахункові результати визначення необхідних кутів випередження інжекції відносно відомого θ_{\max} дані добре співпадають з основними підходами вибору кута випередження в залежності від частоти обертання та ступеня навантаження. Таким чином показана універсальність створених методів для цілей подальшого удосконалення систем управління режимами ТДГ.

Враховуючи багатоплановість функціональних вимог до різних систем транспортних засобів, що перебувають в умовах рядової експлуатації, з точки зору власника цих транспортних засобів удосконалення самих транспортних засобів в цілому або їх окремих підсистем повинно здійснюватись у відповідності з доопрацьованою групою показників:

- вартість міроприємств по вдосконаленню;
- ступінь підвищення ефективності відповідної групи показників і термін окупності, якщо мова йде про підвищення економічних показників;
- показники надійності;
- час монтажу додаткового обладнання на борту транспортного засобу, тобто час виводу транспортного засобу з експлуатації;
- вимоги до технічного рівня персоналу, що займається експлуатацією та обслуговуванням транспортного засобу з удосконаленою системою.

Удосконалення управління режимами тепловозних дизель –

генераторів відноситься до групи міроприємств, що підвищують економічні показники, а тому повинно здійснюватись з урахуванням особливостей конструкції існуючих систем та з урахуванням особливостей експлуатації.

На підставі викладеного можна стверджувати, що результати досліджень можна використовувати для отримання залежностей управління для майбутніх, ще більш ефективних енергозберігаючих систем управління ТДГ, якими є системи електронного впрыску. Модернізація повинна здійснюватись на базі сформульованих показників.

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішено актуально науково – прикладну проблему створення моделей та методів формування ефективних енергозберігаючих режимів роботи ТДГ в умовах експлуатації.

На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Досліджено вплив існуючих в Україні методів і засобів систем управління ТДГ на показники енергозбереження. При цьому визначені характерні незадовільні режими роботи, які пов'язані із незадовільними характеристиками технічних засобів, що принципово унеможливають вдосконалення сталих і перехідних режимів, а також режимів холостого ходу і запуску тепловозного дизеля, а відповідно і підвищення показників енергозбереження.
2. Досліджені існуючі теоретичні методи, за якими здійснюється оцінка показників енергозбереження ТДГ в умовах експлуатації. Встановлено, що всі методи орієнтовані лише на одержання оцінок енергозбереження в сталих режимах, спираються на значні обсяги статистичних і експериментальних даних з експлуатації. Завдання оптимізації енерговитрат вирішується за рахунок розробки рекомендацій по веденню поїзда або на підставі залучення в цільову функцію витрат на організаційно – технічні заходи з ремонту і обслуговування. Існуючі теоретичні методи не розвинені для розробки наукових підстав і рекомендацій щодо вдосконалення режимів роботи ТДГ в умовах експлуатації з метою підвищення показників енергозбереження, вони також є залежними від кваліфікації управляючого персоналу. Тому підвищення рівня енергозбереження повинно вирішуватись комплексно шляхом вдосконалення як режимів роботи ТДГ (сталих і перехідних), так і технічних засобів на підставі подальшого розвитку методів моделювання технічних засобів управління режимами.
3. Проаналізовано конструктивні рішення сучасних і перспективних систем управління режимами ТДГ, що безпосередньо впливають на вихідні параметри і витрати енергоресурсів. Встановлено загальність функціональних структур сучасних конструктивних підходів до вдосконалення систем управління режимами дизель–генераторів.
4. Сформульовано критерій паливної ефективності, на підставі якого визначаються параметри енергозберігаючої роботи в сталих режимах

роботи ТДГ, які на відміну від відомих критеріїв забезпечують мінімум витрат палива в межах робочої зони режимів ТДГ. Параметром, який забезпечує ефективне енергозбереження сталого режиму на будь-якій частоті обертання дизеля в роботі визначено положення рейки паливних насосів, якому відповідає найменша ефективна питома витрата палива на відповідній частоті і навантаженні.

