

*Affecting the Performance of a Turbocharger Bearing Unit* ["*Analiz faktorov, vliyayushchikh na rabotosposobnost' podshipnikovogo uzla turbokompresora*"], *SGTU, Saratov p. 44–49*. 9. Trynov O.V., Sivikh D.G., Nesvytailo V. A. (2016) "*Turbocharger with cooled bearing*" ["*Turbokompresor z okhолоdzhuvanyim pidshypnykom*"], *Patent of Ukraine UA 115615 C2*. 10. Trynov O.V., (2014), "*Scientific bases of local cooling of heat-stressed details of internal combustion engines*" ["*Naukovi osnovy lokal'noho okhолоdzhennya teplonapruzhenykh detaley DVZ*"], *Pidruchnyk NTU "KHPI", Kharkiv, 239 p.* 11. *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P*, – © 2018 *Microchip Technology Inc. / megaAVR® Data Sheet/2018*. 12. *Lovato. Let the blue drive you*, – *General catalogue*, – [http://www.lovatogas.com/general\\_catalogue/#1](http://www.lovatogas.com/general_catalogue/#1).

Надійшла до редакції 14.06.2022 р.

**Триньов Олександр Володимирович** – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-0344-8332>, e-mail: [trinaleksandr427@gmail.com](mailto:trinaleksandr427@gmail.com).

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

## DEVELOPMENT OF MEASURES TO INCREASE RELIABILITY TURBOCHARGER BEARING UNIT AUTOTRACTOR DIESEL ENGINE

A.V. Trynov, D.G. Sivikh

To increase the reliability of small turbochargers, in particular the bearing unit, it is proposed to use in the automatic mode of local cooling of the bearing with compressed air. The design of the turbocharger with the central case which houses the bearing and to which engine oil from the engine lubrication system is brought under excess pressure is considered. This design is the most common among turbochargers of tractor engines. Forced engine modes can be critical for the bearing, accompanied by fluctuations in the exhaust gas temperature, for example, due to an uncontrolled increase in cyclic supply, a sharp increase in load. Such modes lead to an increase in temperature deformations of the turbine wheel, rotor, reduce the reliability of the turbocharger. Heat dissipation from the rotor through the bearing assembly into the lubrication system is insufficient, additional short-term local cooling is required. The study simulated heat transfer processes in the bearing assembly of a small turbocharger using the developed mathematical model based on the finite element method. To clarify the model, namely the boundary conditions of the thermal conductivity problem, a series of non-motorized experiments with a locally cooled bearing were performed. In the course of non-motorized experiments, the algorithm of the automatic control system operation was worked out, some of its structural elements were selected and tested in practice. Conducted non-motorized experiments and the results of mathematical modeling confirmed the effectiveness of using the system of automatic local cooling of the bearing assembly. These measures increase the reliability of small turbochargers.

**Keywords:** turbocharger bearing assembly; local bearing cooling; motorless experiment; automatic control.

УДК 621.43

DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.03

*А.Г. Лал, М.С. Шелестов*

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ НАДДУВУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ У АГРЕГАТАХ НАДДУВУ

*В роботі проведено аналіз сучасних рішень по підвищенню потужності двигунів за рахунок удосконалення системи повітряпостачання. Розглянуті одноступеневі та багатоступеневі схеми наддуву з газовим, механічним та комбінованим зв'язком у декількох варіаціях, виявленні їх позитивні та негативні сторони для сучасного машинобудування. Найпростішою та найпоширенішою є схема з газовим зв'язком між поршневою частиною і ТКР, але у випадку для двотактних дизельних двигунів треба зважати на особливості робочого процесу, де на малих обертах енергії вихлопних газів недостатньо для приведення в дію турбокомпресора. Другим варіантом є схеми з механічним зв'язком, де вали турбіни та компресора поєднані з валом двигуна за допомогою механічної передачі. Також можлива схема, при якій компресор і турбіна можуть бути окремо з'єднані з колінчастим валом дизеля. Таке рішення забезпечує синхронну роботу компресора і поршневого двигуна на усіх режимах, сприяє кращому газообміну, покращує показники на перехідних режимах та пускові властивості. Одним з вданих рішень для двотактних дизелів є розробка комбінованих систем наддуву з проміжним охолоджувачем повітря, які вже вважаються багатоступеневими системами. Розділяються вони загалом на дві схеми, в одній схемі привідний компресор - ступінь високого тиску, а ТКР - низького тиску, друга схема навпаки. Для двотактних дизелів набув чинності та став більш відомим саме перший варіант. За останні 7 років підхід до вдосконалення системи наддуву набув деяких змін, одні з трендів є *Electric Boosting Systems* та впровадження цих систем для громадських автомобілів. Одними з перших були компанії *Audi*, *Daimler*, *Land Rover*, які почали оснащувати свої автомобілі електронадувом. На даний час амбасадрами цієї теми можна вважати такі великі компанії як *BorgWarner* та *Garrett*. Так, наприклад, підрозділ *AMG* спільно з фірмою *Garrett* розробили та презентували серійний електротурбонадув. Проблема використання електричного приводу в системах наддуву набуває більшого розголосу в останній час, та вже є змога*

