

М. С. Шелестов

РОЗВИТОК СИСТЕМИ НАДДУВУ ВИСОКОФОРСОВАНИХ ДИЗЕЛІВ

В роботі виконано аналіз світового досвіду щодо форсування дизельних двигунів за допомогою удосконалення системи повітропостачання, тобто встановлення привідних нагнітачів та турбокомпресорів (ТКР). Розглянуті два основних типи механічних нагнітачів: коловоротні і відцентрові. Проаналізовані найбільш розповсюджені моделі коловоротних нагнітачів, Рутса, Ітона і Лісхольма, схеми та принцип дії відцентрових нагнітачів. Основним недоліком механічного наддуву є те, що вся потужність, необхідна для стиснення повітря, відбирається від колінчастого вала двигуна. Тому найбільш перспективним вважається газотурбінний наддув. Проаналізовано схему одноступеневого наддуву на прикладі відомих автовиробників таких як «Pegaso» та Volkswagen. Визначено, що застосування турбонаддуву підвищує ефективність роботи двигуна, що виражається в зниженні питомої ефективної витрати палива. Подальший розвиток направлений на вдосконалення одноступневих систем турбонаддуву, зменшення розмірів турбокомпресорів, зниження інерційності, використання регулюючих елементів в турбіні, застосування двоступневих систем наддуву. Крім того, виконаний аналіз роботи, відомих компаній-розробників систем наддуву («ABB Turbo Systems», MTU, MAN, Borg Warner Turbo System), який показав, що для дизелів, які мають літрову потужність більше 60 кВт/л, раціональним є впровадження двоступневих систем наддуву з проміжним охолодженням наддувального повітря. Основними перевагами застосування двоступневої системи наддуву є: високий крутний момент при низьких обертах двигуна; збільшення номінальної потужності; підвищення тиску наддуву; зниження витрати палива; зниження димності відпрацьованих газів; високий потенціал для зниження викидів NOx; поліпшені перехідні характеристики. При застосуванні двоступеневого регульованого турбонаддуву з охолодженням наддувального повітря типу R2S досягається найвищий середній ефективний тиск. Залежно від її налаштування система може бути реалізована як на низьких, так на високих частотах обертання вала двигуна.

Ключові слова: потужність, механічна системи наддуву, одноступенева система наддуву, багатоступенева система наддуву, компресор, турбіна.

Вступ

Використання системи наддуву у ДВЗ є актуальним питанням, оскільки дозволяє підвищити потужність без значного збільшення масогабаритних показників і вартості, а також в більшості випадків призводить до покращення техніко-економічних показників двигуна. Проте при виборі системи наддуву необхідно враховувати призначення та особливості конструкції двигуна і режимів його роботи на транспортному засобі. Залежно від цього вибирається тип системи наддуву (механічний, газотурбінний, комбінований, двоступеневий наддув, а в особливих випадках можливе застосування спеціальних систем наддуву). Крім того, в залежності від призначення двигуна необхідно обґрунтувати параметри системи охолодження наддувального повітря, за якими забезпечується найкращі показники ефективності двигуна.

Метою роботи є обґрунтування вибору системи повітропостачання дизелів в залежності від рівня їх форсування.

Механічний наддув

Механічний нагнітач - це повітряний насос, робочі органи якого приводяться до руху двигуном, він постачає більшу кількість повітря у впускний колектор, і дає миттєвий приріст потужності і крутного моменту без будь-яких затримок.

Існує два основних типи механічних нагнітачів: коловоротні і відцентрові нагнітачі.

До коловоротних нагнітачів віднесені нагнітачі Рутса, Ітона і Лісхольма. Але слід зазначити різницю між перерахованими моделями. У нагнітачі Рутса, газ рухається всередині корпусу насоса в напрямку, перпендикулярному напрямку обертання насосних елементів.

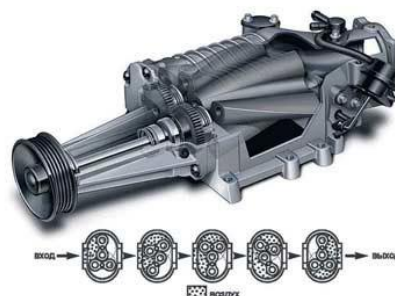


Рис. 1. Привідний нагнітач Рутс

На рис. 1 наведено схему нагнітача Рутс [1], де два ротора, осі яких пов'язані між собою, за допомогою шестерень з'єднані з привідною шестернею нагнітача. Ротори обертаються в протилежних напрямках та всмоктують повітря через вхідний отвір, проштовхуючи його потоки в розподільний відсік.

У порівнянні з нагнітачем Рутса, де використовуються два 2-лепескових прямозубих ротора, у нагнітачі Ітона використовуються два 3-пелюсткових косозубих ротора. Повітря втягується

в нагнітач за рахунок розрідження, створюваного при виході пелюстками ротора з западинами між пелюстками іншого ротора, потім повітря переноситься уздовж корпусу западин між пелюстками, і в нижній частині нагнітача відбувається видавлювання повітря.