5. Розроблено метод аналітичного моделювання, що дозволяє визначити параметри енергозберігаючої роботи дизель-генератора на сталих режимах з використанням «методу сіткових моделей», який є просторовою багатофакторною модифікацією класичного методу аналізу процесів в дизелях. Модифікований метод на відміну від класичного методу на основі використання процедур багатофакторних обчислень дозволяє визначити параметри економічної роботи тепловозного дизеля в сталих режимах в усьому робочому діапазоні. Теоретичним дослідженням сталих процесів в дизелях за допомогою «методу сіткових моделей» встановлено, що значення ефективного ККД може мати максимум для різних моделей транспортних дизелів як з приводним компресором, так і з вільним турбокомпресором. Значення положення рейки паливного насоса, що відповідає максимуму ефективного ККД, представляє собою необхідний параметр енергозберігаючої роботи в сталому режимі, який задовольняє вимогам критерію паливної ефективності. Модифікований класичний метод дозволяє визначити зміни будь-яких параметрів залежно від частоти обертання і положення рейки паливних насосів в сталих режимах, а також встановити обмеження по вибраному параметру у всьому робочому діапазоні. Експериментальні дослідження показали хороше співпадання теоретичних і експериментальних даних: у області номінальних режимів неспівпадання складає приблизно 5%, у області часткових режимів – 10÷12 %, що цілком прийнятно для такого складного об'єкту, як дизель. Похибка запропонованого методу за рахунок дискретизації вхідних змінних не перевищує 1 %. Показана універсальність застосування модифікованого методу для цілей подальшого удосконалення засобів управління режимами ТДГ в умовах рядової експлуатації.
6. Розроблено методи визначення параметрів забезпечення енергозбереження в перехідних режимах розгону дизеля, тепловоза, як по вже відомих математичних моделях, так і за допомогою комп'ютерної моделі. На відміну від існуючих запропоновані методи дозволяють досліджувати і визначати параметри забезпечення енергозбереження в перехідних режимах ТДГ на стадії проектування. В якості обмежуючого показника вибрано значення коефіцієнта надлишку повітря $\alpha(n, h)$, що в перехідному режимі повинне бути не менше ніж 1,4. Дослідження нелінійних властивостей поверхні коефіцієнта надлишку повітря $\alpha(n, h)$ показало, що в робочій області параметрів нелінійність не перевищує 12 – 15 %, а отже можна стверджувати, що лінеаризація статичної системи можлива не лише поблизу окремої точки, а і в робочій області з вказаною точністю. Створена на підставі натурних випробувань адекватна комп'ютерна

структурна модель на відміну від існуючих має в своєму складі моделі системи управління режимами, електричних механізмів подачі палива, а також інтерполятор функціональних залежностей, що дозволяє при дослідженнях уникати необхідності врахування в розрахунках інших нелінійних елементів. Встановлено, що параметр темпу збільшення частоти впливає на забезпечення подачі палива так само, як обмежувач ходу рейки в гідромеханічному регуляторі. Тому при застосуванні системи з електронною системою управління режимами можна в експлуатації відмовитися від датчика вимірювання надлишкового тиску повітря наддуву. Комп'ютерна структурна модель з інтерполятором дозволяє визначати в перехідному процесі поведінку будь-яких параметрів дизель-генератора, значення яких для сталих режимів обчислюються за допомогою удосконаленого методу або знаходяться експериментальним шляхом. Одержано величини підвищення енергозбереження в перехідних режимах, що сягають до 17 %.

7. Експериментально підтверджена ефективність використання результатів досліджень дисертаційної роботи. Одержане в експлуатації зниження витрати палива на 5 % співпадає з теоретичними оцінками можливого рівня підвищення енергозбереження, які на відміну від існуючих аналогічних оцінок дозволяють ще на стадії проектування і впровадження енергозберігаючих систем визначити очікуваний результат енергозбереження в експлуатації. Експериментальні дослідження дозволили одержати кількісну оцінку зниження витрати палива за рахунок зниження мінімальної частоти обертання : при зниженні мінімальної частоти обертання на 1 % витрата палива також знижується приблизно на 1 %. Реалізацію підвищення енергозбереження дизель – генераторами в сучасних умовах запропоновано здійснювати відповідно до розширеної групи показників, які на відміну від існуючих дозволяють оцінити ефективність запропонованих теоретичних досліджень і технічних рішень в експлуатації. Значно зменшено вплив людського чинника на показники енергозбереження ТДГ в умовах експлуатації.
8. Результати наукових досліджень впроваджені на Державному підприємстві «Завод ім. В.А. Малишева», Казенному підприємстві «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування», а також при модернізації ТДГ, які знаходяться в експлуатації на тепловозах Південної і Придніпровської залізниць України. На теперішній час модернізовано більш ніж 70 секцій тепловозів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Богаевский А.Б. Эксплуатационные характеристики тепловозных дизель-генераторов и резервы повышения их топливной экономичности / А.Б.Богаевский // Политранспортные системы. В 2-х ч. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во СГУПС. – 2009. – с. 103–106.