зробити висновок щодо наяви великого потенціалу та можливості використання подібних розробок для вітчизняних двотактних дизельних двигунів.

**Ключові слова:** двотактний дизель; повітряпостачання; наддув; багатоступеневий наддув; механічний наддув; турбокомпресор; електронадув; турбоелектронадув.

**Вступ.** У сучасному світі актуальним завданням машинобудування є підвищення потужності та крутного моменту двигуна. Як відомо потужність двигуна безпосередньо пов'язана з робочим об'ємом циліндрів і кількістю палива-повітряної суміші, що подається в них, чим більше палива згоряє, тим більше потужність розвиває двигун. Є багато способів збільшення потужності двигуна. Збільшення його робочого об'єму звісно дає результат, але в той же час призводить до збільшення габаритів і маси конструкції силового апарату. За рахунок збільшення обертів колінчастого валу також можна збільшити кількість поданої робочої суміші, але й призведе до зростання сил інерції і різкого збільшення механічних навантажень на деталі силового агрегату, наслідок цього - зниження ресурсу двигуна. Більшість компаній, які виробляють автомобілі, вдаються до найбільш ефективного способу підвищення потужності, а саме застосування систем наддуву, що дозволяє примусово подати більше повітря в циліндри, впорснути більше палива та отримати більшу потужність без збільшення габаритів і маси силового агрегату [1].

На сьогоднішній день є кілька основних способів організації наддуву:

- наддув з механічним зв'язком, де компресор приводиться у обертання від двигуна через ремінний або шестерний зв'язок

- газотурбінний, де турбіна приводиться в рух від потоку відпрацьованих газів.

Та все ж технології не стоять на місці і існуючі способи ускладнюються, з'являються турбіни з змінною геометрією, а за останні декілька років набуває популярності схема наддуву e-turbo, що передбачає використання наддуву з електричним приводом додаткового компресора (або схеми з комбінованим газовим та електричним зв'язком компресора). Компанії Audi, Daimler та Land Rover використовують подібні схеми наддуву. А відомий виробник турбокомпресорів Garrett вже досяг успіху у новому напрямку та представив електротурбокомпресор, доступний для придбання. Сучасні ДВЗ достатньо технологічні та складні, резерви для вдосконалення скорочуються. Один із таких знайдених резервів полягає в оснащенні агрегатів наддуву електронним приводом, ця тема набуває все більшого розвитку і є актуальною у наш час.

**Мета роботи.** Аналіз світового досвіду з розробки та використання систем наддуву з електричним приводом, доцільність використання схем

наддуву типу e-turbo. Розробка схеми двоступеневого наддуву з електричним приводом для двотактного дизельного високофорсованого двигуна 6СН12/2х12.

#### Аналіз схем організації наддуву

Відомі системи наддуву з використанням турбокомпресорів слугують для підвищення потужності двигуна за рахунок енергії вихлопних газів. В таких системах колесо турбіни жорстко з'єднане з колесом компресора спільним валом (рис. 1).