Найсучасніший коловоротний нагнітач Лісхольма (Lysholm) рис.2. Він використовує два ротори з асиметричними профілями: на лівому роторі три гвинтових пелюстки, на правому роторі п'ять гвинтових западин. Повітря безперервно стискається, проходячи вздовж осей роторів, що дозволяє отримати більш високу ступінь підвищення тиску, ніж в нагнітачі Рутса, і менший рівень шуму. Вартість нагнітача Лісхольма вище ніж його попередників типу Рутса і Ітона.

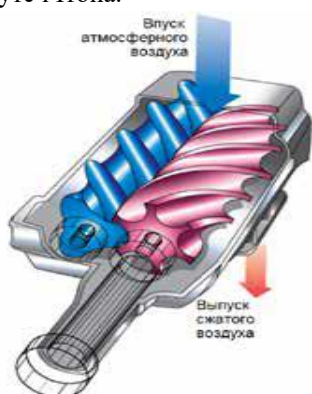


Рис.2. Привідний нагнітачі Лісхольма (Lysholm)

Подібна конструкція має краще ущільнення, більш високий в порівнянні з нагнітачами Рутса та Ітона ККД.

Останній та найбільш розповсюджений тип механічних нагнітачів це відцентровий компресор (ВК) (рис.3). Він являє собою нагнітач динамічного типу, оскільки всередині корпусу нагнітача відбувається збільшення тиску за рахунок відцентрової сили газу, що обертається [2]. Повітря потрапляє в центральний отвір корпусу і потім відкидається в сторони від центру, швидко обертається крильчаткою компресора. Завдяки внутрішньому устрою корпусу равлика, повітря закручується і виходить. У порівнянні з об'ємними нагнітачами типу Рутса, відцентровий компресор набагато компактніший, простіший у технології виготовлення, що здешевлює його кінцеву вартість.

У механічних типів наддуву є як переваги так і недоліки. Основна перевага привідних об'ємних нагнітачів типу Рутса це забезпечення швидкого реагування на зміну швидкісного режиму двигуна. Вони мають високу ефективність на малих і середніх обертах, довговічність конструкції. Але недоліком є великі механічні втрати на малих навантаженнях, порівняно великі розміри і масу агрегатів

наддуву, наявність механічної передачі, складність розміщення на двигуні. У свою чергу відцентрові нагнітачі компактні, легкі, ефективні, мають можливість різноманітного кріплення на двигуні. Гвинтові нагнітачі типу Лісхольм ефективні практично у всьому діапазоні обертів двигуна, компактні, безшумні, але дуже складні у виготовленні. Головним недоліком будь-якого способу механічного наддуву є те, що вся потужність, необхідна для стиснення повітря, відбирається від колінчастого вала двигуна. Тому найбільш перспективним вважається газотурбінний наддув, в широкому діапазоні двигунів, від автомобільних потужністю 100 кВт до суднових потужністю в 10000 кВт.

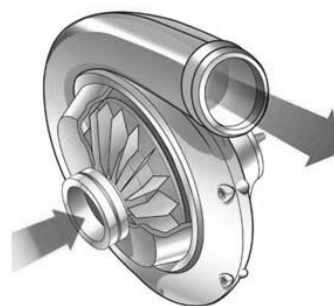


Рис.3. Відцентровий привідний компресор

Газотурбінний наддув

У системах газотурбінного наддуву рис.4 стиснення повітря виконується за допомогою одного відцентрового компресора з приводом від газової турбіни. Система турбонадуву використовує енергію відпрацьованих газів (ВГ) двигуна для приводу ротора турбіни та компресора. ВГ вдаряються об лопатки колеса, віддаючи частину своєї кінетичної енергії змушують її обертатися [3]. Крутний момент від турбіни за допомогою вала безпосередньо передається на колеса компресора. При обертанні колеса компресора відкидає повітря на периферію, підвищуючи його тиск та подає у впускний колектор.

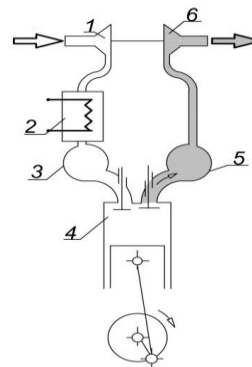


Рис.4. Схеми систем наддуву 4-тактного двигуна з ТКР; 1 - компресор; 2 - охолоджувач наддувочного повітря; 3 - впускний колектор; 4 - циліндр двигуна; 5 - випускний колектор; 6 - турбіна

Застосування газотурбінного наддуву призводить не тільки до підвищення потужності але й до зниження питомої ефективної витрати палива рис.5 [4]. Дизель з турбонадувом має більш низьку питому витрату палива, ніж аналогічний атмосферний дизель, в діапазоні підвищених навантажень, коли істотно позначається тиск наддуву.