2. Богаевский А.Б. Компьютерная модель мощного транспортного дизель–генератора с электронной системой управления. / А.Б. Богаевский // Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. Харьков: Нац. аэрокосм. ун–т «ХАИ». – 2008. – вып. 38. – с. 150 – 169.
3. Богаевский А.Б. Определение области рабочих статических режимов мощной транспортной дизель–генераторной установки. / А.Б. Богаевский // Вісник СНУ ім. В.Даля. Луганськ. – 2005. – №8(90), ч.1. – с.184 – 188.
4. Богаевский А.Б. Повышение топливной эффективности мощной транспортной дизельной установки за счет применения микроконтроллерного регулятора частоты вращения и мощности. / А.Б. Богаевский // Сборник доклады, XI научно–техніческа конференция с международно участие, «Транспорт, екологія – устойчиво развитие», ЕкоВарна. – 2005. – с.459–463.
5. Богаевский А.Б. Совершенствование управления топливоподачей транспортных дизельных установок. / А.Б. Богаевский // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – № 54. – с. 83–87.
6. Богаевский А.Б. Повышение топливной экономичности и надежности мощных транспортных силовых установок при модернизации их систем управления топливоподачей. / А.Б. Богаевский // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. Харків: ХНТУСГ ім. П.Василенка. – 2008. – вип. 69, – с.347 – 351.
7. Богаевский А.Б. Принципы функциональной организации электронных регуляторов для транспортных дизельных установок. / А.Б. Богаевский // Вісник СНУ ім. В.Даля. Луганськ: СНУ ім. В.Даля. – 2007. – №6(112). – с.184 – 188.
8. Богаевский А.Б. Оценка нелинейных свойств коэффициента избытка воздуха для построения компьютерной модели транспортного дизель – генератора. / А.Б. Богаевский // Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. Харьков: Нац. аэрокосм. ун–т «ХАИ». – 2008. –вып.40. – с. 243–250.
9. Богаевский А.Б. Определение алгоритма управления изменением угла опережения впрыска топлива в мощных транспортных дизелях. / А.Б. Богаевский // Вісник СНУ ім. В.Даля. Луганськ: СНУ ім. В.Даля. – 2008. – №7(125) ч.2. – с.184 – 188.
10. Богаевский А.Б. Метод определения оптимальных характеристик нагружения для микроконтроллерных регуляторов транспортных дизель–электрических установок. / А.Б. Богаевский // Праці Луганського відділення Міжнарод. акад. інформатизації. Науч. журн. Луганськ. – 2004.– №2. – с. 52–55. 11. Богаевский А.Б. Управление топливоподачей транспортной дизельной установки при снятой нагрузке. / А.Б.Богаевский // Сб. науч. трудов «Автомоб. транспорт». Харьков: РИО ХНАДУ. – 2005. – вып. 16 – с. 319–320.