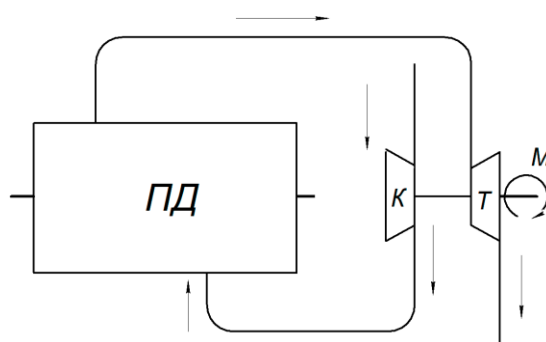


Рис. 1. Схема ДВЗ з газовим зв'язком між поршневою частиною і ТКР

Колесо турбіни обертається із високою швидкістю під дією енергії потоку вихлопних газів. В свою чергу з'єднане спільним валом колесо компресора слугує для стиску повітря на впуску ДВЗ. Швидкість обертання колеса турбін то колеса компресора є завжди однаковою і залежить від об'єму та швидкості потоку вихлопних газів, геометрія та розміри турбінної і компресорної частин турбокомпресора повинні бути узгоджені між собою. У зв'язку з особливостями робочого процесу двотактного двигуна [2], на малих обертах енергії вихлопних газів недостатньо для постачання необхідної кількості повітря на впуску, яке б могло забезпечити задовільну якість процесів сумішоутворення та згоряння. При малих навантаженнях енергії випускних газів недостатньо для приведення в дію турбокомпресора. Потужність турбіни на таких режимах замала для постачання в циліндр необхідної кількості повітря, ускладнюється пуск двигуна та його робота при неповному навантаженні. [1]

Існують схеми з механічним зв'язком – вали турбіни, компресора поєднані з валом двигуна за допомогою механічною передачею.

Компресор і турбіна можуть бути окремо з'єднані з колінчастим валом дизеля (рис. 2).

Або компресор й турбіна з'єднані одним валом, а на вал двигуна передається різниця потужностей турбіни й компресора (рис. 3).

Вал дизеля поєднаний з валом турбіни та компресора за допомогою двох незалежних гідروмуфт (рис. 4, а) або однієї на валу компресора (4, б) чи на спільному валу компресора й турбіни (4, в).

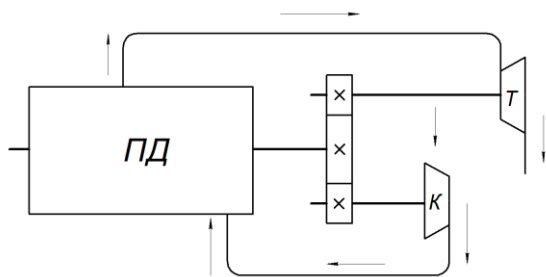


Рис. 2. Схеми двигуна

Механічний зв'язок забезпечує гарні пускові властивості та прийомісткість. Перевага таких схем полягає у синхронній роботі компресора і поршневого двигуна на усіх режимах, що сприяє кращому газообміну, в тому числі й на перехідних режимах. При цьому тиск наддуву може бути збільшений незалежно від потужності турбіни. Недоліки – складність конструкції, втрати потужності в механізмі передачі, більші габарити, особливо при наявності гідромуфт.

Природно, що двигуни з газовим зв'язком турбіни й компресора з поршневою частиною набули більшого поширення на наземному транспорті. Але для покращення пускових властивостей двигуна та його роботи при неповному навантаженні, виникає потреба у додатковому агрегаті – привідному компресорі, який би міг забезпечити необхідний тиск наддуву на малих обертах колінчастого валу.