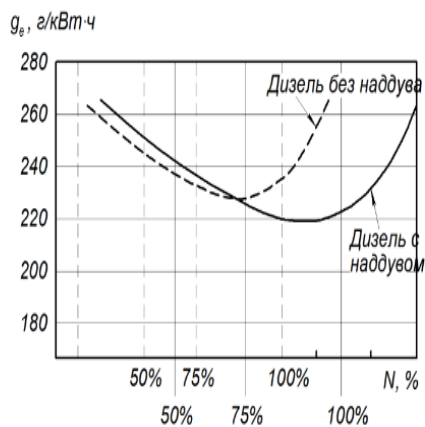


Рис.5. Порівняння навантажувальних характеристик по питомій витраті палива дизелів з наддувом та без

При рівній питомій витраті палива забезпечується більш висока потужність двигуна з наддувом (рис.7).



Рис. 6. Графік протікання кривих потужностей і крутного моменту дизеля з турбонадувом та без, де a- дизель без наддуву в стаціонарному режимі, b- дизель з наддувом в стаціонарному режимі, c-дизель з наддувом в нестационарних режимах

З рис. 6 видно, що більш сприятливе протікання кривої крутного моменту двигуна з наддувом вже в діапазоні низьких частот обертання колінчастого вала (B-C). Робоча точка двигуна по необхідній потужності переміщається, таким чином, в область менших частот, з більш низькими втратами на тертя, з чого слід і менша витрата палива (E-D). При малих частотах обертання колінчастого вала крутний момент двигуна з турбонагнітачем і без, знаходиться на одному рівні. Це пов'язано зі зниженням тиску наддуву, так як енергії ВГ ще недостатньо для розкрутки турбіни.

Розглянемо приклад модернізації атмосферного дизеля шляхом установки системи газотурбінного наддуву на прикладі дизельного двигуна іспанської автомобільної компанії «Pegaso». Атмосферний варіант має такі показники, потужність 162 кВт при частоті обертання вала 2200 хв⁻¹, крутний момент 840 Нм при 1300 хв⁻¹, і питома ефективна витрата палива при максимальній потужності - 250 г / кВт·год.

На двигун був встановлений німецький турбокомпресор марки ККК компанії Borg Warner Turbo Systems серії 3LD.

Встановлення турбокомпресору потребувало модернізації системи випуску ВГ. Також були внесені деякі зміни в системах охолодження і масляній системі.

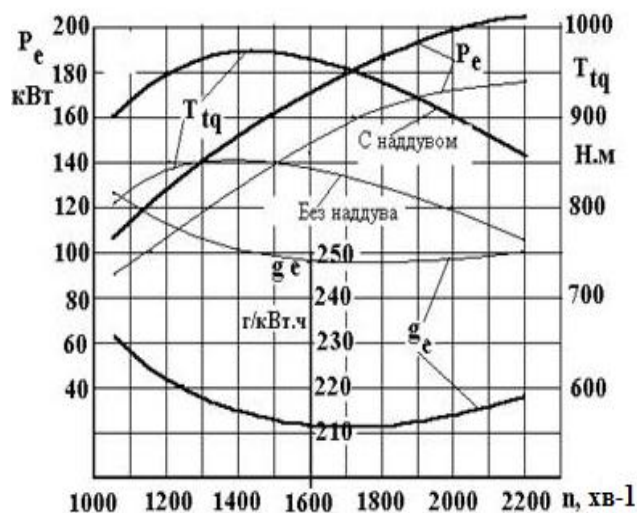


Рис.7. Зовнішні швидкісні характеристики дизеля Pegaso з наддувом і без наддуву

В результаті двигун був форсований до 200 кВт, 24% приріст потужності. Відповідним чином зріс крутний момент (максимальний момент досяг 975 Нм), збільшився на 16%, питома витрата палива зменшилася до 212 г / кВт·год, тобто зменшилася на 15% в порівнянні з варіантом без наддуву (рис.7).

Ще один приклад, це системи одноступеневого турбонаддуву дизелів компанії Volkswagen. У роботі [5] розглянуто основні типи нагнітачів, які встановлювались на двигуни автомобілів Golf, їх переваги та недоліки.