12. Богаевский А.Б. Анализ требований к управлению топливоподачей транспортных дизельных установок. / А.Б. Богаевский // Вісник СНУ ім.В.Дала. Луганськ. – 2005. – №6(88). – с.214 – 218.
13. Богаевский А.Б. Определение параметров управления мощной транспортной дизель–генераторной установкой в переходных режимах. / А.Б. Богаевский // Вестник НТУ «ХПИ», тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков. – 2005. – № 45. – с.291–292.
14. Богаевский А.Б. Выбор закона нагружения для дизель–генератора 588ДА дизель–поезда ДЭЛ–01. / А.Б. Богаевский // Науч.–техн. журн. ДВС:двигатели внутр. сгор. Харьков: НТУ–ХПИ. – 2005. – №1. – с.138 – 143.
15. Богаевский А.Б. Особенности управления топливоподачей транспортных дизельных установок в условиях эксплуатации. / А.Б. Богаевский // Вестник КГТУ. Транспорт. Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – Вып. №39. – с.158–164.
16. Богаевский А.Б. Применение электромагнитных исполнительных двигателей пропорционального типа в системах автоматического регулирования частоты транспортных дизелей. /А.Б. Богаевский, А.В. Басов, С.Г. Буряковский // В кн. «Проблемы автоматизированного электропривода». Труды н.–тех. конф. Харьков. – 1997. – с. 259 – 260.(Автором запропонована модель електричного виконавчого органу як елементу системи забезпечення подачі палива).
17. Богаевский А.Б. Информационные технологии при измерении частоты вращения вала двигателя. / А.Б. Богаевский, А.В. Басов, С.Г. Буряковский, А.Ф. Калинин // Вестник ХГПУ, «Проблемы автоматизированного электропривода». Харьков. – 1999. – вып. 61. – с. 272. (Автором запропоновано алгоритм способу визначення частоти обертання для системи забезпечення частоти обертання транспортного дизеля).
18. Богаевский А.Б. Микропроцессорная система управления частотой вращения и мощностью дизель–генераторной установки. /А.Б.Богаевский, А.В. Басов, О.П. Смирнов // Вестник ХГАДТУ, Харьков. – 2001. – вып. 15–16. – с.153–156. (Автором викладено основні переваги застосування сучасних підходів до забезпечення подачі палива в потужних транспортних силових установках).
19. Богаєвський О.Б. Оптимізація перехідних процесів тепловозних дизелів з застосуванням електронних керуючих систем. / Е.Д. Тартаковський, В.О.Матяш, О.Б. Богаєвський, Д.О. Аулін // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ. – 2007. – вип. 86. – с. 177–181. (Автором показані переваги електронних систем при забезпеченні перехідних режимів тепловозів).
20. Богаєвський О.Б. Випробування електронно – керуючої системи тепловозного дизель – генератора на моторному стенді./ О.Б.Богаєвський, О.В. Басов, А.Ф. Агулов, В.З. Дубровський, В.А. Залозних // Міжвуз. зб. наук. праць «Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного

- транспорту». ХарДАЗТ. Харків. – 2001. – Вип. 46. – с. 84–89. (Автор узагальнив результати випробувань електронного регулятора на вітчизняному транспортному дизель – генераторі, що підтвердили переваги, викладені в [3]).
21. Богаевский А.Б. Улучшение технико–экономических показателей дизель – агрегата дизель – поезда на основе микропроцессорной системы управления. /Н.К. Рязанцев, А.Б. Богаевский, А.В. Басов, Л.Б.Синельникова // Двигатели внутреннего сгорания. Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. – №1, – с.55–57. (Автор узагальнив результати ходових випробувань мікропроцесорної системи управління дизель – поїздом).
 22. Богаевский А.Б. Выбор закона подачи топлива для дизеля 588ДА дизель – поезда ДЭЛ–01. /Н.К. Рязанцев, А.Б. Богаевский , П.Я. Перерва // Науч.–техн. журн. ДВС:двигатели внутр. сгор., Харьков: НТУ «ХПИ».– 2004.– №1. – с.24–26. (Автор запропонував підхід до модифікації класичного методу аналізу процесів в потужних двигунах).
 23. Богаевский А.Б. Определение характеристики ограничения подачи топлива в зависимости от частоты вращения. /А.Б. Богаевский , О.П. Смирнов // Сб. науч. трудов «Автомоб. транспорт». Харьков: РИО ХНАДУ. – 2004. – вып. 14.– с.67–69. (Автор розробив метод визначення законів управління в сталих режимах).
 24. Богаевский А.Б., Использование сеточных моделей при определении оптимального закона управления нагружения силового агрегата дизель – поезда. / А.Б. Богаевский, О.П. Смирнов // Сб. науч. трудов «Автомоб. транспорт». Харьков: РИО ХНАДУ. – 2004 г. – вып.15 – с. 86–89. (Автор визначає закон оптимального навантаження для транспортного дизель–агрегату).
 25. Богаевский А.Б. Испытания дизеля 1Д80Б с электронным регулятором типа СУДМ –01. /А.Б. Богаевский, А.Ф. Агулов, А.В. Басов, В.Н. Зайончковский, В. А. Рузов //Межвуз. сб. науч. трудов «Совершенствование конструкции локомотивов и системы их обслуживания». С.– Петербург, ПГУПС. – 2004. – с.49 – 56. (Автором викладені результати розширених випробувань потужного транспортного дизеля, що проводяться відповідно до заводської програми).
 26. Богаевский А.Б. Схемы гальванической развязки аналогового сигнала с оптической связью. / А.Б. Богаевский, А.В. Басов, С.Г. Буряковский //Вестник ХГПУ, спец. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков: ХГПУ. – 1998. – с. 317. (Автором запропоновано для впровадження метод передачі сигналів, що використовуються в системах тепловозів).
 27. Деклараційний патент України на винахід № 62057 А 7F02D29/06. Система автоматичного регулювання паливоподачі дизель – генераторної установки транспортних засобів./ О.Б. Богаєвський, В.З. Дубровський, О.В. Басов, Л.Б. Синельникова; заявник і володар патенту ХНАДУ, Україна; опубл. 15.12.2003, бюл. № 12. – 5 с. (Автору належать ідея і формула винаходу).