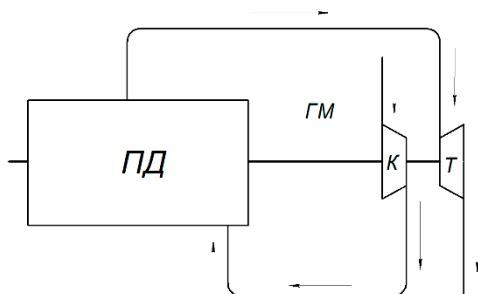
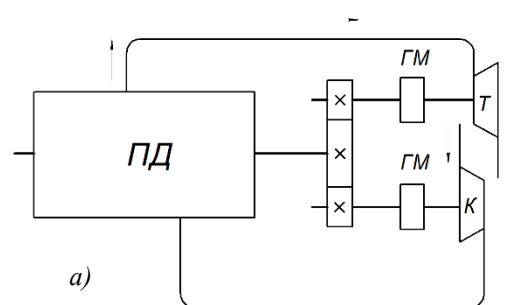
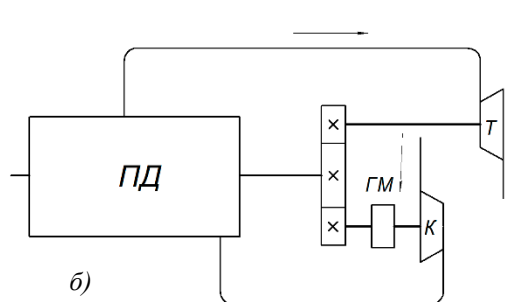


Рис. 3. Схеми двигуна

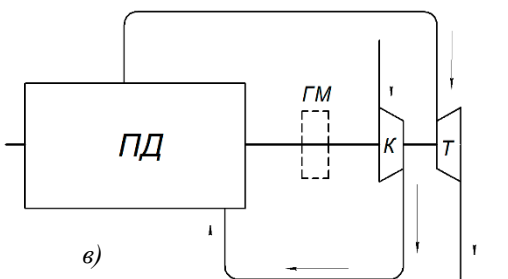
Конструкція може бути ускладнена наявністю гідромуфт (рис. 4).



а)



б)



в)

Рис. 4. Схеми двигуна з механічним зв'язком та гідромуфтою

Ця проблема може бути вирішена шляхом організації компенсації потужності газової турбіни. Такі двигуни в літературі називають двигунами з комбінованим зв'язком турбіни й компресора з поршневою частиною або двигунами з комбінованою системою наддуву [3]. Прикладів виконання декілька. Це може бути механічний зв'язок ТКР з колінчастим валом (рис. 5) - конструкція передбачає муфти, за допомогою яких ТКР від'єднується від валу на режимах, коли потужності достатньо для приведення в дію компресора. Подальше вдосконалення - наявність проміжного охолоджувача повітря, що дозволяє витратити менше потужності для отримання заданої кількості повітря.

Або ж це може бути використання двоступеневого наддуву. Такі системи можуть мати одну з двох схем:

- 1) перша ступінь стиску – турбокомпресор, друга – привідний компресор (рис. 6);
- 2) перша ступінь стиску – привідний компресор, друга – турбокомпресор (рис. 7).

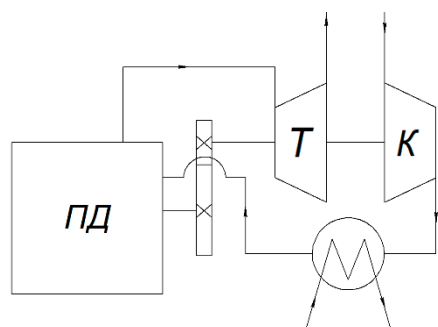


Рис. 5. Схема комбінованого наддуву

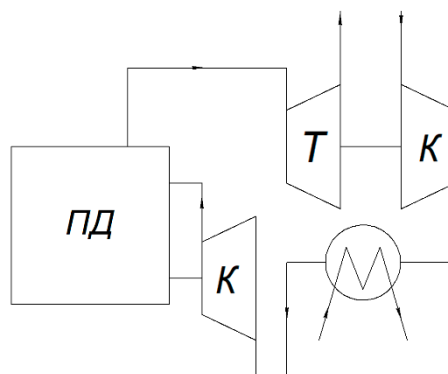


Рис. 8. Схема двоступеневого наддуву з послідовним підключенням агрегатів наддуву