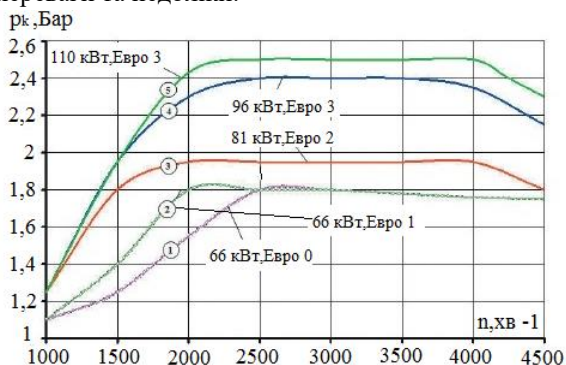


Рис. 8. ЗШХ за абсолютним тиском наддуву p_k дизелів з робочим об'ємом 1,9 л фірми Volkswagen

На рис. 8 наведена зовнішня швидкісна характеристика (ЗШХ) за абсолютним тиском наддуву дизеля з системою одноступінчастого турбонаддуву з регульованими турбокомпресорами компанії Volkswagen [5], з клапаном перепуску частини ВГ, минаючи турбіну (ВСХ 1, 2), і регульованим сопловим апаратом турбіни (ЗШХ 3-5). Аналіз ЗШХ 1 - 5 показує, що дані турбокомпресори забезпечують: максимальне підвищення тиску наддуву в діапазоні частот обертання колінчастого вала від 1000 до 2000 xv^{-1} , підтримання високого тиску наддуву $p_{k,max}$ в діапазоні частот обертання колінчастого вала від 2000 до 4000 xv^{-1} , збільшення максимального тиску наддуву $p_{k,max}$ від 1,8 до 2,5 Бар у міру переходу від Євро 0 до Євро 3, при цьому літрова потужність дизелів зростає від 34,7 до 57,9 кВт/л. При рівні форсування дизелів фірми Volkswagen більше 42 кВт/л в системах одноступеневого турбонаддуву знайшли застосування турбокомпресори з регульованим сопловим апаратом турбіни для виконання вимог екологічних стандартів Євро 2, 3. Подальший розвиток екологічних стандартів привів до вдосконалення одноступеневих систем турбонаддуву і розробки двоступеневих систем наддуву для дизелів із збереженням вищевідзначених тенденцій.

Двоступеневий наддув

Багатоступеневі системи наддуву дозволяють значно розширити межі регулювання потужності в порівнянні з одноступеневими. При цьому вдається поліпшити подачу повітря в циліндри, питому витрату палива на стаціонарних і перехідних режимах роботи двигуна [7].

При збільшенні тиску наддуву існує межа підвищення, яка може бути досягнута за допомогою одного компресора, внаслідок зниження ефективності і зменшення робочого діапазону за витратою повітря. Зі зби-

льшенням тиску наддуву зростає температура робочого тіла на виході з компресора, що потребує використання більш дорогих матеріалів для колеса компресора [6]. Тобто при ступені підвищення тиску наддуву 4 та більше, багатоступеневий наддув це більш доцільний і дешевший варіант, оскільки є можливим використовувати існуючі турбокомпресори.

Розглянемо особливості двоступеневих систем наддуву (ДСН) основних компаній-виробників.

Компанія «ABB Turbo Systems» розробила ДСН другого покоління Power2 800-M, що складається з двох окремих турбокомпресорів, що працюють послідовно з загальним ступенем підвищення тиску до 12 і ККД до 80%. Турбокомпресори високого тиску (ВТ) та низького тиску (НТ) виконані з осьовими турбінами для досягнення необхідних витрат повітря і забезпечення оптимальної компоновки на двигуні. «ABB Turbo Systems» – одна з найстаріших та перших компаній, що оцінила можливості ДСН щодо зниження питомої витрати палива на 10% та викидів оксидів азоту на 40% [9].

Компанія MTU в 2010 р. створила для залізничного транспорту новий ряд двигунів серії 4000 R44 з ДСН, які відповідають вимогам щодо викидів NO_x , ЕУШВ [10]. Турбокомпресори для ДСН власного виробництва вбудовані безпосередньо в газовипускную систему двигуна, що забезпечує компактність конструкції. Керована система ДСН з трьома турбокомпресорами (ТК) фірми MTU (два ТК НТ і один ТК ВТ з охолоджувачами) забезпечує якісне наповнення циліндрів повітрям на всіх режимах роботи, в тому числі при зовнішніх критичних умовах по температурі повітря на вході, розрідженню на впуску (робота на висоті) і протитиску на випуску (рис. 9).