28. Системы управления дизелями микропроцессорные. Технические условия. ТУ УЗ3.2 –24490245–001–2003. Нормативный документ. / А.Б. Богаевский, В.З. Дубровський, А.В. Басов. Харьков. – Введены с 01.09.2004. – 28 с. (Автор в цьому стандарті розробив вимоги до впроваджуваних систем забезпечення режимів тепловозів, а також розробив методики їх випробування під час виробництва).
29. Богаєвський О.Б. Мікроконтролери для транспортних і промислових застосувань .Навчальне видання / О.П. Алексієв, О.Б. Богаєвський , В.П. Волков. Харьков: РИО ХНАДУ. – 2004. – 156с. (Автор у посібнику навів приклад використання апаратних і програмно–алгоритмічних засобів для створення транспортної системи забезпечення режимів).

АНОТАЦІЯ

Богаєвський О.Б. Розвиток методів моделювання технічних засобів енергозбереження систем управління для тепловозних дизель – генераторів.
–Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів; Українська державна академія залізничного транспорту; Харків, 2010.

Дисертація присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням напрямків підвищення енергозбереження тепловозними дизель – генераторами.

Досліджено режими роботи дизель – генераторних установок, вдосконалення яких дозволить підвищити енергозбереження, і існуючі методи визначення енерговитрат в експлуатації. На підставі всебічного аналізу існуючих в даний час систем управління режимами роботи тепловозних дизель – генераторів (частота, потужність, подача палива) розширено групу техніко–економічних і організаційних показників, яким повинен відповідати процес вдосконалення цих систем, і визначено його раціональні напрями. Встановлена спільність функціональних структур можливих конструктивних рішень вдосконалення систем управління режимами роботи. Розроблено критерій паливної економічності в сталих режимах і розроблено теоретичні методи моделювання, що дозволяють визначити параметри забезпечення енергозберігаючої роботи дизель – генераторів в сталих і перехідних режимах.

Основні результати досліджень знайшли впровадження на підприємствах залізничного транспорту, підприємствах з ремонту рухомого залізничного транспорту, на підприємствах, що займаються проектуванням і виробництвом потужних транспортних дизель – генераторних установок і паливної апаратури до них. Модернізовано більше 70 одиниць рухомого залізничного складу, енергозбереження від впровадження результатів досліджень підвищилось на 5 %.

Ключові слова: тепловозний дизель–генератор, удосконалення режимів роботи, енергозбереження в експлуатації, метод сіткових моделей,

комп'ютерна модель, технічні засоби управління сталими і перехідними режимами, показники ефективності модернізації, електронний регулятор частоти обертання і потужності.

АННОТАЦИЯ

Богаевский А.Б. Развитие методов моделирования технических средств энергосбережения систем управления для тепловозных дизель – генераторов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов; Украинская государственная академия железнодорожного транспорта; Харьков, 2010.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям направлений повышения энергосбережения дизель – генераторами тягового подвижного состава.