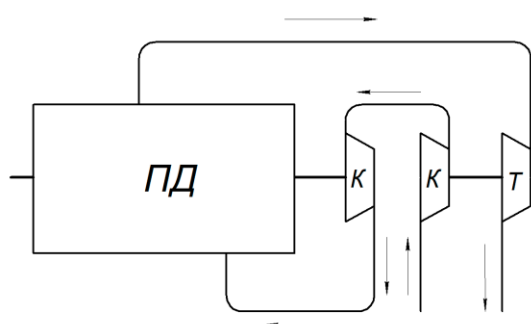


Рис. 6. Перша ступінь стиску – турбокомпресор

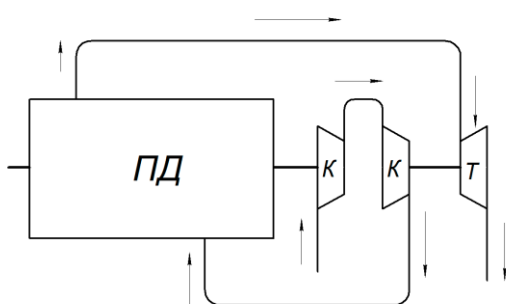


Рис. 7. Схеми двигуна з комбінованим зв'язком. Перша ступінь стиску – привідний компресор

При втіленні першої схеми витрати потужності на приведення в дію компресора менші, що обумовлює дещо вищий ККД двигуна, прийомісткість по експлуатаційним якостям близька до двигунів із звичайним газотурбінним наддувом. Цей тип з'єднання агрегатів набув більш широкого розповсюдження. Друга схема характеризується обмеженням можливості форсування по витраті повітря без заміни привідного компресора та зумовлюють зростання навантаження в передачі від колінчастого валу при різкій зміні його обертів.

В свою чергу агрегати наддуву можуть бути з'єднані послідовно (рис. 8) чи паралельно.

### Потенціал використання електричного приводу у системі наддуву

Застосування електронного приводу [4] є наступним кроком розвитку агрегатів турбонаддуву для сучасного машинобудування. Провідні компанії в галузі турбонагнітачів Garrett Motion та BorgWarner стверджують, що при більшому контролі за роботою турбонагнітачів потужність та ефективність можуть бути покращені. Volkswagen та Mercedes-Benz вже мають досвід виконання гібридних систем наддуву, а саме двоступеневих турбокомпресорів з електродвигуном, який призводить в дію компресор турбонагнітача до тих пір, доки енергії вихлопних газів не буде достатньо для забезпечення необхідної швидкості обертання ротора турбіни і взяти на себе управління на більш високих швидкостях. Ідея компанії Garrett у тому, щоб E-Turbo використовував більший електродвигун для обертання більшого компресора на нижчих швидкостях, що в кінцевому підсумку дозволяє вихлопним газам частково або повністю обернути компресор при збільшенні оборотів двигуна. І компанія вже розробила свій E-Turbo спеціально для роботи з 48-вольтовими системами, які зараз використовуються у багатьох серійних автомобілях. Демонстраційний зразок Garrett показав значне покращення при перемиканні із звичайного турбонаддуву на електронний турбонаддув. При низьких обертах двигуна  $1500 \text{ хв}^{-1}$  цільовий крутний момент досягався за 1 секунду проти 4,5 секунд у поточній серійній моделі. Номінальна потужність збільшилася на 16%, крутний момент збільшився на 10,5%. Головні переваги E-Turbo - використання більших турбін, які не вимагають скидання палива, яке необхідно меншим турбінам для охолодження під час тривалого використання. Крім того, застосування наведеної системи на дизельних двигунах дає скорочення викидів NOx до 20%, що є вагомою перевагою.

eTurbo від BorgWarner - це механічний турбокомпресор, оснащений надвисокошвидкісним електродвигуном, з'єднаним безпосередньо з валом [5]. Треба зазначити, що сама схема винайдена раніше, наприклад патент Хідео Кавамури 1988 року [4].

Таке рішення забезпечує додаткову перевагу електрифікованого наддуву у покращеному відгуку, він забезпечує більш ніж на 200% швидшу перехідну реакцію наддуву, і 50% скорочення часу досягнення крутного моменту, майже усуваючи турбозатримку і додатково підтримуючи зменшення розмірів двигуна. Цей електрифікований турбо-нагнітач особливо добре підходить для концепцій двигунів, що працюють за циклом Міллера, забезпечуючи як покращену економію палива, так і зниження викидів без втрати продуктивності. Також eTurbo може служити генератором, здатним збирати надмірну енергію вихлопних газів та перетворювати її на електричну енергію.