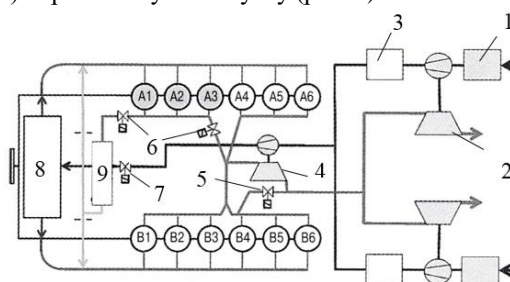


Рис. 9. Двигун з керованою двоступеневою системою наддуву і рециркуляцією охолоджених відпрацьованих газів:

1 – повітряний фільтр, 2 – турбокомпресор НТ, 3 – охолоджувач наддувального повітря НТ, 4 – турбокомпресор ВТ, 5 – керований байпас турбіни високого тиску, 6 – керування рециркуляцією відпрацьованих газів, 7 – дросельний клапан повітря (управління охолодженням), 8 – охолоджувач наддувального повітря ВТ, 9 – охолоджувач системи рециркуляції відпрацьованих газів

Конструктивні особливості турбокомпресорів: колесо компресора – з титану; турбіна – вісерадіальна з високим рівнем ККД і низьким моментом інерції; міжступінчатим і основним охолоджувачами наддувного повітря, що вбудовані в низькотемпературний контур охолодження двигуна. Повітря, що надходить в циліндри, має температуру нижче 70 °С і тиск більше 0,5 МПа.

У відомих конструкціях двигунів MTU 1163-04, у яких тиск наддуву збільшено з 0,46 до 0,57 МПа, питома витрата палива двигуна знижена на 8%. Принципова схема наддуву 16-циліндрового двигуна показана рис.10. Для полегшення розуміння зображено тільки дві групи турбонаддуву, кожна з яких складається з одного турбокомпресора низького і одного високого тиску, а також охолоджувачів наддувного повітря. Система наддуву складається з чотирьох груп, з відповідними діапазонами роботи.

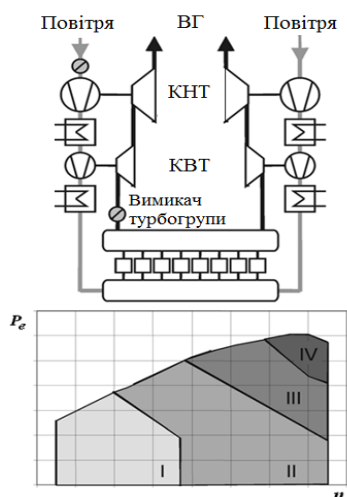


Рис. 10. Схема двоступеневого реєстрового наддуву фірми MTU

Завдяки такій системі можливо отримати високий момент в широкому діапазоні частот обертання, в тому числі на низьких обертах. Весь потік відпрацьованих газів в першій зоні роботи двигуна проходить тільки через одну турбо-групу. Послідовне включення інших груп відбувається в залежності від навантаження і частоти обертання. У четвертій зоні працюють всі чотири групи турбонаддуву. Через низькі витрати газів в першій зоні робота стиснення здійснюється майже повністю турбокомпресором ВТ. Турбокомпресор НТ працює в режимі холостого ходу. При збільшенні витрати відпрацьованих газів поступово починає брати участь і ступінь низького тиску. Тиск наддуву зростає. Завдяки попередньому стиску в компресорі НТ, можлива робота компресора ВТ при

великих масових витратах повітря. Використання невеликих турбокомпресорів на низьких частотах є ключовим фактором отримання високого тиску наддуву на низьких частотах обертання.

Для отримання іншого поля характеристик двигуна змінюють закономірність підключення груп турбокомпресорів. Для роботи такої системи наддуву необхідно мати компресори з широким полем характеристик.

В рамках дослідницького проекту HERCULES фірма MAN провела випробування двигуна 6L32/44CR з ДСН, пристроєм управління закриттям впускного клапана і регульованою турбіною ТК високого тиску (рис. 11).

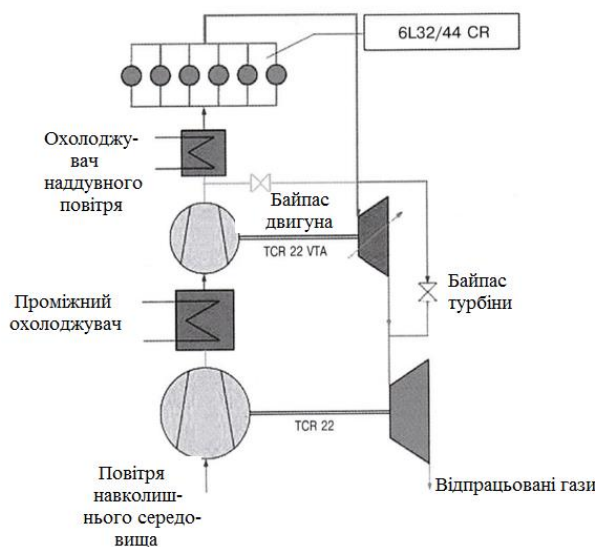


Рис. 11. Двоступенева система наддуву двигуна MAN 6L32/44CR з регульованою турбіною

У порівнянні з двигуном, що спочатку відповідав вимогам ІМО Tier 1, стало можливим при незначному підвищенні витрати палива знизити викиди NO_x більш ніж на 40%, збільшити потужність з 560 до 640 кВт, забезпечити низьку димність відпрацьованих газів. Застосування регульованої турбіни високого тиску значно покращує параметри двигуна за рахунок збільшення тиску наддуву на часткових навантаженнях і забезпечує хорошу якість перехідних процесів. Також встановлено, що підвищення ККД системи наддуву на 10% призводить до збільшення ККД двигуна на 1%. Тому можливості ДСН доцільно використовувати одночасно з оптимізацією термодинамічного циклу.