Определены режимы работы дизель – генераторных установок, совершенствование которых позволит повысить энергосбережение. Установлена общность функциональных структур возможных конструктивных решений совершенствования систем управления режимами работы. Разработан критерий топливной экономичности в установившихся режимах и разработаны теоретические методы моделирования, позволяющие определять параметры обеспечения энергосберегающей работы дизель – генераторов в установившихся и переходных режимах.

В качестве метода исследования в работе предложен модифицированный на основе сеточных моделей классический метод анализа рабочих процессов в дизельных двигателях. Модифицированный метод в отличие от классического на основании процедур многофакторных вычислений позволяет определять параметры экономичной работы и параметры ограничения тепловозного дизеля во всем диапазоне возможных рабочих режимов функционирования. Для исследования переходных режимов и определения параметров энергосберегающей работы разработана адекватная компьютерная модель с электронной системой управления и интерполятором функциональных зависимостей от частоты вращения и положения реек топливных насосов. Модель позволяет моделировать в переходных режимах поведение линейных и нелинейных параметров во всей рабочей зоне режимов дизель – генератора с учетом инерционных характеристик.

На основании всестороннего анализа существующих в настоящее время систем управления режимами работы тепловозных дизель – генераторов (частота, мощность, подача топлива) расширена группа технико – экономических и организационных показателей, которым должен отвечать процесс усовершенствования таких систем, и определены его рациональные направления.

Основные результаты исследований внедрены на предприятиях железнодорожного транспорта, на предприятиях по ремонту подвижного

железнодорожного состава, на предприятиях, занимающихся проектированием и производством мощных транспортных дизель – генераторных установок и топливной аппаратуры к ним. Модернизировано более 70 единиц железнодорожного подвижного тягового состава, энергосбережение от внедрения результатов исследований повысилась на 5 %.

Ключевые слова: тепловозный дизель–генератор, совершенствование режимов работы, энергосбережение в эксплуатации, метод сеточных моделей, компьютерная модель, технические средства управления в установившихся и переходных режимах, показатели эффективности модернизации, электронный регулятор частоты вращения и мощности.

ABSTRACT

Bogaevskiy O.B. The Development of the methods of modeling of the technical facilities of energy conservation managerial system for locomotive diesel–generators. – a Manuscript.

The Thesis on doctor of the technical sciences degree competition on profession 05.22.07 – a rolling stock of the railways and train pulling ; The Ukrainian state academy of the railway transport; Kharkiv, 2010.

The thesis is defended in the manner of manuscript. 29 scientific works that contains theoretical and experimental studies of the directions of increasing of energy conservation diesel – a generator of the tractive rolling stock have been published on the main result .

The states of working diesel – generator installation, improving of which will allow to raise energy conservation, and existing methods of the determination expenditures in usages are explored. On the grounds of all–round analysis existing at present managerial system state of working diesel locomotive – generators (the frequency, power, fuel feeding) a group of technical–economic and organizing factors, which must answer the process of the improvement of these systems is extended , and its rational directions are determined . The community of the functional structures, possible constructive decisions of the improvement managerial system state of working is determined. The criterion to fuel economy in formed mode is worked out and the theoretical methods of modeling that allow to define the parameters of energy conservation providing of work diesel – generator work in formed and connecting mode are elaborated .

The Main results of the studies have found introduction on the railway transport enterprises, railway rolling stock repair works, on enterprises, which concern with designing and production of powerful transport diesel – generators plants and its fuel equipment. More than 70 units of the rolling railway stock have been modernized, therefore energy conservation has increased on 5 %.

The Keywords: locomotive diesel–generators, improvement state of working, energy conservation in usages, method of net models, computer model, technical facilities of control by formed and connecting mode, factors to efficiency to modernizations, electronic regulator of the frequency of the rotation and powers.

Богаєвський Олександр Борисович

УДК 629.424.3: 621.313.12

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЗНИХ
ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРІВ**

05.22.07 - рухомий склад залізниць та тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

Коваленко О.С.

Підписано до друку 28.09.2010 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний

Умовн.-друк.арк. 1,9. Обл.-вид.арк. 2,0.

Замовлення № 491. Тираж 100.

Видавництво УкрДАЗТа. Свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТа: 61050, м. Харків – 50, пл. Фейєрбаха, 7