#### Перспективні системи електричного приводу у системі наддуву та їх застосування на вітчизняних двотактних двигунах

Підтримка показників вітчизняних силових агрегатів на високому рівні серед конкурентних закордонних розробок потребує безперервного процесу вдосконалення технічних рішень та впровадження нових технологій. Однією з таких є система наддуву з приводом від електродвигуна.

В системі наддуву з газовим зв'язком, турбіна й компресор жорстко пов'язані між собою спільним валом і повинні бути ретельно узгоджені між собою. Однак жодна з цих частин не працює в оптимальних умовах на усіх режимах роботи двигуна. Наведені вище системи з використанням електронаддуву не вирішують цієї проблеми, хоча покращують перехідну реакцію наддуву і прийомісткість двигуна.

Натомість запропонована далі схема передбачає механічно незалежні турбіни й компресор, які можуть бути оптимізовані для більшої ефективності, а крім того й розташовані з різних сторін двигуна.

Ідея полягає у використанні електричних машин, які б забезпечували швидкість обертання колеса компресорної частини з однієї сторони, та з іншої - працювали як генератор та накопичували надлишкову енергію від турбінної частини (рис. 9).

За цією схемою агрегат наддуву складається з:

- турбіни, що приводить в дію електрогенератор;
- компресора, механічно незалежного від турбіни, який працює від електродвигуна.

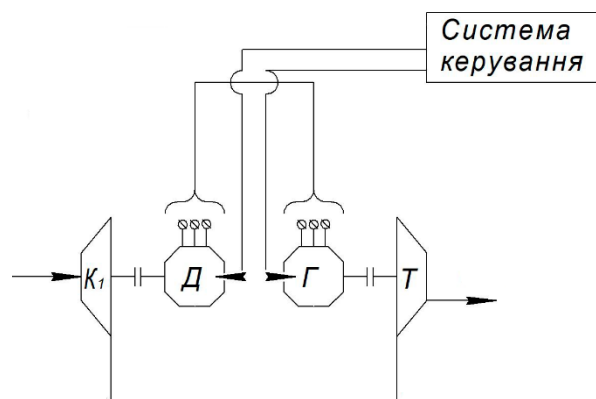


Рис. 9. Схема наддуву із використанням електричного приводу

Турбіна з'єднана з електрогенератором, останній, обертаючись від турбіни, виробляє електричний струм. Генератор, в свою чергу, підключений до системи зберігання (електронної батареї).

На усіх режимах роботи двигуна регулювання здійснюється комп'ютерною системою керування, яка в режимі реального часу змінює оберти ротора компресора за допомогою електродвигуна, також з'єднаного з системою зберігання.

#### Висновки

Враховуючи сучасні тенденції проектування двигунів, їх майбутнє майже неможливо без використання наддуву. В роботі проведено аналіз існуючих схем наддуву, починаючи від найпростіших турбокомпресорів та завершуючи перспективними системами, які ще не отримали розповсюдження, але набувають все більшого інтересу.

Такі виробники як Garrett та BorgWarner мають позитивні результати експериментальних досліджень та підкреслюють позитивний ефект від використання електричного наддуву. Крім покращення прийомісткості та скорочення часу досягнення номінального крутного моменту, також відмічається покращена економічність та зниження викидів.

В якості подальшого розвитку електрифікованого наддуву запропоновано механічно незалежні турбіни й компресор. Де електричні машини забезпечують потрібну швидкість обертання колеса компресорної частини з однієї сторони, та з іншої працюють як генератор та накопичують надлишкову енергію від турбінної частини.

#### Список літератури:

1. Шелестов, М.С. Розвиток системи наддуву високофорсованих дизелів / М. С. Шелестов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2020. – № 2. – С. 20-27.
2. Парсаданов І. В. Концепція організації процесу згоряння в опозитному двотактному дизелі при високому рівні форсування / І. В.

Парсаданов, А. Г. Лал // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 1. – С. 45-51. 3. Орлин А. С. Комбинированные двухтактные двигатели / А. С. Орлин, М.Г. Круглов. — М.: Машиностроение, 1968. – 576 с. 4. Turbocharger for internal combustion engines : пат. 4,769,993 Сполучені Штати Америки (США) : F02B39/10 / Н. Kawamura, Isuzu Motors Limited. - № 139,099 /; заявл. 24.12.1987 ; опубл. 13.09.1988. 5. Electric Boosting Technologies - BorgWarner [Електронний ре-сурс]. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.borgwarner.com/technologies/electric-boosting-technologies>.