На рис. 12 наведена схема системи R2S (regulated twostage), розробленої фахівцями компанії Borg Warner Turbo System (BWTS) і BMW.

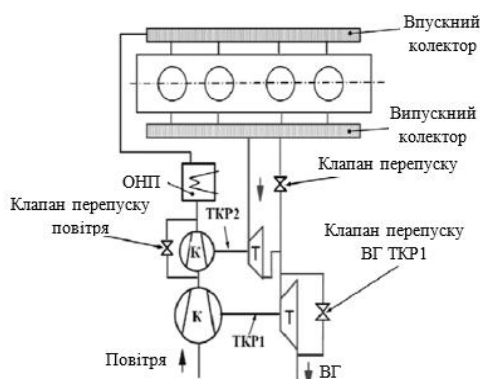


Рис. 12. Схема системи двоступінчастого турбонаддуву R2S для дизеля OM651 ($zVh=2,2$ л; Євро 5)

Система R2S включає два ТКР фірми BWTS і два перепускі клапани.

Регулювання системи здійснюється шляхом перепуску частини відпрацьованих газів та повітря. Застосування системи R2S замість ТКР з регульованим сопловим апаратом (РСА) дозволяє суттєво збільшити середній ефективний тиск двигуна по всій зовнішній характеристиці.

Турбіна низького тиску (ТКР1) розраховується на забезпечення номінальної потужності, турбіна високого тиску (ТКР2) – крутного моменту в області низьких частот обертання колінчастого вала до максимального крутного моменту, щоб зменшити затримку збільшення потужності двигуна при різкому збільшенні подачі палива.

Також відомі конструктивні схеми двоступеневої системи наддуву з використанням привідного компресору з електроприводом. На рис. 13 приведена схема системи наддуву eBooster, розробленої фахівцями BWTS і BMW. Дана система наддуву включає регульований ТКР з клапанами перепуску повітря та відпрацьованих газів, минаючи ланки турбокомпресору, і компресор eBooster™ з електроприводом (рис. 14).

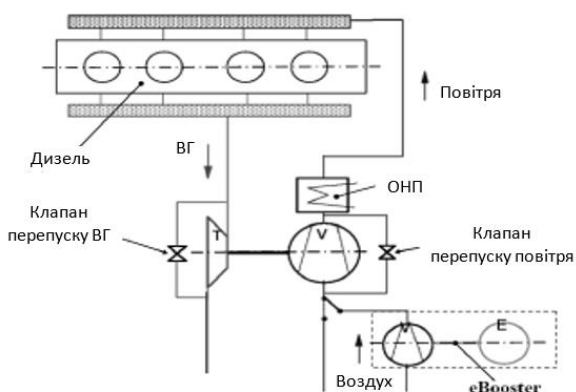


Рис. 13. Схема системи наддуву eBooster

Компресор eBooster™ з електроприводом дозволяє дизелю розвивати більш високі значення крутного моменту за зовнішньою швидкісною характеристикою при низьких частотах обертання колінчастого вала. При роботі дизеля на частотах понад 2000 xv^{-1} компресор eBooster відключається. Основною перевагою компресора eBooster є електропривод, який дозволяє отримати високі значення η_k при високих ККД компресорної ступені на будь-яких режимах роботи дизеля при частотах менше, ніж 2000 xv^{-1} .

Порівняльна оцінка ефективності розглянутих систем двоступеневого наддуву проводиться за даними роботи [5] рис. 14.

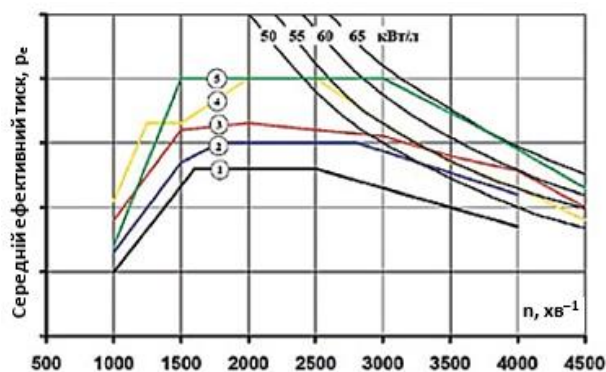


Рис. 14. Зовнішні швидкісні характеристики по середньому ефективному тиску дизелів з різним рівнем форсування:

1 - одноступінчаста система турбонаддуву (ТКР з РСА, налаштована на режим номінальної потужності); 2 - одноступінчаста система турбонаддуву (ТКР з РСА, налаштована на отримання високої літрової потужності); 3 - одноступінчаста система турбонаддуву (система турбонаддуву з паралельною подачею повітря двома ТКР фірми Honeywell-Garret); 4 – двоступенева система наддуву eBooster™; 5 - двоступенева система турбонаддуву R2S

Аналізуючи наведений матеріал можна зробити висновок, що на сьогоднішній день доцільним є застосування двоступеневої системи наддуву, перевагами якої є високий крутний момент при низьких обертах двигуна; збільшення номінальної потужності; підвищення тиску наддуву; зниження витрати палива; зниження димності відпрацьованих газів; високий потенціал для зниження викидів NO_x ; поліпшені перехідні характеристики.

При застосуванні двоступеневого регульованого турбонаддуву з охолодженням наддувального повітря типу R2S досягається найвищий середній ефективний тиск. Залежно від її налаштування система може бути реалізована як на низьких, так на високих частотах обертання вала двигуна. Проте потенціал даного мето-

ду можна реалізувати тільки при складних стратегіях управління.

Висновки

Аналізуючи вище наведений матеріал можна зробити висновок, що сучасні тенденції схильні до розвитку багатоступеневих систем наддуву, особливо для двигунів, які мають літрову потужність більше 60 кВт/л. Переваги такої системи – високий крутний момент при низьких обертах двигуна, підвищення тиску наддуву, збільшення номінальної потужності, зниження витрати палива, поліпшені перехідні характеристики. Але слід зазначити, що для двигунів з літровою потужністю до 60 кВт/л переважним є застосування одноступеневих систем наддуву.

Список літератури:

1. Halderman, J. Principles, Diagnosis, and Service /J. Halderman // Pearson Education. - 2012. - 1664 С.2. Грэм Белл, Увеличение мощности двигателя посредством наддува / Грэм Белл –Київ: Авто клуб,2013.-241 с. 3.Патрахальцев Н. Н. Наддув двигателей внутреннего сгорания /Патрахальцев Н. Н.-Москва : Издательство Российского Университета дружбы народов ,2003 .-320 с. 4.Патрахальцев Н.Н. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом / Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко. - Москва.: Легион-Автodata, 2007. - 176 с. 5. Химич В. Л. Выбор системы наддува в зависимости от требований экологических стандартов и уровня форсирования быстрогоходного автомобильного дизеля / В.Л. Химич , Д.В. Епифанов //Вестник УГАТУ.-2010.-№5.-С.38-45. 6. Baines, N. C. Fundamentals of turbocharging / N. C. Baines. – Concepts ETI, 2005. – 280 pp. 7.Каминский Р.В. Разработка систем наддува для ДВС различного назна-

чения/ Р.В. Каминский // Известия МГТУ МАМИ.-2014.- №5.-С.22-27. 8.Codan E. Emissions A new Challenge for Turbocharging / E. Codan, C. Mathey // CIMAC Congress 2007. – 2007. – Paper No. 245. 9. Развитие систем двухступенчатого наддува двигателей // Циплѐнкин Г.Е., Иовлев В.И., Коженков А.А.// Двигателестроение. – 2017. – №1 (267). – С. 24-30. 10.Wintruff I. The next generation of MTU series 4000 rail engines to comply with EUIIIВ emission legislation / I.Wintruff, O.Buecheler, S. Huchler // CIMAC Congress 2010, Bergen.

Bibliography (transliterated):

1. Halderman, J. (2012), Principles, Diagnosis, and Service, Pearson Education, Pearson, 1664 p. 2. Graham, Bell.(2013), Increasing engine power by boost [Uvelicheniye moshchnosti dvigatelya posredstvom nadduva],Kiev: Auto Club, 241 p. 3. Patrahaltsev N. N. (2003), Supercharging of internal combustion engines [Nadduv dvigateley vnutrennego sgoraniya], Moscow: Publishing House of the Peoples' Friendship University of Russia, 320 p. 4. Patrahaltsev N.N., Savastenko A.A.(2007), Forcing internal combustion engines by supercharging [Forsirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya nadduvom], Legion-Avtodata, Moscow, 176 p. 5. Himich V.L., Epifanov D.V. (2010), " Selection of pressurization depending on environmental standards and boost the level of high-speed automotive diesel " [Vybor sistemy nadduva v zavisimosti ot trebovaniy jekologicheskikh standartov i urovnja forsirovaniya bystrohodnogo avtomobil'nogo dizelja],Vestnik UGA-TU, No. 5, pp. 38-45. 6. Baines, N. C.(2005), Fundamentals of turbocharging. Concepts ETI, 280 p. 7. Kaminsky R.V.(2014), "Development of pressurization systems for ICE for various purposes"[Razrabotka sistem nadduva dlya DVS razlichnogo naznacheniya],News of MSTU MAMI ,No 5, pp.22-27. 8. Kodan E. (2007), "Emissions - A New Challenge for Turbocharging" CIMAC Congress, Hofburg, May 21-24, 2007, Vienna, Paper No. 245. 9. Cipljonkin G.E., Iovlev V.I., Kozhenkov A.A.(2017) " The development of two-stage engine boost systems " [Razvitie sistem dvuhstupenчатого nadduva dvigatelej] , Engine building, No 1, pp. 24-30. 10. Wintruff I. O. Buecheler, S. Huchler (2010) "The Next Generation of MTU 4000 Series Rail Motors Must Meet EU III Emissions Regulations" 26th CIMAC Congress in Bergen, June 14-17, 2010, in Grigallen.