**Bibliography (transliterated):**

1. Shelestov M.S. (2020), "Development of boost systems for forced diesel engine", *Internal combustion engines [Rozvytok systemy naddivu vysokoforsovanykh dyzeliv]*, No. 2, pp. 20-26. 2. Parsadanov I.V. (2021), "The concept of combustion process organisation in a boxer two-stroke diesel engine at a high level of boosting", *Internal combustion engines [kontseptsiya orhanizatsiyi protsesu z'horyannya v opozytnomu dvotaktnomu dyzeli pry vysokomu rivni forsovannya]*, No. 1, pp. 45-51. 3. Orlin A. S., Kruglov M.G. (1968), "Combined two-stroke engines"[ *Kombinirovannyye dvukhtaknyye dvigateli*], *Mashinostroyeniye, Moscow, 576p*. 4. Kawamura, H., *Isuzu Motors Limited. 1988. Turbocharger for internal combustion engines. USA. Pat. 4,769,993*. 5. "Electric Boosting Technologies - BorgWarner", available at: <https://www.borgwarner.com/technologies/electric-boosting-technologies>

Надійшла до редакції 12.07.2022 р.

**Лал Амір Гул (Amir Lal)** – магістр, аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [amir.Lal@iee.khpi.edu.ua](mailto:amir.Lal@iee.khpi.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4729-3739>.

**Шелестов Максим Сергійович (Shelestov Maxim)** – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [maksym.shelestov@iee.khpi.edu.ua](mailto:maksym.shelestov@iee.khpi.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-9003-1422>.

**ANALYSIS OF EXISTING SUPERCHARGING SYSTEMS AND PERSPECTIVES OF APPLICATION OF ELECTRIC DRIVE IN SUPERCHARGING UNITS**

*A.G. Lal, M.S. Shelestov*

The article analyzes modern solutions for increasing engine power by improving the air supply system. Single-stage and multi-stage pressurization schemes with gas, mechanical and combined connection in several variations are considered, their positive and negative sides for modern mechanical engineering are revealed.

The simplest and most common is the turbocharging system, in which the turbine rotates only under the exhaust gases and this drives the compressor. Consideration should be given to the features of the working process of two-stroke diesel engines. At low speeds, there is not enough energy from the exhaust gases to drive the turbocharger. The second option is schemes in which the turbine and compressor shafts are connected to the engine shaft using a mechanical transmission. Another scheme is also possible in which the compressor and turbine can be separately connected to the crankshaft. Such solutions ensure synchronous operation of the compressor and reciprocating engine in all modes, improve the gas exchange process, improve performance in transient conditions and improve starting properties. One successful solution for two-stroke diesel engines is the development of a combined supercharging system with an intercooler, which are already considered multi-stage systems. They are generally divided into two schemes, in the first scheme the drive compressor is a high pressure degree, and the turbocharger is low pressure, the second scheme is vice versa. It is the first option that is more often used for two-stroke diesel engines, since the power consumption for driving the compressor is less, which causes a slightly higher engine efficiency. Injectivity is close to engines with conventional gas turbine supercharging.

Over the past 7 years, the approach to improving the pressurization system has undergone some changes, Electric Boosting Systems for civilian vehicles have appeared. One of the first companies were Audi, Daimler, Land Rover, which began to equip their vehicles with electric supercharging. Currently, such large companies as BorgWarner and Garrett can be considered ambassadors of this technology. For example, AMG, together with Garrett, developed and introduced serial electric turbocharging. The problem of using an electric drive in boost systems has been lately gaining more publicity, it is already possible to conclude that there is great potential and the possibility of using such developments for domestic two-stroke diesel engines.

**Key words:** two-stroke diesel engines with opposing piston movements; 2-stroke opposed engine; air supply; supercharging; multi-stage supercharging; mechanical supercharging; turbocharger; electric supercharging; turboelectric supercharging.