Надійшла до редакції 30.06.2020 р.

Шелестов Максим Сергійович – аспірант кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, orcid: 0000-0001-9003-1422, e-mail: maks.shelestow@gmail.com.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ НАДДУВА ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

М. С. Шелестов

В работе выполнен анализ мирового опыта по форсированию дизельных двигателей с помощью совершенствования системы воздухообеспечения, то есть установление приводных нагнетателей и турбокомпрессоров (ТКР). Рассмотрены два основных типа механических нагнетателей: коловратные и центробежные. Проанализированы наиболее распространенные модели коловратных нагнетателей Рутса, Итона и Лисхольма, схемы и принцип действия центробежных нагнетателей. Основным недостатком механического наддува является то, что вся мощность, необходимая для сжатия воздуха, отбирается от коленчатого вала двигателя. Поэтому наиболее перспективным считается газотурбинный наддув. Проанализирована схема одноступенчатого наддува на примере известных автопроизводителей таких как «Pegaso» и Volkswagen. Определено, что применение турбонаддува повышает эффективность работы двигателя, выражается в снижении удельного эффективного расхода топлива. Дальнейшее развитие направлено на совершенствование одноступенчатых систем турбонаддува, уменьшение размеров турбокомпрессоров, снижение инерционности, использование регулирующих элементов в турбине, применение двухступенчатых систем наддува. Кроме того, выполнен анализ работы известных компаний-разработчиков систем наддува («ABB Turbo Systems», MTU, MAN, Borg Warner Turbo System), который показал, что для дизелей, которые имеют литровую мощность более 60 кВт / л, рациональным является использование двухступенчатых систем наддува с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха. Преимуществами применения двухступенчатой системы наддува являются: высокий крутящий момент при низких оборотах двигателя; увеличение номинальной мощности; повышение давления наддува; снижение расхода топлива; снижение дымности отработавших газов; высокий потенциал для снижения выбросов NOx; улучшенные переходные характеристики. При применении двухступенчатого регулируемого турбонаддува с охлаждением наддувочного воздуха типа R2S достигается

высокое среднее эффективное давление. В зависимости от настройки система может быть реализована как на низких, так на высоких частотах вращения вала двигателя.

Ключевые слова: мощность; механическая системы наддува; одноступенчатая система наддува; многоступенчатая система наддува; компрессор; турбина.

DEVELOPMENT OF BOOST SYSTEMS FOR FORCED DIESEL ENGINES

M. Shelestov

The paper analyzes the world experience in boosting diesel engines by improving the air supply system, i.e. the installation of drive superchargers and (turbochargers) TKR. Two main types of mechanical superchargers, rotary and centrifugal, are considered. The most common models of rotatory superchargers, Roots, Eaton and Lysholm, the scheme and principle of operation of centrifugal superchargers are analyzed. The main disadvantage of mechanical supercharging is that all the power needed to compress the air is taken from the engine crankshaft. Therefore, gas turbine supercharging is considered the most promising. Single-stage boost systems are analyzed using the example of well-known car manufacturers such as Pegaso and Volkswagen. It has been established that the use of turbocharging increases engine efficiency, which leads to a decrease in specific effective fuel consumption. The further development is aimed at improving single-stage turbocharging systems, reducing the size of turbochargers, reducing inertia, using turbine controls and using two-stage boost systems. In addition, an analysis is made of the work of well-known companies developing boost systems (ABB Turbo Systems, MTU, MAN, Borg Warner Turbo System), which showed that for diesel engines with a liter capacity of more than 60 kW / l it is rational to use a two-stage boost system with intermediate cooling of the charge air. The advantages of using a two-stage boost system are: high torque at low engine speeds; increase in rated power; increase in boost pressure; reduction in fuel consumption; smoke reduction; high potential to reduce NOx emissions; improved transient characteristics. The use of a two-stage controlled turbocharging with cooling of the charge air type R2S achieves a high average effective pressure. Depending on the setting, the system can be implemented both at low and high engine speeds.

Key words: power; mechanical boost system; single-stage boost system; multi-stage boost system; compressor; turbine.